

DOI: 10.11779/CJGE201405006

考虑固结群桩竖向应力相互作用的积分方程分析方法

梁发云^{1, 2}, 宋 著^{1, 2}, 郭蔚东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. 卧龙岗大学土木、采矿与环境工程学院, 澳大利亚 卧龙岗 NSW 2522)

摘 要: 采用 Biot 固结方程, 分别以等长和不等长两桩为分析对象, 将受竖向荷载作用的桩土体系分解成半空间饱和扩展土和虚拟桩, 基于竖向应变协调关系建立桩土相互作用的第二类 Fredholm 积分方程, 求解出不同固结状态时的桩身轴力分布。在等长两桩中, 由于邻近桩的存在, 桩身附加轴力主要分布于桩身 20%~80% 深度处, 其影响程度随着桩间距的增加而减弱。进一步将等长两桩分析扩展至群桩研究中, 分析表明: 群桩效应引起了桩顶荷载的不均匀分布; 土体固结对桩身内力分布也有一定的影响, 固结后角桩承担的荷载有所下降。桩长不等时, 长短桩之间的相互作用效应并不一致, 表现为两桩桩顶承受相同荷载时长桩沿桩身附加轴力增加较短桩明显。最后, 将不等长桩相互作用系数应用于群桩的优化分析中, 在保证总桩长和桩基沉降基本相当的情况下, 通过调整不同位置的桩长使得各桩受力趋于合理。

关键词: 积分方程; 不等长桩; 群桩效应; Biot 固结; 桩身附加轴力

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)05-0847-08

作者简介: 梁发云(1976-), 男, 安徽肥东人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事桩基础、深基坑工程及桥梁冲刷等方面的教学和科研工作。E-mail: fyliang@tongji.edu.cn。

Integral equation method for interaction effect of stress of vertically loaded pile groups considering consolidation

LIANG Fa-yun^{1, 2}, SONG Zhu^{1, 2}, GUO Wei-dong³

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

Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Civil, Mining and Environmental

Engineering, University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522, Australia)

Abstract: The interaction effect of stress is obtained for two vertically loaded piles which are of equal or different pile lengths embedded in the homogeneous poroelastic saturated soils governed by the Biot's theory. The pile-soil system is decomposed into an extended soil and two fictitious piles, and the compatibility condition between the axial strain of the fictitious piles and the extended soil is established. This approach yields the governing Fredholm integral equations of the second kind, and the basic unknowns of the axial force and settlement along the pile shaft are calculated. For the piles with the same length, the additional force along the pile shaft can be observed at 20%~80% depth of pile length due to the adjacent pile and decreases with the pile spacing. Extending two-pile model into pile group analysis, pile group effect will lead to the differences in load at the pile heads. The consolidation effect can alter the distribution of axial stress along the pile shafts. The loadings acting on the corner piles decrease. For the piles with different dimensions, the interactions among long and short piles are different, and the additional axial force along the long pile is greater than that along the short one. The combination of long and short piles is applied to the optimization of pile groups. The results show that adjusting the pile length within a pile group can reduce the differential pile-head loadings without increasing the total pile length and pile-head settlement.

Key words: integral equation method; dissimilar pile; pile group effect; Biot consolidation; additional axial force

0 引 言

由于群桩中各桩的相互作用而产生的群桩效应, 使得群桩基础的承载力往往并不等于相同条件下各单桩的承载力之和, 各桩沿桩身的荷载传递特性与单桩

相比也会有不同程度的变化^[1]。当群桩的数量较多时,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172246); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB036304)

收稿日期: 2013-09-03

群桩效应也较为复杂^[2]。两桩模型作为最简单的群桩系统, 将其与单桩进行对比, 得到两桩的相互作用效应, 如桩顶附加沉降和桩身附加应力^[3-4], 在此基础上扩展至群桩的研究之中^[5-8]。

传统的两桩相互作用效应研究通常假定两桩的尺寸和材料力学参数相同, 桩顶所受荷载相同^[9], 通过限定条件分析桩的长径比、桩土刚度、桩间距等关键参数对两桩相互作用效应的影响。而随着群桩优化思想的广泛应用, 两桩分析中出现了不同长度桩的相互作用分析^[7, 10-11]。

在上述研究中, 均假定土体为单相介质, 不考虑土体固结后桩的沉降和应力重分布的影响。而在软土地区, 桩通常是埋置于饱和软土中, 不考虑土体固结的影响显然是不够严谨的。针对此类问题, 王建华等^[12-13]考虑土体的固结和流变特性建立了饱和地基中单桩沉降的积分方程方法, 并推广至群桩分析。而在数值模拟方面, 考虑固结的桩筏基础内力^[14]、引入地基土弹塑特性^[15]和群桩-土刚性承台^[16]等方面的研究。笔者曾采用积分方程对单相介质中的复合型群桩进行积分方程解答^[17], 并给出了两桩相互作用系数的研究成果^[18], 同时, 针对软土固结问题采用 Biot 方程考虑土体的固结效应, 分析等长基桩背景下的群桩作用分析^[19]。在本文中, 桩土体系分成半空间扩展土和虚拟桩^[20], 基于两者之间的应变协调条件建立第二类 Fredholm 积分方程, 通过数值方法进行求解, 得出不同固结状态下沿桩身受力情况, 进一步分析不等长桩体的受力变形情况。同时, 结合群桩优化中调节桩长的思想, 采用不同桩长的两桩相互作用分析, 并将其应用于 5×5 的群桩优化设计案例中。

