

文章编号: 1000-7598 (2014) 增 1-221-06

考虑加筋与遮帘效应计算群桩沉降的 相互作用系数法

林智勇^{1,2}, 戴自航^{1,3}

(1. 福州大学 岩土工程研究所, 福州 350108; 2. 福建工程学院 土木工程学院, 福州 350108;
3. 卧龙岗大学 土木、采矿与环境工程学院, 新南威尔士州, 澳大利亚 2522)

摘 要: 群桩中各基桩在地基土中的加筋与遮帘效应是客观存在的, 然而, 在目前的桩基沉降理论与实践, 相关的研究仍显不足。基于剪切变形法理论, 考虑桩的加筋与遮帘效应, 求得各基桩在自身桩顶荷载作用下产生的沉降以及其引起相邻桩的附加沉降量, 由此提出群桩中任两桩的相互作用系数简化公式, 同时, 也得到各基桩桩侧及桩端桩-土接触等效弹簧刚度, 并基于荷载传递法原理, 建立了成层地基条件下各基桩在自身桩顶荷载作用下的桩身位移平衡方程, 推导出各土层层顶处桩身沉降、轴力与层底处桩身沉降、轴力之间的递推关系, 进而将公式推广到高、低承台群桩基础计算中。工程算例分析表明, 用该方法计算有较高的精度, 求得的荷载-沉降曲线及两桩相互作用系数与实测值吻合较好; 相互作用系数要明显小于弹性理论计算结果。

关 键 词: 加筋与遮帘效应; 相互作用系数; 群桩沉降; 剪切变形法; 成层地基
中图分类号: TU473 **文献标识码:** A

Interaction coefficients method for calculating piles group settlements considering reinforcing and restraining effect

LIN Zhi-yong^{1,2}, DAI Zi-hang^{1,3}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China; 3. School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, New South Wales 2522, Australia)

Abstract: The reinforcing and restraining effect of piles embedded in soils is objective existence. However, the correlative research work on pile groups settlement methods is not deep enough and needs to be continued. Based on the shear displacement method, considering the reinforcing and restraining effect, the settlements of the analyzing pile caused by loads on the pile top were calculated, including the reduction effect caused by the existence of the other adjacent piles. And the additional settlements of the adjacent piles arising from the settlement of the loaded pile were obtained as well. Thus a simplified formula of interaction coefficients between any two piles was presented. Meanwhile, the equivalent shear stiffness coefficients of soil around each pile were developed; and an equation of displacements caused by load on top of the analyzing pile imbedded in multi-layered soils was built; so recurrence relations of settlement and axial force of pile shaft between upper and lower of each pile sections were respectively deduced; in the process of deduction, Boussinesq solution was modified to include the effect of different embedded depths, and then used to derive the equivalent stiffness coefficients of the soil under the pile tips. Lastly, the formula was extended to the settlements calculation of high and low cap pile groups. Different methods were compared with two engineering cases. The results show that the load-settlement curve computed by present method agreed well with those measured from real engineering cases; and the calculating interaction coefficients are much less than ones calculated by the elastic theory method.

Key words: reinforcing and restraining effect; interaction coefficient; pile group settlement; shear displacement method; multi-layered soils

1 引 言

群桩基础的沉降计算是一个非常复杂的问题,

受到土体性质、桩长、桩径、桩间距、桩的布置方式以及上部结构的刚度等众多因素的影响。目前, 除了数值分析方法外, 其他方法如弹性理论法、荷

收稿日期: 2013-07-31

基金项目: 福建省自然科学基金资助(No.2011J01308)。

第一作者简介: 林智勇, 男, 1982 年生, 博士研究生, 讲师, 主要从事桩基理论计算与数值分析的研究与教学工作。E-mail: l-sir@139.com

通讯作者: 戴自航, 男, 1966 年生, 博士后, 教授, 博士生导师, 从事边坡稳定分析、建筑基础、基坑支护等教学与研究工作。E-mail: Mr.dai@163.com

