

桩筏基础的积分方程解法及其参数分析

An integral equation approach and parametric analysis for piled raft foundation

陈龙珠¹, 梁发云^{1, 2}

(1. 上海交通大学 安全与防灾工程研究所, 上海 200030; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 基于较为严格的弹性解析方法, 本文采用积分方程法对工程中应用广泛的桩筏基础进行分析, 推导出求解所需的第二类 Fredholm 积分方程, 并通过数值计算分析桩筏基础中各桩的荷载分担、沿桩身的荷载传递和位移以及地基土的荷载分担情况, 可全面地反映了桩筏基础在工作荷载下的工程性状。与经典文献的对比验证了本文方法的正确性。文中还对桩筏基础进行了较为广泛的参数分析。本文方法可用于分析较大规模的桩筏基础, 具有工程应用前景。

关键词: 桩筏基础; 积分方程; 荷载分担; 沉降; 参数分析

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)06-0733-06

作者简介: 陈龙珠(1962-), 男, 安徽省枞阳县人, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学、基础工程及地基处理、城市综合防灾减灾等领域的科研与教学工作。

CHEN Long-zhu¹, LIANG Fa-yun^{1, 2}

(1. Institute of Engineering Safety and Disaster Prevention, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Piled raft foundation has been used extensively in civil engineering. Based on a rigorous elastic analysis, an integral equation approach is applied to analyze the piled raft, and then the second kind Fredholm's equations are deduced to solve the problems in this paper. Using the numerical calculation, loads shared by piles and subsoil, the settlement and the load transfer characters are obtained to investigate the working behavior of pile raft comprehensively. The present method is verified with the classical literatures. An extensive parametric analysis is also made to study the behaviors of piled raft. The present method is suitable to analyze a large-scale piled raft and can be applied to practical engineering.

Key words: piled raft; integral equation; load sharing; settlement; parametric analysis

0 引言

桩筏基础在国外通常被称为“Piled raft foundation”, 而我国工程界也称其为“复合桩基”。桩基工程的实践表明, 地基土对桩筏基础的承载力有着显著的贡献, 应采用适当的方法考虑地基土的作用。自从 Davis & Poulos^[1]和 Burland 等^[2]分别提出“桩筏基础”和“减少沉降桩”的概念后, 桩筏基础引起了工程界的关注, 此后不到 30 年的时间里, 发表了大量关于桩筏基础的研究报道。Poulos^[3]和杨敏^[4]分别对桩筏基础国外和国内近年来的研究状况进行了述评。随着我国经济的日益发展, 土木工程基本建设方兴未艾, 桩筏基础在我国有机会得以更广泛的应用。

相对于传统的桩基础, 桩筏基础考虑了地基土参与共同作用的贡献, 其沉降特性是由桩、筏和地基土相互作用的综合结果。Ottaviani^[5]和 Kuwabara^[6]分别运用有限元和边界元分析了弹性地基中刚性承台下的群桩, 但由于计算量较大, 很少用于实际工程的分析; Poulos & Davis^[7]采用弹性理论法并引入相互作用系数对桩筏基础近似分析, 杨敏等^[8]和宰金珉^[9]则分别

基于 Geddes 应力解和广义剪切位移法分析了极限荷载作用下桩筏基础的沉降特性, 但他们在分析中都没有考虑桩土分离后桩位置留下的孔洞, 在理论上还不够严密。Muki & Sternberg^[10]提出一个较严格的数学模型, 用于求解弹性介质中弹性杆的轴向荷载传递问题, 求解时将该体系分解为扩展半无限弹性体系和虚拟杆的叠加, 以虚拟杆的轴力为基本未知量, 根据应变协调条件建立第二类 Fredholm 积分方程进行求解。陆建飞等^[11]则将该方法推广至高承台群桩的分析中, 拓宽了积分方程法在桩基分析中的应用范围。

根据桩筏基础的特点, 本文进一步考虑了刚性筏板下地基土的共同作用, 建立如图 1 所示的分析模型, 推导出求解所需的第二类 Fredholm 积分方程, 对该积分方程进行数值计算, 即可求得桩筏基础中各桩及地基土的荷载分担、沿桩身的荷载传递等情况, 可全面地反映桩筏基础在工作荷载下(弹性阶段)的工程性状。本文方法采用了较为精确的轴对称空间模型, 求