1 两桩相互作用模型的建立与求解

1.1 两桩相互作用模型

图 1 (a) 表述了相同的 2 根圆形桩埋置于半空间饱和土中, 桩长 L , 桩径 d , 桩的弹性模量为 E_p , 桩间距为 s , 桩顶受到相同的荷载 $N(0)$ 。半空间饱和土的弹性模量为 E_s , 泊松比为 μ_s , 渗透系数为 k , 土体表面可渗透。坐标轴 z 为深度方向。桩土模型分解为半空间扩展土和 2 根虚拟桩, 如图 1 (b) 所示, 虚拟桩的弹性模量为 $E_p^* = E_p - E_s$; 为简化模型, 假定虚拟桩与土体有相同的渗透系数。

(1) 虚拟桩

假定虚拟桩桩顶承受 $N^*(0)$ 的拉力, 则半空间扩展土相应位置承受 $N(0) + N^*(0)$ 的压力, 两者之和等于真实荷载 $N(0)$ 。根据作用力与反作用力的原则, 每根桩沿桩身各处及相应区域 $\Pi(z)$ 内的扩展土存在竖直均布

荷载 $q(z)$ ($0 < z < L_i$), 在桩端底面则为 $N^*(L_i)$, 大小相同, 方向相反。为简洁表达, 现仅对 P_1 桩进行说明, 其研究理论和计算步骤同样适用于 P_2 桩。其应力应变关系和一维应变位移关系如下:

$$\varepsilon_{p1}^*(z) = \frac{-N_1^*(z)}{E_{p1}^* A_{p1}} \quad (1a)$$

$$q_1(z) = \frac{dN_1^*(z)}{dz} \quad (1b)$$

式中, $\varepsilon_{p1}^*(z)$, $q_1(z)$, $N_1^*(z)$ 分别为虚拟桩 P_1 沿 z 方向的应变、剪切力和轴力。

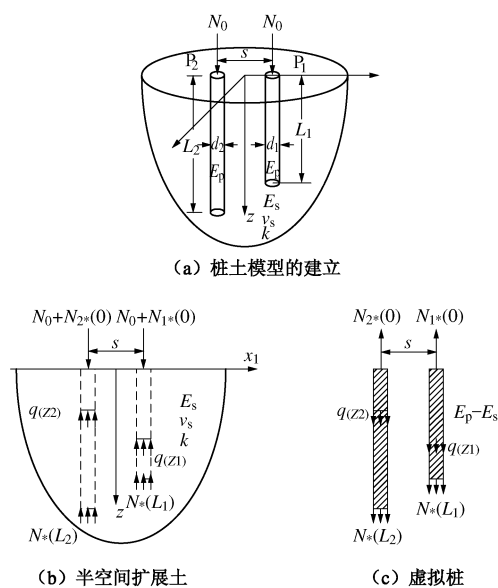


图 1 半空间土中竖向受荷桩模型建立和分解

Fig. 1 Geometry of two vertically loaded piles embedded in semi-infinite soils and decomposition scheme

(2) 半空间扩展土

当圆形均布荷载作用于半空间均质土中, 由 Biot 固结理论可以得出以下控制方程:

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{r^2} \right) u_r + (2\eta - 1) \frac{\partial e}{\partial r} + \frac{1}{G_s} \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (2a)$$

$$\nabla^2 u_z + (2\eta - 1) \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{1}{G_s} \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (2b)$$

$$c \nabla^2 P = - \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2c)$$

式中 u_r , u_z 分别为土体 r 和 z 方向的位移; P 为超静孔压; G_s 为土体剪切模量; ∇^2 为 Laplace 算子; t 为时间; $\eta = \frac{1 - \mu_s}{1 - 2\mu_s}$; $e = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$ 为体积应变; $c = \frac{2G_s \eta k}{\rho}$, ρ 为水的重度。

引入 McNamee 等^[21] 位移函数 E 和 S , 并满足

$$c \nabla^2 E = \nabla \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3a)$$

$$\nabla S = 0 \quad (3b)$$

对式 (3a)、3 (b) 进行0阶Laplace-Hankel变换, 得

$$\overset{0}{E}(\xi, z, s) = \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-st} r J_0(r\xi) E(r, z, t) dr dt \quad (4a)$$

$$\overset{0}{S}(\xi, z, s) = \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-st} r J_0(r\xi) S(r, z, t) dr dt \quad (4b)$$

式中, $J_0(r\xi)$ 为0阶第一类Bessel函数。求解式 (4a)、(4b), 得到常微分方程解:

$$\overset{0}{E}(\xi, z, s) = A e^{-z\xi} + B e^{-z\gamma} + C e^{z\xi} + D e^{z\gamma} \quad (5a)$$

$$\overset{0}{S}(\xi, z, s) = E e^{-z\xi} + F e^{z\xi} \quad (5b)$$

其中, $\gamma = \sqrt{\xi^2 + s/c}$, s 和 ξ 分别为Laplace和Hankel变换参数。由式 (5a)、(5b) 结合McNamee等^[21], 可得到变换域内以 A, B, C, D, E, F 为未知数的中的位移和应力表达式。

圆形荷载 Q_0 作用于半空间土体内, 将半空间以荷载作用面分为作用面以上的区域 D_u 和作用面以下的区域 D_d , 如图2所示。对于 D_d 而言, 无穷远处的应力、位移有界, $\overset{0}{E}(\xi, z, s)$ 和 $\overset{0}{S}(\xi, z, s)$ 中只有3个未知数 A_d, B_d 和 E_d 。因此, 总共有 $A_u, B_u, C_u, D_u, E_u, F_u, A_d, B_d$ 和 E_d 等9个未知数。