载传递法、剪切变形法、等代墩基法等均未能涵盖上述各种因素^[1-2]。数值分析法因建模复杂,岩土本构的合理确定困难,计算参数多,计算量大,难以在实际工程中得到广泛应用。因此,出现了众多的简化分析法,其中以 Poulos 相互作用系数法最为典型^[3]。该法基于单桩弹性理论法,考虑几何尺寸、材料和受荷条件完全相同的两桩,引入两桩相互作用系数 α_{ij} 的概念来表征两桩之间的相互影响,并利用叠加原理将其推广至群桩计算。这个概念被后来的许多分析方法所采用^[4-8]。

两桩相互作用系数 α_{ij} 的定义为

$$\alpha_{ij} = \frac{\text{由 } j \text{ 桩作用单位荷载对 } i \text{ 桩引起的沉降}}{\text{由 } i \text{ 桩作用单位荷载对自身引起的沉降}} \quad (1)$$

利用式(1)求解时,只是简单地将两桩的变形叠加至群桩中,认为桩侧土体的位移是自由的,即未考虑桩体本身的存在对地基土位移传递的折减限制作用,忽略了桩群在地基土中的加筋与遮帘效应,夸大了桩间的相互作用,以致计算结果偏大^[1-2],大量的现场测试及有限元分析结果均反映出该现象^[9-10],因此,两桩相互作用系数的合理与否直接关系到群桩沉降计算的精度。Mylonakis^[11]最早根据剪切变形法原理^[7],提出了两桩间相互作用的新模型,将无荷桩的存在假定为弹性地基梁,受荷桩对该桩的作用视为对地基梁的激励,建立力学平衡方程,较系统地分析了桩的相互作用。闫纲丽等^[6]则进一步将受荷桩本身的存在对地基土变形的影响也考虑进来。WANG Zhongjin 等^[8]更进一步考虑了桩端间的相互影响,同时也考虑了桩侧土发生塑性变形的情况。

利用两桩相互作用系数 α_{ij} 公式求解时,对于某根分析桩来说,只考虑了邻桩的存在对其沉降的折减(即加筋与遮帘效应)。事实上,该桩应是同时受到影响范围内其他所有基桩的存在所带来的综合影响,且该影响应随着其平面所处位置而异,同时该公式的计算仅在地基中只有该两根桩下才合理、适用。显然,实际群桩中如果两桩连线中间还有其他桩甚至多根桩时,该相互作用应该减弱甚至消失,这一点在众多理论计算中均未被加以考虑,实际群桩的任意两桩相互作用系数应进一步减小。对此,赵明华等^[12]直接考虑群桩中所有基桩的存在对分析桩的影响,并引入 Mylonakis^[11]的两桩相互作用模型采用类似分析方法,求出了均质土中沉降计算公式。戚科骏等^[9]采用考虑土体弹塑性特征和桩土界面接触的三维有限元方法计算相互作用系数,应用

至高承台群桩沉降计算中。

本文以剪切变形法为基础,先计算群桩中各基桩在自身桩顶荷载下的沉降,包括该桩受到其他各基桩在无荷下的存在对其的沉降折减以及其引起的邻桩的附加沉降,由此定义新的桩间相互作用系数。与此同时,建立各基桩在自身桩顶荷载下桩身力学平衡方程,导出桩顶沉降、轴力和桩底沉降、轴力的递推关系,从而求解群桩沉降。

2 分析模型的建立

群桩基础由 N 根基桩组成,各基桩的尺寸、材料均相同。先考察任意两根基桩 i 桩、 j 桩之间的加筋与遮帘效应,如图1所示。图中, k_{zii} 为 i 桩 z 深度处抗侧土弹簧刚度; k_b 为桩端土弹簧刚度; s_a 为桩间距。 j 桩的桩顶荷载为 Q_j (Q_j), 则 i 桩的沉降 s_i 可以分为三部分: (1) i 桩在 Q_i 作用下在自由位移场内产生的沉降 s_{i0} ; (2) j 桩在桩顶无受荷载作用下,其存在阻碍了土的自由变形,引起邻桩 i 桩沉降的折减 Δs_{i0} , 即为桩的加筋与遮帘效应; (3) j 桩在 Q_j 作用下引起邻桩 i 桩的附加沉降 s_{ij} , 其中前两部分沉降可以合并起来一起考虑,记为 s_{ii} 。