基金项目: 上海市教育发展基金会曙光计划项目(2001sg013)

收稿日期: 2003-12-18

解中考虑了桩与桩以及桩与土之间的相互作用,克服了其它方法难以考虑桩群的“加筋”和“遮帘效应”的缺点,而计算工作量比有限元法要减少很多,可以分析较大规模的群桩问题。

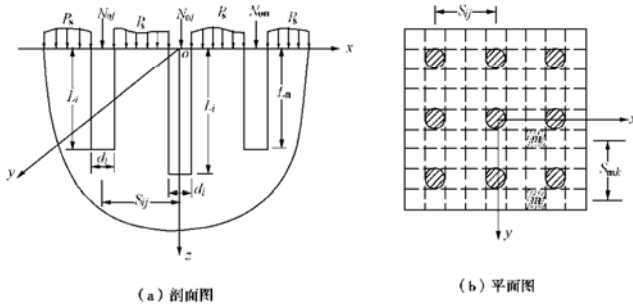


图 1 刚性筏板下的桩基础计算模型

Fig. 1 Scheme of piled rigid raft foundation

1 桩筏基础的积分方程解法

1.1 计算模型

在弹性半空间中建立桩筏基础的坐标系如图 1

(a) 所示, 桩的总数为 n , 图中 L_i , d_i 和 N_{0i} 分别为第 i 根桩的长度、直径和桩顶承受的竖向外荷载。图 1 (b) 中斜线阴影表示桩, 第 i 根和第 j 根桩的桩间距记为 s_{ij} 。地基土的弹性模量和泊松比分别为 E_s 和 μ_s , 地基土表面的受力为 $p_s(x, y)$ 。为便于分析, 假定各桩的直径相等, 并将地基土在平面内离散成边长与桩直径相等的方形单元, 平面内土单元的总数记为 m 。以第 k 个土单元作为研究对象, 其表面所受压力的合力记为 Q_{0k} , 分析时将方形的土单元按面积等效为圆形截面单元。在刚性桩情况下, 圆桩与周围的方格虚线所围成土的等效模量之比小于 1%, 这部分土的作用相对于桩是很小的, 可忽略不计。

按 Muki & Sternberg^[10]方法, 分析时可将真实桩分解为虚拟土和虚拟桩, 也即将图 1 的问题分解为扩展的弹性半空间土和 n 根虚拟桩的叠加。以第 i 根桩作为研究对象, 分解后的计算模型如图 2 所示, 图中 E_{pi} 和 A_{pi} 分别为第 i 根桩的弹性模量和面积, Π_z 为桩在 z 处的截面, 其它类同。

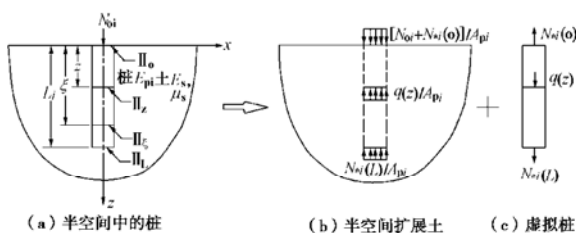


图 2 以第 i 根桩为分析对象的示意图

Fig. 2 Diagram of pile i as a free body

1.2 虚拟桩

图 2 (c) 中第 i 根虚拟桩的弹性模量 E_{pi} 为

$$E_{pi} = E_p - E_s \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

将第 i 根虚拟桩视为弹性模量为 E_{pi} 的一维弹性介质, 其应力-应变关系、平衡方程和荷载-位移关系分别如式 (2a), (2b) 和 (2c)。

$$\varepsilon_{si}(z) = \frac{N_{si}(z)}{E_{pi} A_{pi}} \quad (0 \leq z \leq L_i) \quad (2a)$$

$$\frac{dN_{si}(z)}{dz} = -q_i(z) \quad (0 < z < L_i) \quad (2b)$$

$$\varepsilon_{si}(z) = \frac{dw_{si}(z)}{dz} \quad (0 < z < L_i) \quad (2c)$$

式中 $\varepsilon_{si}(z)$ 为第 i 根虚拟桩在 z 处的轴向应变; $N_{si}(z)$ 和 $w_{si}(z)$ 为对应的轴力和竖向位移; $q_i(z)$ 为沿桩身单位长度上的桩土间相互作用力; A_{pi} 为桩截面面积。