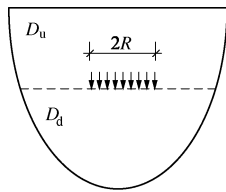


图2 荷载作用分界面

Fig. 2 Upper and lower domains divided by loading

由半空间表面透水且不受外力作用的边界条件:

$$\overset{0}{\sigma}_{zzu}(r, 0) = 0 \quad (6a)$$

$$\overset{1}{\sigma}_{zru}(r, 0) = 0 \quad (6b)$$

$$\overset{0}{P}_u(r, 0) = 0 \quad (6c)$$

以及荷载作用处 ($z = \zeta$) 6个连续性条件:

$$\overset{0}{u}_{zu}(r, \zeta) = \overset{0}{u}_{zl}(r, \zeta) \quad (7a)$$

$$\overset{1}{u}_{ru}(r, \zeta) = \overset{1}{u}_{rl}(r, \zeta) \quad (7b)$$

$$\overset{1}{\sigma}_{zru}(r, \zeta) = \overset{1}{\sigma}_{zrl}(r, \zeta) \quad (7c)$$

$$\overset{0}{P}_u(r, \zeta) = \overset{0}{P}_l(r, \zeta) \quad (7d)$$

$$\left(\frac{\partial \overset{0}{P}_u(r, z)}{\partial z} \right)_{z=\zeta} = \left(\frac{\partial \overset{0}{P}_l(r, z)}{\partial z} \right)_{z=\zeta} \quad (7e)$$

$$\overset{0}{\sigma}_{zzu} - \overset{0}{\sigma}_{zzl} = -RJ_1(\xi R)/(s\xi\pi R^2) \quad (r \leq R), \quad (7f)$$

可求解9个未知数。当圆形荷载 Q_0 作用于半空间土体表面时, 只有 A_d, B_d 和 E_d 三个未知数, 利用边界条件:

$$\overset{0}{\sigma}_{zzu}(r, 0) = -Q_0 RJ_1(\xi R)/(s\xi\pi R^2) \quad (8a)$$

$$\overset{1}{\sigma}_{zru}(r, 0) = 0 \quad (8b)$$

$$\overset{0}{P}_u(r, 0) = 0 \quad (8c)$$

即可得到解答。

1.2 Fredholm 积分方程的建立

由虚拟桩 P_1 与扩展土之间应变协调, 即 $\varepsilon_{p1}^*(z) = \varepsilon_1^*(z)$, 可得

$$\varepsilon_{p1}^*(z) = \varepsilon_1^*(z) = [N_0 + N_1^*(0)]\hat{\varepsilon}_{11}(0, z) - N_1^*(L_1)\hat{\varepsilon}_{11}(L_1, z) - \int_0^{L_1} q_1(\zeta)\hat{\varepsilon}_{11}(\zeta, z)d\zeta + [N_0 + N_2^*(0)]\hat{\varepsilon}_{21}(0, z) - N_2^*(L_2)\hat{\varepsilon}_{21}(L_2, z) - \int_0^{L_2} q_2(\zeta)\hat{\varepsilon}_{21}(\zeta, z)d\zeta \quad (9)$$

式中, z 和 ζ 分别为计算点和荷载作用点; $\varepsilon_1^*(z)$ 为半空间土在桩 P_1 深度为 z 处的应变; $\hat{\varepsilon}_{11}(\zeta, z)$ 和 $\hat{\varepsilon}_{21}(\zeta, z)$ 分别为 $\Pi_{\xi, 1}$ 和 $\Pi_{\xi, 2}$ 上的单位竖直均布力引起截面 $\Pi_{z, 1}$ 的应变。

将式 (1) 代入式 (9), 式 (9) 为弱奇异性的第二类 Fredholm 积分方程; 将第 $i(i=1, 2)$ 根桩等分为 n_i 段, 每段长度 L_i/n_i , 则共有 n_i+1 个待求解量 $N_i^*(z_j)$ ($z_j=(j-1)L_i/n_i, j=1, 2, \dots, n_i+1$); 在每段等分的长度内虚拟桩轴力 $N_i^*(z)$ 假定为平均值, 计算点与荷载作用点重合处有应变突变 $\hat{\varepsilon}_{11}(z^+, z) - \hat{\varepsilon}_{11}(z^-, z) = -\frac{(1-2\nu_s)(1+\nu_s)}{E_s A_p(1-\nu_s)}$, 则式 (9) 可表示为

$$\sum_{j=1}^{n_1} \frac{N_1^*(\zeta_j) + N_1^*(\zeta_{j+1})}{2} \cdot [\hat{\varepsilon}_{11}(\zeta_{j+1}, z) - \hat{\varepsilon}_{11}(\zeta_j, z)] + \sum_{j=1}^{n_2} \frac{N_2^*(\zeta_j) + N_2^*(\zeta_{j+1})}{2} [\hat{\varepsilon}_{21}(\zeta_{j+1}, z) - \hat{\varepsilon}_{21}(\zeta_j, z)] = N_0 [\hat{\varepsilon}_{11}(0, z) + \hat{\varepsilon}_{21}(0, z)] - \left(\frac{1}{E_{ps} A_p} - \frac{(1-2\nu_s)(1+\nu_s)}{E_s A_p(1-\nu_s)} \right) N_1^*(z) \quad (10)$$