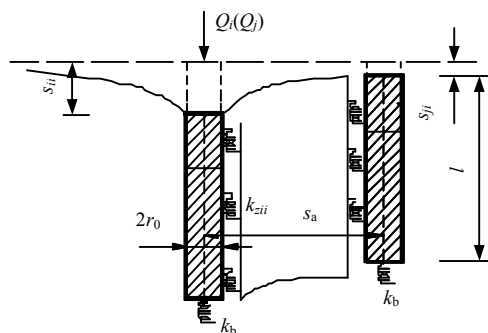


图1 群桩沉降计算模型

Fig.1 Settlement calculation model of pile groups

2.1 桩间相互作用系数推导

i 桩在桩顶荷载 Q_i 作用下,在深度 z 处的侧摩阻力为 q_{si} ,根据剪切变形法原理^[1,7],其引起桩周土产生剪切变形,在 i 、 j 桩侧处的沉降分别为

$$s_{i0} = \frac{q_{si} r_0}{G_z} \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right) \quad (2)$$

$$s_{ji0} = \frac{q_{sj} r_0}{G_z} \ln \left(\frac{r_m}{s_{ajj}} \right), \quad (r_0 < s_{ajj} < r_m) \quad (3)$$

式中: r_0 为桩半径; s_{ajj} 为 i 桩和 j 桩的桩间距; G_z 为 z 深度处土的剪切模量, $G_z = E_0 / 2(1 + \mu)$; E_0 为土的弹性模量,计算时可按变形模量计算,即

$E_0=(1+\mu)(1-2\mu)/(1-\mu)E_s$ 计算, μ 为泊松比, E_s 为压缩模量; r_m 为桩侧土体剪切变形最大影响半径, 可按实测经验^[7,10]取为 $(12\sim 24)r_0$, 或按 Randolph^[4]建议公式取值, $r_m=2.5l\rho_m(1-\mu)$, l 为桩长, ρ_m 为不均匀系数, 对于均匀土, 取为 1.0, 对于剪切模量随深度线性增大的土, 取为 0.5。

同时, i 桩侧摩阻力 q_{si} 沿径向向外递减, 传递至 j 桩侧同一深度处为

$$q_{sji} = \frac{q_{si}r_0}{s_{aij}}, \quad (r_0 \leq s_{aij} \leq r_m) \quad (4)$$

由于 j 桩的存在, 阻止了桩周土的剪切变形, 故该侧摩阻力 q_{sji} 方向与桩周土剪切变形方向相反, 即其方向向下可以认为是负摩阻力作用。由于不考虑桩侧桩土的滑移, 该负摩阻力全部作用于 j 桩桩身。同样, 该负摩阻力反过来沿径向向外传递, 亦产生位移场, 其在 i 、 j 桩桩侧处的位移量分别为

$$\Delta s_{i0} = \frac{q_{sji}r_0}{G_z} \ln\left(\frac{r_m}{s_{aij}}\right), \quad (r_0 \leq s_{aij} \leq r_m) \quad (5)$$

$$\Delta s_{ji0} = \frac{q_{sji}r_0}{G_z} \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \quad (6)$$

式 (5)、(6) 位移方向均向上, 式 (5) 位移可认为是考虑 j 桩的加筋与遮帘效应后对 i 桩沉降的折减量, 则考虑 j 桩的存在后, i 桩在 z 深度处的沉降量为式 (2) 与式 (5) 的叠加, 当存在多根基桩的共同作用时, 有

$$s_{ii} = s_{i0} - \sum_{j=1, j \neq i}^N \Delta s_{i0} = \frac{q_{si}r_0}{G_z} \ln\left(\left(\frac{r_m}{r_0}\right) - \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{r_0}{s_{aij}} \ln\left(\frac{r_m}{s_{aij}}\right)\right) \quad (7)$$

式中: N 为有效计算桩数, 以沉降计算点为圆心; r_m 计算值为半径的水平面影响圆范围内的基桩数, 若计算点与 j 桩连线中间存在其他桩, 则不计 j 桩引起的折减。

同样, 可求得 j 桩侧由于 i 桩荷载引起的沉降, 为式 (3) 与式 (6) 的叠加, 有

$$s_{ji} = s_{ji0} - \Delta s_{ji0} = \frac{q_{si}r_0}{G_z} \ln\left(\frac{r_m}{s_{aij}}\right) - \frac{q_{sj}r_0}{G_z} \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) = \frac{q_{si}r_0}{G_z} \left(\ln\left(\frac{r_m}{s_{aij}}\right) - \frac{r_0}{s_{aij}} \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \right) \quad (8)$$