将式 (2c) 代入式 (2a), 并积分可得

$$w_{si}(z) = w_{si}(0) + \frac{1}{A_{pi}} \int_0^z \frac{N_{si}(\xi)}{E_{pi}} d\xi \quad (3)$$

式中 $w_{si}(0)$ 为第 i 根虚拟桩的桩顶位移。

1.3 扩展半空间中的虚拟土

作用在弹性半空间扩展土中第 i 根虚拟桩所对应位置的虚拟土上的荷载包括: ①第 i 根桩的桩顶作用外荷载 N_{0i} 与相应的虚拟桩桩顶反作用力 $N_{si}(0)$ 的合力; ②第 i 根虚拟桩桩底反作用力 $N_{si}(L_i)$; ③沿第 i 根桩桩身单位长度的作用力 $q_i(z)$, 并在截面 Π_z 上均布; ④其它各根虚拟桩及其对应位置处虚拟土所产生的作用效应; ⑤地基土各单元的表面所受荷载产生的作用效应。

将这些荷载在第 i 根虚拟桩对应位置的虚拟土上引起的竖向应变、位移和应力分别进行叠加, 则半空间扩展土在第 i 根虚拟桩 Π_z 截面轴线的相应位置处的竖向应变 $\varepsilon_{si}(z)$ 、位移 $w_{si}(z)$ 和应力的合力 $N_{si}(z)$ 可分别表示为

$$\varepsilon_{si}(z) = \sum_{j=1}^n \{ [N_{0j} + N_{sj}(0)] \hat{\varepsilon}_{ij}(z, 0) - N_{sj}(L_j) \hat{\varepsilon}_{ij}(z, L_j) \} - \sum_{j=1}^n \int_0^{L_j} q_j(\xi) \hat{\varepsilon}_{ij}(z, \xi) d\xi + \sum_{k=n+1}^{n+m} Q_{0k} \hat{\varepsilon}_{ik}(z, 0) \quad (4a)$$

$$w_{si}(z) = \sum_{j=1}^n \{ [N_{0j} + N_{sj}(0)] \hat{w}_{ij}(z, 0) - N_{sj}(L_j) \hat{w}_{ij}(z, L_j) \} - \sum_{j=1}^n \int_0^{L_j} q_j(\xi) \hat{w}_{ij}(z, \xi) d\xi + \sum_{k=n+1}^{n+m} Q_{0k} \hat{w}_{ik}(z, 0) \quad (4b)$$

$$N_{si}(z) = \sum_{j=1}^n \{ [N_{0j}(0) + N_{sj}(0)] \hat{f}_{ij}(z, 0) - N_{sj}(L_j) \hat{f}_{ij}(z, L_j) \} - \sum_{j=1}^n \int_0^{L_j} q_j(\xi) \hat{f}_{ij}(z, \xi) d\xi + \sum_{k=n+1}^{n+m} Q_{0k} \hat{f}_{ik}(z, 0) \quad (4c)$$

式中, $i=1, 2, \dots, n$; Q_{0k} 为第 k 个土单元表面作用力

的合力; $\hat{\varepsilon}_{ij}(z, \xi)$, $\hat{w}_{ij}(z, \xi)$ 和 $\hat{f}_{ij}(z, \xi)$ 分别为第 j 根桩 Π_z 截面轴线处受单位力作用时引起第 i 根虚拟桩 Π_z 截面轴线处所对应的 z 向应变、位移和 Π_z 截面应力的合力; $\hat{\varepsilon}_{ik}(z, 0)$, $\hat{w}_{ik}(z, 0)$ 和 $\hat{f}_{ik}(z, 0)$ 分别为第 k 个土单元表面受合力为单位力的均布荷载作用时引起半空间扩展土在第 i 根虚拟桩 Π_z 截面轴线处所对应的 z 向应变、位移和 Π_z 截面应力的合力; 其它符号同上。