对于桩 P_1 而言, 沿桩身共有 n_1+1 个方程可以求出 n_1+1 个未知量 $N_1^*(z_i)$ 。由前面分析可得, 真实桩身轴力 $N(z)$ 为虚拟桩身轴力 $N_1^*(z)$ 与相应位置扩展土压应力 $N_s(z)$ 之和:

$$N(z) = N_1^*(z) + N_s(z) \quad (11)$$

其中, 桩 P_1 区域内扩展土压应力 $N_s(z)$ 可根据 $N_1^*(z_i)$ 求解:

$$N_s(z) = -N_1^*(L_1)\hat{f}_{11}(L_1, z) - N_2^*(L_2)\hat{f}_{21}(L_2, z) + [N_0 + N_1^*(0)]\hat{f}_{11}(0, z) + [N_0 + N_2^*(0)]\hat{f}_{21}(0, z) - \int_0^{L_1} q_1(\zeta, z)\hat{f}_{11}(\zeta, z)d\zeta - \int_0^{L_2} q_2(\zeta, z)\hat{f}_{21}(\zeta, z)d\zeta \quad (12)$$

式中, $\hat{f}_{11}(\zeta, z)$ 和 $\hat{f}_{21}(\zeta, z)$ 分别为 $\Pi_{\xi, 1}$ 和 $\Pi_{\xi, 2}$ 上的单位竖直均布力引起截面 $\Pi_{z, 1}$ 的应力。

将所得 $N_1^*(z_i)$ 代入式 (11), 考虑计算点与荷载作用点重合时有应力突变 ($\hat{f}_{11}(z^+, z) - \hat{f}_{11}(z^-, z) = -1$), 即可得到真实桩身轴力。

同理可得, 沿桩身位移为

$$w_1(z) = -N_1^*(L_1)\hat{w}_{11}(L_2, z) - N_2^*(L_2)\hat{w}_{21}(L_2, z) + [N_0 + N_1^*(0)]\hat{w}_{11}(0, z) + [N_0 + N_2^*(0)]\hat{w}_{21}(0, z) - \int_0^{L_1} q_1(\zeta, z)\hat{w}_{11}(\zeta, z)d\zeta - \int_0^{L_2} q_2(\zeta, z)\hat{w}_{21}(\zeta, z)d\zeta. \quad (13)$$

式中, $\hat{w}_{11}(\zeta, z)$ 和 $\hat{w}_{21}(\zeta, z)$ 分别为 $\Pi_{\xi, 1}$ 和 $\Pi_{\xi, 2}$ 上的单位竖直均布力引起截面 $\Pi_{z, 1}$ 的位移。

2 等桩长的相互作用分析

2.1 两桩相互作用分析

Niumpradit 等^[22]给出了单桩在均质饱和土中的轴力分布特性, 其中桩径比 $L/d=50$, 桩土刚度比 $E_p/E_s=1000$, 固结状态分别为 $t=1$ s ($\lg t=0$) 和 $t=1 \times 10^9$ s ($\lg t=9$)。图 3 表明, 本文方法所得的单桩计算结果与文献^[22]基本一致, 验证了本文方法的正确性。

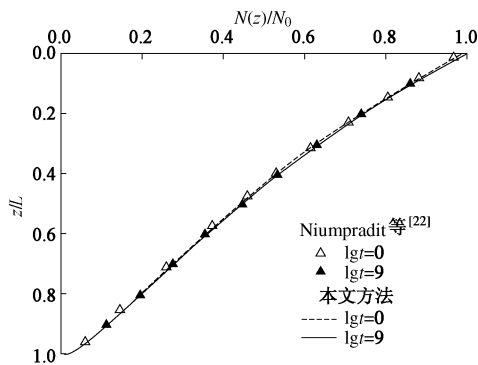


图 3 固结作用下单桩轴力分布

Fig. 3 Behaviors of axial force along a single pile considering consolidation

将单桩结果扩展至相同两桩分析中, 选择桩间距 s/d 分别为 1 和 20。如图 4 所示, 由于邻近桩的存在, 桩身附加轴力主要集中在桩身深度的 20%~80% 处, 这与韩焯等^[23]通过数值模拟得到的结论基本相同。桩身附加轴力随着桩间距 (s/d) 的增大而减小。

2.2 群桩相互作用分析

实际工程中群桩基础所包含的桩数要多于 2 根, 因此, 有必要将两桩分析扩展至多桩分析。假定群桩承台为刚性板, 各桩桩顶位移相同, 承台与土体脱空。引入各桩桩顶位移相同和桩顶反力之和等于外荷载的边界条件, 计算时考虑各桩的相互作用^[24], 群桩系统

的计算方程为

$$\varepsilon_{pi}^*(z) = \varepsilon_i^*(z) = \sum_{k=1}^n \{ [N_{k0} + N_k^*(0)] \hat{\varepsilon}_{ki}(0, z) - N_k^*(L_k) \hat{\varepsilon}_{ki}(L_k, z) - \int_0^{L_k} q_k(\zeta) \hat{\varepsilon}_{ki}(\zeta, z) d\zeta \}, \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \frac{N_k^*(\zeta_j) + N_k^*(\zeta_{j+1})}{2} \cdot [\hat{\varepsilon}_{ki}(\zeta_{j+1}, z) - \hat{\varepsilon}_{ki}(\zeta_j, z)] = \sum_{k=1}^n N_{k0} \hat{\varepsilon}_{ki}(0, z) - \left(\frac{1}{E_p A_p} - \frac{(1-2\nu_s)(1+\nu_s)}{E_s A_p (1-\nu_s)} \right) N_i^*(z), \quad (15)$$

$$w_i(z) = \sum_{k=1}^n \{ -N_k^*(L_k) \hat{w}_{ki}(L_k, z) + [N_{k0} + N_k^*(0)] \hat{w}_{ki}(0, z) - \int_0^{L_k} q_k(\zeta, z) \hat{w}_{ki}(\zeta, z) d\zeta \}. \quad (16)$$