对于 j 桩, 同样有

$$\left. \begin{aligned} s_{jj} &= \frac{q_{sj}r_0}{G_z} \left(\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) - \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{r_0}{s_{aij}} \ln\left(\frac{r_m}{s_{aij}}\right) \right) \\ s_{ij} &= \frac{q_{sj}r_0}{G_z} \left(\ln\left(\frac{r_m}{s_{aij}}\right) - \frac{r_0}{s_{aij}} \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

故, 群桩中 i 桩的沉降量为

$$s_i = s_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N s_{ij} \quad (10)$$

参照式 (1), 定义新的桩间相互作用系数 α :

$$\alpha_{ij} = \frac{s_{ij}}{s_{jj}} = \frac{\ln\left(\frac{r_m}{s_{aij}}\right) - \frac{r_0}{s_{aij}} \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) - \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{r_0}{s_{aij}} \ln\left(\frac{r_m}{s_{aij}}\right)} \quad (11)$$

式 (10) 可以改写为

$$s_i = s_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_{ij} s_{jj} \quad (12)$$

即为考虑各桩的加筋与遮帘效应时的群桩沉降计算公式。可见, 与式 (1) 传统的两桩相互作用系数不同, 引入的新的相互作用系数, 考虑了群桩中各桩的相互综合影响, 且仅与桩的所处的平面位置及其本身几何尺寸有关, 与深度、土体性质无关, 求解方便, 可直接用于多层地基的情况。对于式 (12), 只需分别先求出第 i 根桩的沉降量 s_{ii} ($i=1, 2, \dots, N$)。

2.2 计算 s_{ii}

将式 (7) 改写, 并定义为 i 桩 z 深度处桩侧土弹簧刚度为

$$k_{zii} = 2\pi G_z \left/ \left(\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) - \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{r_0}{s_{aij}} \ln\left(\frac{r_m}{s_{aij}}\right) \right) \right. \quad (13)$$

由荷载传递法原理^[1-2], 可得桩身应变与轴力间的关系以及桩身单元的平衡方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{ds_{ii}(z)}{dz} &= -\frac{Q_i(z)}{A_p E_p} \\ \frac{dQ_i(z)}{dz} &= -uq_{si}(z) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: E_p 为桩身弹性模量; A_p 为桩身截面面积; u 为桩身周长。

桩身位移方程为

$$E_p A_p \frac{d^2 s_{ii}(z)}{dz^2} - k_{zii} s_{ii} = 0 \quad (15)$$

该方程的通解为

$$s_{ii}(z) = A e^{\lambda_{ii} z} + B e^{-\lambda_{ii} z} \quad (16)$$

式中: $\lambda_{ii} = \sqrt{k_{zii}/(E_p A_p)}$; A 、 B 为待定系数。

由式 (16) 代入式 (14) 得到桩身轴力方程:

$$Q_i(z) = -\lambda_{ii} A_p E_p (A e^{\lambda_{ii} z} - B e^{-\lambda_{ii} z}) \quad (17)$$

将式 (16)、(17) 合并写成矩阵形式, 可得 z 深度处的轴力和沉降矩阵:

$$\begin{bmatrix} s_{ii}(z) \\ Q_i(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{\lambda_{ii} z} & e^{-\lambda_{ii} z} \\ -A_p E_p \lambda_{ii} e^{\lambda_{ii} z} & A_p E_p \lambda_{ii} e^{-\lambda_{ii} z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \quad (18)$$

当存在成层地基时,若桩长范围内有 n 层地基土,则将桩按土层厚分成 n 段。下面讨论第 m 段桩身(长度为 l_m)情况。

第 m 段桩桩顶:

$$\begin{bmatrix} s_{ii}(0) \\ Q_i(0) \end{bmatrix}_m = \begin{bmatrix} e^{\lambda_{ii} z(0)} & e^{-\lambda_{ii} z(0)} \\ -E_p A_p \lambda_{ii} e^{\lambda_{ii} z(0)} & E_p A_p \lambda_{ii} e^{-\lambda_{ii} z(0)} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \quad (19)$$