按照文献^[24]的求解方法, 即可得到各桩的位移、桩身轴力分布等主要特性。

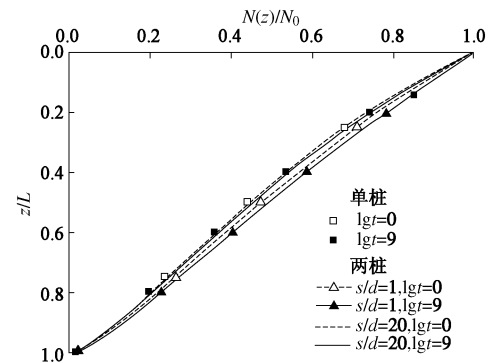


图 4 固结作用下等长两桩附加轴力

Fig. 4 Behaviors of additional force in two-piles system considering consolidation

Kuwabara^[25]曾进行过均质土中的 3×3 刚性承台群桩分析, 桩土刚度比 $E_p/E_s=1000$, 泊松比为 0.5, 并指出了不同位置的桩顶承担着差异荷载。本文中选取了相同桩土参数进行计算对比, 将不同位置的桩分为桩 P_1 、桩 P_2 和桩 P_3 (如图 5 (a)), 并选取土体渗透系数为 1×10^{-8} m/s。给定群桩尺寸 ($L/d=25$) 和桩的布置 ($s/d=5$), 本文的沿桩身轴力分布情况计算结果与 Kuwabara^[25]基本相同, 群桩效应导致的角桩承担的荷载要大于中心桩。

在参数分析时, 如长径比和桩间距, 一方面, 在图 5 (b) 中, 给定桩间距 ($s/d=5$) 的条件下, 桩顶荷载分布 (PPL: percentage of pile-head loading) 随长径比的变化规律与 Kuwabara^[25]的结果基本一致, 其中桩 3 所承担的荷载在固结后有一定的提高。另一方面, 在图 5 (c) 中, 在给定桩的长径比的条件下, 除了在桩间距 $s/d < 5$ 时有一些差别外, 本文计算结果与 Kuwabara^[25]基本一致。

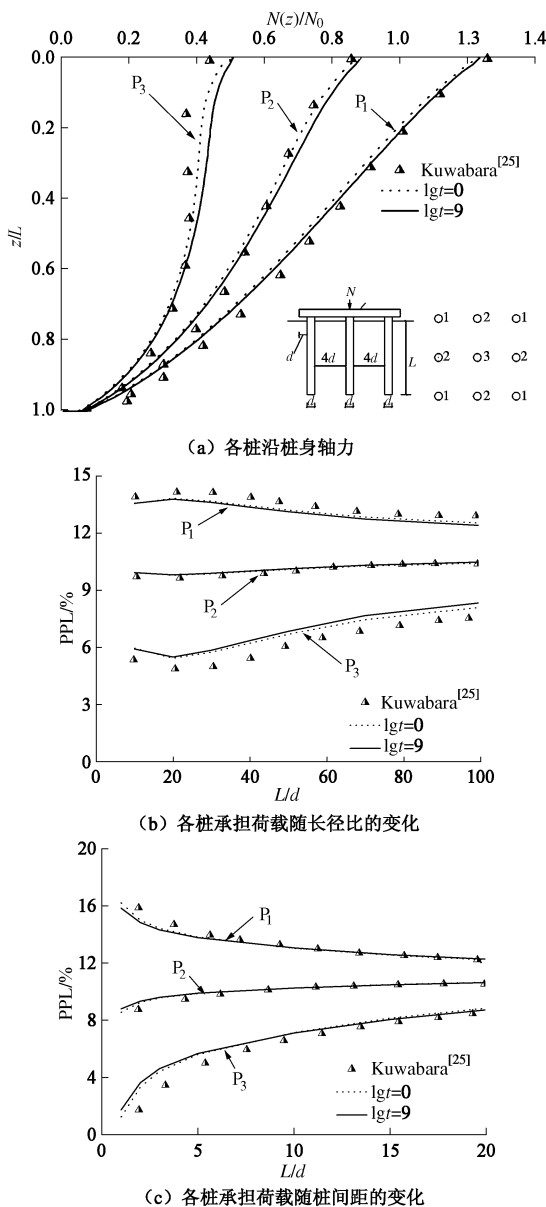


图 5 固结作用下 3×3 群桩各桩轴力对比

Fig. 5 Behaviors of axial force of individual pile in 3×3 pile groups considering consolidating effect

图 6 表示的是 5×5 群桩桩顶荷载随长径比的变化情况, 桩身尺寸为 $s/d=5$, 泊松比为 0.4, 渗透系数为 1×10^{-8} m/s。可以看出, 角桩 (桩 P_1) 与中心桩 (桩 P_6) 所承担的荷载之比甚至可达 4.5 (长径比为 25 时)。与此同时, 固结后角桩 (桩 P_1) 承担荷载有所下降, 而中心桩 (桩 $P_4 \sim P_6$) 所承担荷载则有一定的增加, 群桩效应明显^[19], 固结效应对桩身受力的作用有一定的体现。但从总体而言, 桩顶不均匀荷载在由等长桩组成的群桩基础中较为明显, 造成中心桩承载力利用效率不高。

3 不等桩长的相互作用分析

从前面分析可知, 群桩效应和固结效应随着群桩

基础内桩数的增加而变得明显。由于桩顶荷载分布不均, 承台截面容易产生弯矩扭转甚至冲切破坏。为使得桩顶荷载分布趋于平均, 减小内力不均带来的承台结构破坏, 提高结构经济合理性, 有必要对桩的尺寸和布置设计进行优化。常规的桩基优化包括调整各个位置桩的长度, 调整桩的位置分布, 在桩顶与桩帽直接设置垫层等方法。在本文中采取调整桩的长度来进行群桩优化分析。

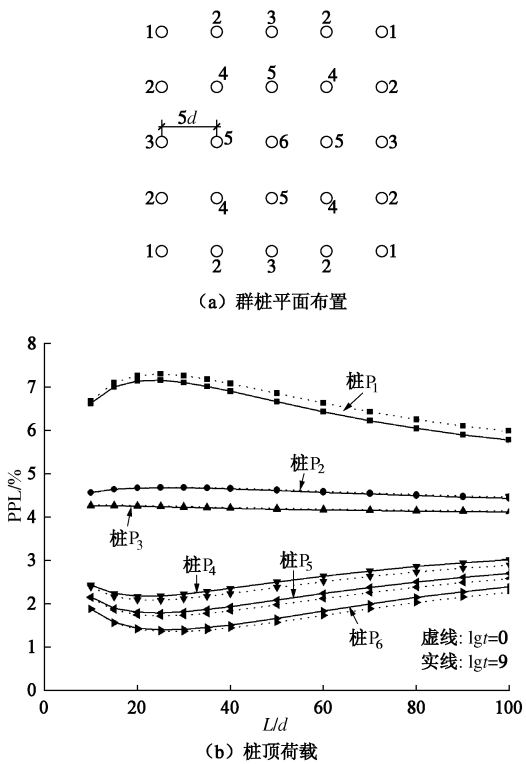
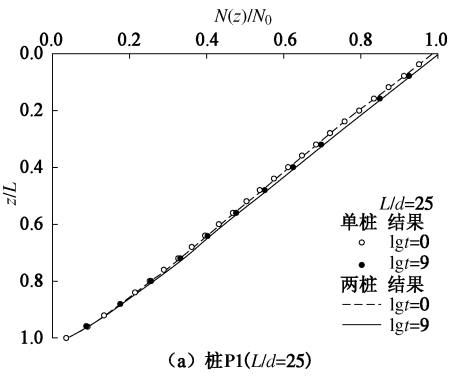


图 6 固结作用下 5×5 群桩各桩桩顶荷载对比

Fig. 6 Axial force at pile-heads in 5×5 pile groups considering consolidating effect

假定桩 P_1 和 P_2 的桩长之比 1:2, 并假定 P_2 的长径比为 50。两桩的桩土刚度比均为 1000, 桩间距 $s/d=5$, 土体泊松比为 0.3, 土体渗透系数为 1×10^{-8} m/s, 两桩桩顶承受相同荷载作用, 其桩身轴力分布与单桩计算结果对比如图 7 (a)、7 (b)。



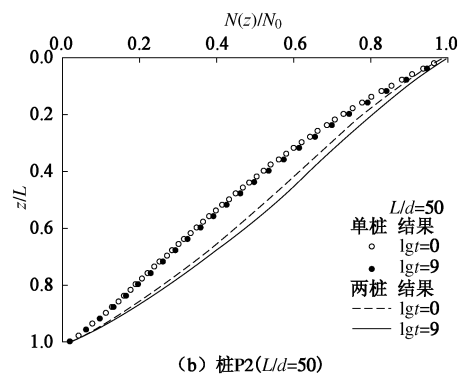


图 7 固结作用下不等长两桩桩顶受力的附加轴力

Fig. 7 Behaviors of additional force in two-piles system with different pile lengths

与单桩对比, 相同长度的 P_2 桩桩身附加应力的增加较为明显, 而短桩 P_1 的附加应力增加不明显。另一方面, 固结效应对长短桩的影响呈现一定的差异性, 长桩固结后桩身轴力分布调整较短桩明显。

Wong 等^[26]曾对不等长两桩的相互作用系数进行研究, 并假定仅有一桩受外荷载作用, 桩、土弹性模量分别为 30 GPa 和 4 MPa, 桩的直径为 0.3 m, 桩型规格分别为 15, 25, 35, 50 m, 土体泊松比为 0.35。在本文中, 土体渗透系数为 1×10^{-8} m/s, 其它参数同文献^[26], 选取受荷桩为 P_1 桩, P_1 对 P_2 桩的位移影响系数用 α_{21} 来表示, 定义如文献^[26, 27], 其对比结果如图 8, 9 所示。从图 8, 9 可看出, 本文与 Wong 等^[26]结果基本一致, 作用系数随桩间距的增大而减小。对于短桩受力情况, P_2 桩桩长的增加能够有效得降低短桩对其影响系数; 另一方面, 增加受力长桩的桩长可增大其对短桩的作用系数。

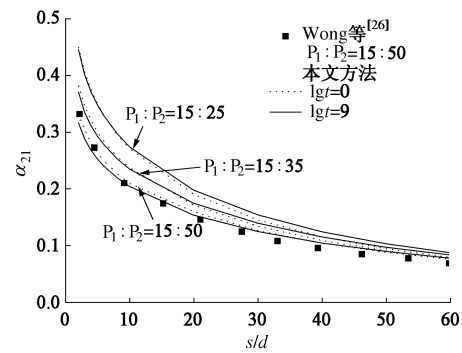


图 8 固结作用下短桩受力的两桩影响系数对比

Fig. 8 Interaction factor in two-pile system with short pile loaded

4 群桩基础优化分析

假定优化前各桩的长度一致, 长径比为 25, 桩间距 $s/d=5$, 桩的布置如图 6 (a) 所示, 桩土刚度比为 1000, 刚性承台上作用均布荷载 1000 kN, 土体泊松