第 m 段桩桩底:

$$\begin{bmatrix} s_{ii}(h) \\ Q_i(h) \end{bmatrix}_m = \begin{bmatrix} e^{\lambda_{ii} z(h)} & e^{-\lambda_{ii} z(h)} \\ -E_p A_p \lambda_{ii} e^{\lambda_{ii} z(h)} & E_p A_p \lambda_{ii} e^{-\lambda_{ii} z(h)} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \quad (20)$$

联立式(19)和式(20),消去 A 、 B ,可得

$$\begin{bmatrix} s_{ii}(0) \\ Q_i(0) \end{bmatrix}_m = [T(\lambda_{ii})]_m \begin{bmatrix} s_{ii}(h) \\ Q_i(h) \end{bmatrix}_m \quad (21)$$

式中:

$$[T(\lambda_{ii})]_m = \begin{bmatrix} \operatorname{ch}(\lambda_{ii} l_m) & \frac{1}{E_p A_p \lambda_{ii}} \operatorname{sh}(\lambda_{ii} l_m) \\ E_p A_p \lambda_{ii} \operatorname{sh}(\lambda_{ii} l_m) & \operatorname{ch}(\lambda_{ii} l_m) \end{bmatrix} \quad (22)$$

这样可求得桩顶沉降、轴力和桩端沉降、轴力之间的递推关系:

$$\begin{bmatrix} s_{ii}(0) \\ Q_i(0) \end{bmatrix} = \prod_{m=1}^n [T(\lambda_{ii})]_m \begin{bmatrix} s_{bii} \\ Q_{bi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 \\ T_3 & T_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{bii} \\ Q_{bi} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: s_{bii} 为桩端沉降; Q_{bi} 为桩端压力。

桩端位移采用深度修正的 Boussinesq 解计算^[1]:

$$s_{bi} = \frac{\eta Q_{bi}(1-\mu)}{4r_0 G_b} \quad (24)$$

式中: η 为桩入土深度影响系数,一般取 0.84~1.00; G_b 为桩端土剪切模量。

定义桩端土的弹簧刚度:

$$k_b = \frac{Q_{bi}}{s_{bi}} = \frac{4r_0 G_b}{\eta(1-\mu)} \quad (25)$$

联立式(23)和式(25),便可求得考虑各桩的加筋与遮帘效应的 i 桩桩顶沉降 s_{ii} ,即

$$s_{ii}(0) = \frac{T_1 + k_b T_2}{T_3 + k_b T_4} Q_i(0) \quad (26)$$

3 公式的应用

(1) 高承台或承台底土不分担荷载的低承台桩基

对于柔性承台基础,有

$$Q_i = P/N \quad (27)$$

式中: P 为作用在承台上的总荷载; N 为总桩数。

对于刚性承台基础,认为各基桩的沉降量相

等,荷载由各基桩共同承担,即有

$$Q_1 + Q_2 + \cdots + Q_N = P; s_1 = s_2 = \cdots = s_N = s \quad (28)$$

由此建立 $N+1$ 个方程,可求得 $N+1$ 个未知数,进而求得群桩基础沉降量。

(2) 承台底土分担荷载的低承台桩基

假定承台底土反力为均布荷载 p_c ,其分担的总荷载为 Q_c ,则其引起的沉降量可由基于地表的 Boussinesq 位移解求得,即^[12]

$$s_c = \omega(1-\mu^2)bp_c/E_{sp} \quad (29)$$

式中: s_c 为承台的平均沉降; ω 为沉降影响系数; b 为矩形承台的宽度或圆形承台的直径; E_{sp} 为承台底桩土复合模量, $E_{sp} = (E_s A_s + E_p A_{pa}) / (A_s + A_{pa})$, E_s 、 E_p 分别为承台底土、桩的弹性模量, A_s 、 A_{pa} 分别为承台底土的总面积、各基桩的截面积之和; p_c 为承台底土反力,可根据实测数据确定,若无实测资料,可按式 $p_c = \eta_c f_{ak}$ 计算^[1-2], η_c 为承台底板的承台效应系数, f_{ak} 为承台底地基承载力特征值。