比选取为 0.3。将桩在体优化后各桩的长度如表 1 所示, 桩顶承担荷载比例和桩顶位移如表 2 所示。

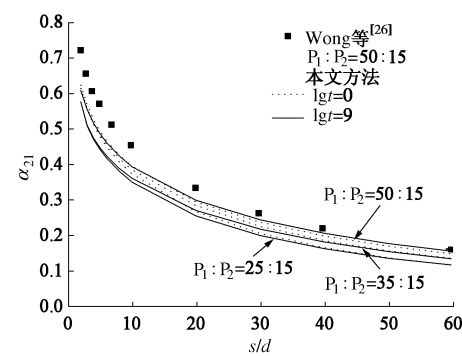


图 9 固结作用下长桩受力的两桩影响系数对比

Fig. 9 Interaction factor in two-pile system with long pile loaded

表 1 群桩优化前后各桩桩长对比

Table 1 Comparison of pile lengths (m)

	桩 P ₁	桩 P ₂	桩 P ₃	桩 P ₄	桩 P ₅	桩 P ₆	总桩长
优化前	25	25	25	25	25	25	625
优化后	11	19	21	34	39	44	616

表 2 群桩优化前后桩顶荷载分布和桩顶位移对比

Table 2 Comparison of PPL and pile-head settlements

	固结 状态	P ₁ /%	P ₂ /%	P ₃ /%	P ₄ /%	P ₅ /%	P ₆ /%	桩顶位 移/mm
优化 前	lgf=0	7.45	4.69	4.26	1.97	1.62	1.28	3.36
	lgf=9	7.29	4.69	4.22	2.10	1.69	1.29	4.27
优化 后	lgf=0	4.03	4.08	3.96	3.92	3.96	3.90	3.40
	lgf=9	3.48	3.83	3.74	4.42	4.53	4.57	4.23

通过对比, 优化桩基后可有效地避免各桩桩顶荷载分布过于不均的情况。这主要通过减小角桩和边桩的桩长以及增大内部桩的桩长来实现, 这与 Leung 等^[28]提出的 5×5 群桩优化策略一致。在优化过程中, 在桩身材料不变的条件下, 通过长短桩组合设计, 优化前后保持总桩长基本相同, 桩顶位移基本一致, 在保证经济性和沉降稳定性的前提下减少了不均匀桩顶荷载, 改善了桩基的受力性能^[7]。需要说明的是, 土体固结导致内部桩受力增加, 角桩和边桩荷载减小。

5 结 语

本文从群桩效应和固结效应研究出发, 以两桩分析为对象, 通过将桩土体系分解成半空间饱和扩展土和两根虚拟桩, 基于虚拟桩和饱和土之间的竖向应变协调关系建立第二类 Fredholm 积分方程, 求解出不同固结状态下的桩身应力分布。在两桩桩顶承受荷载相同的情况下, 分为等桩长和不等桩长两种情况分析, 分别研究不同桩长条件下桩身附加轴力分布的特性。

研究表明, 在等桩长桩基中, 固结效应对桩身轴

力分布有一定的影响, 具体表现为: ①桩顶受力在固结后呈现出角桩承担荷载减小, 中心桩承担荷载增加的特点; ②固结后桩身轴力分布有一定的变化。在不等桩长分析中, 长短桩的相互作用效果不一致, 表现出长桩附加轴力变化更为明显。将长短桩分析应用于群桩优化, 通过增加中心桩的长度和缩减边角桩的长度, 可以在保证总桩长和桩基沉降相当的情况下, 桩基的受力趋于合理。

参考文献:

- [1] POULOS H G. Pile behaviour — theory and application[J]. *Géotechnique*, 1989, **39**(3): 365 – 415.
- [2] GUO W D. Theory and practice of pile foundations[M]. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [3] POULOS H G. Analysis of the settlement of pile group[J]. *Géotechnique*, 1968, **18**(4): 449 – 471.
- [4] MYLONAKIS G, GAZETAS G. Settlement and additional internal force of group piles in layered soil[J]. *Géotechnique*, 1998, **48**(1): 55 – 72.
- [5] CHOW Y K. Analysis of vertically loaded pile groups[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1986, **10**(1): 59 – 72.
- [6] SOUTHCOTT PH, SMALL JC. Finite layer analysis of vertically loaded piles and pile groups[J]. *Computers and Geotechnics*, 1996, **18**(1): 47 – 63.
- [7] LIANG F Y, CHEN L Z, HAN J. Integral equation method for analysis of piled rafts with dissimilar piles under vertical loading[J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, **36**(3): 419 – 426.
- [8] CHEN SL, SONG CY, and CHEN LZ. Two-pile interaction factor revisited [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, **48**(5): 754 – 766.
- [9] POULOS H G, DAVID E H. Pile foundation analysis and design[M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [10] WONG S C, POULOS H G. Approximate pile-to-pile interaction factors between two dissimilar piles[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, **32**(8): 613 – 618.
- [11] ZHANG Q Q, ZHANG Z M. Study on interaction between dissimilar piles in layered soils[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2011, **35**: 67 – 81.
- [12] 王建华, 陆建飞, 沈为平. Biot 固结理论在单桩负摩擦研究中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2000, **22**(5): 590 – 593. (WANG Jian-hua, LU Jian-fei, SHEN Wei-ping. The application of Biot consolidation theory to the negative friction problem of single pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, **22**(5): 590 – 593. (in Chinese))
- [13] 陆建飞, 王建华, 沈为平. 考虑固结和流变的群桩的积分方程解法[J]. *岩土工程学报*, 2000, **22**(6): 650 – 653. (LU Jian-fei, WANG Jian-hua, SHEN Wei-ping. The integral equation method to solve pile group problem considering consolidation and rheology of soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, **22**(6): 650 – 653. (in Chinese))
- [14] 程泽海, 凌道盛, 陈云敏. 桩筏基础在竖向荷载作用下的时间效应[J]. *土木工程学报*, 2004, **37**(2): 73 – 77. (CHENG Ze-hai, LING Dao-sheng, CHEN Yun-min. Time effects on piled raft foundation under vertical loading[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, **37**(2): 73 – 77. (in Chinese))
- [15] 崔春义, 栾茂田, 杨 庆. 结构 - 桩筏 - 地基体系时间效应的三维数值分析[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(8): 1244 – 1250. (CUI Chun-yi, LUAN Mao-tian, YANG Qing. 3D numerical analysis of time effect of superstructure-piled raft-foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(8): 1244 – 1250. (in Chinese))
- [16] 梅国雄, 宰金珉. 固结有限层理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min. Theory and application of consolidation finite layer[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [17] 梁发云, 陈龙珠, 李镜培. 层状地基中混合桩型复合地基的分析方法[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(3): 380 – 384. (LIANG Fa-yun, CHEN Long-zhu, LI Jing-pei. Study on the behavior of composite foundation with hybrid piles in layered soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(3): 380 – 384. (in Chinese))
- [18] 梁发云, 陈龙珠, 李镜培. 混合桩型复合地基工程性状的近似解析方法[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(4): 459 – 463. (LIANG Fa-yun, CHEN Long-zhu, LI Jing-pei. An approximate approach for the analysis of composite foundation with hybrid piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(4): 459 – 463. (in Chinese))
- [19] LIANG F Y, SONG Z, GUO W D. Group interaction on vertically loaded piles in saturated poroelastic soil[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, **56**: 1 – 10. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.10.003>)
- [20] MUKI R, STERNBERG E. Elastostatic load-transfer to a