4 工程算例分析

算例1^[13-15] Koizumi和Ito在现场进行了3×3群桩基础荷载试验,场地桩长范围内地层简化为2层:①含贝壳砂质粉土,厚1.65 m;②含贝壳粉质黏土,厚3.90 m。采用钢管桩,底端为闭合锥形,桩径为300 mm,壁厚3.2 mm,桩长5.55 m,桩间距为3d(d 为桩直径),如图2所示,桩身弹性模量为200 GPa。9根桩的顶部与钢筋混凝土承台刚性连接,承台底与地基土相连。按照Cairo等^[14]、Chow等^[15]对该试验实测不排水抗剪强度所选用的反算方法估算,将土的弹性模量分别取11.7、16.9 MPa。各层土的泊松比均取0.35。工作荷载 P 下 ($P = P_u/2$, P_u 为极限荷载) 实测承台底土分担荷载较小,本文忽略不计。

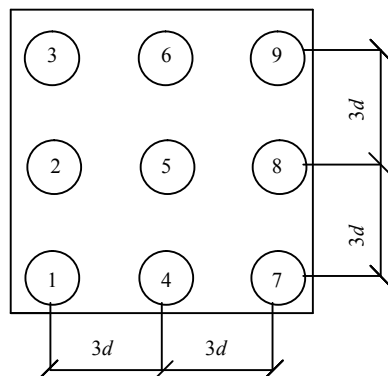


图2 群桩平面布置图

Fig.2 Sketch of piles group

按文中上述方法求得工作荷载作用下基础的荷载-沉降曲线如图 3 所示。由图可见, 工作荷载下本文计算结果与实测值吻合较好, 后期二者偏差较大。这是因为上部荷载超过一定值(临塑荷载)后, 地基土发生塑性变形, 而本文方法仅限于弹性变形阶段计算, 未能考虑地基土的塑性变形。

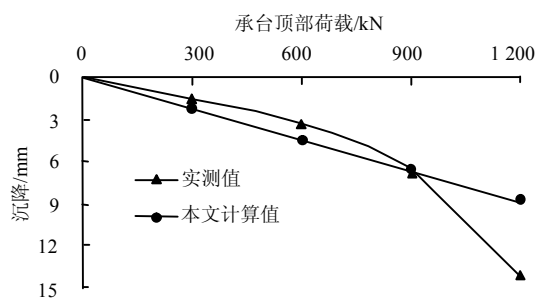


图3 工作荷载下群桩基础荷载与沉降曲线
Fig.3 Load-settlement curves of piles group at working loads

算例2^[2,6,16]。中国建科院等在山东洛口镇进行了一系列原型桩基试验, 试验桩为钻孔灌注桩, 在工作荷载 P 下试验, 以其中 1 组试验G16(高承台)进行分析比较。土层分布为: 地表至地下8.0 m稍密~中密粉土, 黏聚力为4 kPa, 内摩擦角为33°, 变形模量为8.2 MPa; 8.0 m以下为可塑~软塑粉质黏土。桩数为3×3, 其平面布置同算例1(见图2), 桩径为250 mm, 桩长4.5 m, 桩间距为3 d , 承台宽度与桩长比为0.5, 桩身弹性模量取为20 GPa, 土的泊松比取为0.35。

承台顶荷载为940 kN时, 按本文方法求得G16高承台群桩沉降5.08 mm, 略大于实测值4.10 mm。笔者认为, 闫细丽等^[6]所述现场试验时间较短, 沉降尚未完全完成即已进入下一级荷载。同时, 可由式(11)求得群桩中任意两基桩间的相互作用系数 α_{ij} , 计算结果见表1。由表可见, 本文计算值与实测值比较接近, 且明显小于弹性理论值^[16], 说明考虑了桩间的加筋与遮帘效应后, 桩间的相互作用明显减弱了。群桩中, 任意 2 根基桩间的相互作用是不一致的, 如 $\alpha_{12} \neq \alpha_{21}$, 这主要是由于其所处的位置不对称使得受到其他桩的综合影响也不一样, 显然实际情况亦应如此。

表1 任意 2 根基桩之间的相互作用系数 α_{ij}

Table 1 Interaction coefficients between any two piles

α_{ij}	3.0 d	α_{ij}	4.2 d	α_{ij}	6.7 d
α_{12}	0.265	α_{15}	0.193	α_{16}	0.007
α_{21}	0.237	α_{51}	0.148	α_{61}	0.006
α_{25}	0.309	α_{24}	0.166		
α_{52}	0.265				
实测值	0.11~0.30		0.17(4 d)		0.06(6 d)

注: 实测值为双桩试验结果, 括号值为实际试验双桩桩间距。

5 结 语

本文的相互作用系数考虑了桩群中各基桩的共同影响, 且公式简单, 应用简便, 算例结果表明, 按本文公式计算的相互作用系数明显小于弹性理论解, 且与实测结果接近, 计算的群桩沉降值也与实测值吻合, 表明本文方法的可靠性。

地基土的剪切模量、桩侧土剪切变形影响最大半径 r_m 对计算结果影响较大, 能否正确合理地确定该值, 对群桩沉降计算的精度尤为重要。

本文方法仅适用于地基土弹性变形阶段的沉降计算(即工作荷载下), 尚不能考虑地基土产生塑性变形的情况, 且推导的相互作用系数也未能计及桩、土性质的影响, 公式也未能考虑桩端压力或桩端位移的相互作用, 这些都有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 史佩栋. 桩基工程手册(桩与桩基础手册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [2] 刘金砺, 高文生, 邱明兵. 建筑桩基技术规范应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [3] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. New York: Wiley, 1980.
- [4] RANDOLPH M F, WROTH C P. An analysis of vertical deformation of pile groups[J]. *Geotechnique*, 1979, 29(4): 423—439.
- [5] 梁发云, 陈龙珠, 李镜培. 加筋效应对群桩相互作用系数的影响[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1757—1760.
LIANG Fa-yun, CHEN Long-zhu, LI Jing-pei. Analysis of piles reinforced effects on interaction coefficients of piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(11): 1757—1760.
- [6] 闫细丽, 张红芬. 群桩间相互作用系数计算[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(3): 93—95.
YAN Gang-li, ZHANG Hong-fen. Study on interaction coefficient calculation of pile groups[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2011, 32(3): 93—95.
- [7] COOKE R W. The settlement of friction pile foundations[C]//Proc. Conf. on Tall Building. Kuala Lumpur: [s. n.], 1974.
- [8] WANG Zhong-jin, XIE Xin-yu, WANG Jin-chang. A new nonlinear method for vertical settlement prediction of a single pile and pile groups in layered soils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 45: 118—126.
- [9] 戚科骏, 宰金珉, 王旭东, 等. 基于相互作用系数探讨

- 的群桩简化分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1609—1614.
- QI Ke-jun, ZAI Jin-min, WANG Xu-dong, et al. Simplified analysis of pile group based on discussion of interaction factors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1609—1614.
- [10] 王涛, 刘金砺. 桩-土-桩相互作用影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 100—105.
- WANG Tao, LIU Jin-li. Tests on influence of pile-soil-pile interaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(1): 100—105.
- [11] MYLONAKIS G. Contributions to static and seismic analysis of piles and pile-supported bridge piers[PhD thesis D]. Buffalo: State University of New York, 1995.
- [12] 赵明华, 邹丹, 邹新军. 群桩沉降计算的荷载传递法[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 119—124.
- ZHAO Ming-hua, ZOU Dan, ZOU Xin-jun. Settlement calculation of pile groups by load transfer method[J]. **Engineering Mechanics**, 2006, 23(7): 119—124.
- [13] KOIZUMI Y, ITO K. Field tests with regard to pile driving and bearing capacity of piled foundations[J]. **Soils and Foundations**, 1967, 7(3): 30—53.
- [14] CAIRO R, CONTE E. Settlement analysis of pile groups in layered soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2006, 43(8): 788—801.
- [15] CHOW Y K, THE C I. Pile-cap-pile group interaction in nonhomogeneous soil[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1991, 117(11): 1655—1668.
- [16] 刘金砺, 黄强, 李华, 等. 竖向荷载下群桩变形性状及沉降计算[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 1—13.
- LIU Jin-li, HUANG Qiang, LI Hua, et al. Deformation behavior and settlement calculation of pile groups under vertical load[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(6): 1—13.