- half-space from a partially embedded axially loaded road[J]. International Journal of Solids and Structures, 1970, 6(1): 69 - 90.
- [21] MCNAMEE J, GIBSON R E. Displacement functions and linear transforms applied to diffusion through porous elastic media[J]. Quarterly Journal of Mechanics & Applied Mathematics, 1960, 13(1): 98 - 111.
- [22] NIUMPRADIT B, KARASUDHI P. Load transfer from an elastic pile to saturated porous elastic soil[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1981, 5(2): 115 - 138.
- [23] 韩 焯, 李 宁. 复合地基中群桩相互作用机理的数值试验研究[J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 75 - 80. (HAN Xuan, LI Ning. Numerical simulation test on interaction mechanism of group pile composite foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(4): 75 - 80. (in Chinese))
- [24] 陈龙珠, 梁发云. 桩筏基础的积分方程解法及其参数分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 733 - 738. (CHEN Long-zhu, LIANG Fa-yun. An integral equation approach and parametric analysis for piled raft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 733 - 738. (in Chinese))
- [25] KUWABARA F. An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil[J]. Soils and Foundations, 1989, 29(1): 82 - 92.
- [26] WONG S C, POULOS H G. Approximate pile-to-pile interaction factors between two dissimilar piles[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(8): 613 - 618.
- [27] CLANCY P, RANDOLPH M F. An approximate analysis procedure for piled raft foundations[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1993, 17(12): 849 - 869.
- [28] LEUNG Y F, KLAR A, SOGA K. Theoretical study on pile length optimization of pile groups and piled rafts[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, 2010, 136(2): 319 - 330.

第二届全国岩土本构理论研讨会 第二号通知

2008年11月中国力学学会岩土力学专业委员会和中国土木工程学会土力学及岩土工程分会联合在北京召开了第一届全国岩土本构理论研讨会,有力地推动了我国的岩土材料本构理论的研究。中国土木工程学会于2010年12月批准成立了“土的本构关系及强度理论专业委员会”,2011年8月“专业委员会”在兰州召开了第一次工作会议,2013年5月在桂林理工大学召开专业委员会主任副主任学术交流会。鉴于第一届全国岩土本构理论研讨会已有五年和近年我国不少学者在岩土材料的本构理论及其应用方面有许多创新性研究成果,专业委员会决定于2014年5月在上海大学召开第二届全国岩土本构理论研讨会。研讨会将注重“研讨”,计划在每场报告后留有较多的时间用于讨论和互动。

主办单位:中国土木工程学会土力学及岩土工程分会土的本构关系及强度理论。

专业委员会:中国力学学会岩土力学专业委员会

承办单位:上海大学;协办单位:同济大学;上海交通大学;北京航空航天大学;北京工业大学;上海理工大学;上海市土木工程学会;河海大学文天学院岩土工程技术研发中心。

大会议题:岩土材料的本构理论及其应用;岩土材料的力学特性测试技术与方法;岩土材料的力学特性;非饱和土的水力-力学特性及其本构模型;土力学的其他问题。

大会报告:院士报告,邀请报告;邀请国内外著名专家作岩土本构学术报告。

会议时间和地点:会议时间:2014年5月23日~25日,会议地点:上海大学宝山校区新乐乎楼(上海市宝山区锦秋路716号)。

会议日程安排:5月23日全天报到、注册,晚上土的本构关系及强度专业委员会会议;5月24日上午开幕式、大会报告,下午大会报告及分组报告,晚宴;5月25日上午大会报告,下午大会报告及分组报告、闭幕式。

会议注册费:正式代表:1000元/人,学生代表:600元/人。

大会秘书处:秘书处联系方式:孙文静,021 56331676,18049963719,秦爱芳,13701657961, E-mail: wjsun@shu.edu.cn (孙文静), qinaifang@shu.edu.cn (秦爱芳);通讯地址:上海市闸北区延长路149号上海大学土木工程系,邮政邮编:200072。

(大会组委会 供稿)