对式 (4a) ~ (4c) 进行分部积分, 并考虑 $\hat{\varepsilon}_{ij}(z, \xi)$ 和 $\hat{f}_{ij}(z, \xi)$ 在 $\xi = z$ 处的间断性, 整理可得

$$\varepsilon_{si}(z) = -N_{*i}(z) [\hat{\varepsilon}_{ij}(z, z^+) - \hat{\varepsilon}_{ij}(z, z^-)] + \sum_{j=1}^n N_{0j} \hat{\varepsilon}_{ij}(z, 0) - \sum_{j=1}^n \int_0^z N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{\varepsilon}_{ij}(z, \xi)}{\partial \xi} d\xi + \sum_{k=n+1}^{n+m} Q_{0k} \hat{\varepsilon}_{ik}(z, 0), \quad (5a)$$

$$w_{si}(z) = \sum_{j=1}^n \left\{ N_{0j} \hat{w}_{ij}(z, 0) - \int_0^z N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{w}_{ij}(z, \xi)}{\partial \xi} d\xi \right\} + \sum_{k=n+1}^{n+m} Q_{0k} \hat{w}_{ik}(z, 0), \quad (5b)$$

$$N_{si}(z) = N_{*i}(z) + \sum_{j=1}^n N_{0j} \hat{f}_{ij}(z, 0) + \sum_{k=n+1}^{n+m} Q_{0k} \hat{f}_{ik}(z, 0) - \sum_{j=1}^n \int_0^z N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{f}_{ij}(z, \xi)}{\partial \xi} d\xi, \quad (5c)$$

式中 $\hat{\varepsilon}_{ij}(z, z^+) - \hat{\varepsilon}_{ij}(z, z^-) = -\frac{(1-2\mu_s)(1+\mu_s)}{E_s A_{pi}(1-\mu_s)}$;

$\hat{f}_{ij}(z, z^+) - \hat{f}_{ij}(z, z^-) = -1$, 可由广义虎克定律推出;

$\hat{\varepsilon}_{ij}(z, \xi)$, $\hat{w}_{ij}(z, \xi)$ 和 $\hat{f}_{ij}(z, \xi)$ 的解答可参见 Muki & Sternberg (1970) [10]。

1.4 建立桩筏基础的第二类 Fredholm 积分方程

由虚拟桩与半空间扩展土在桩身处的竖向应变协调条件, 考虑虚拟桩轴力的符号以拉为正, 需在桩的应变前加一负号, 联合式 (2a) 和式 (5), 整理可建立如式 (6) 的求解基本方程:

$$N_{*i}(z) \left[\hat{\varepsilon}_{ij}(z, z^+) - \hat{\varepsilon}_{ij}(z, z^-) - \frac{1}{E_{ps} A_{pi}} \right] + \sum_{j=1}^n \int_0^z N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{\varepsilon}_{ij}(z, \xi)}{\partial \xi} d\xi = \sum_{j=1}^n [N_{0j} \hat{\varepsilon}_{ij}(z, 0)] + \sum_{k=n+1}^{n+m} Q_{0k} \hat{\varepsilon}_{ik}(z, 0). \quad (6)$$

式 (6) 是求解桩筏基础所需的第二类 Fredholm 积分方程。由于各桩桩顶和地基土单元表面上所受荷载均为未知, 由第二类 Fredholm 积分方程所构成的方程组多出了 $n+m$ 个未知数, 还需补充桩顶和地基土单元表面位移协调条件和荷载平衡条件才能求解出该超静定方程组。

1.5 第二类 Fredholm 积分方程组的求解

令式 (5b) 中的 $z = 0$, 则可得到第 i 根虚拟桩所

对应土体单元的表面位移为

$$w_{si}(0) = \sum_{j=1}^n \left\{ N_{0j} \hat{w}_{ij}(0, 0) - \int_0^z N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{w}_{ij}(0, \xi)}{\partial \xi} d\xi \right\} + \sum_{k=n+1}^{n+m} Q_{0k} \hat{w}_{ik}(0, 0) \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (7)$$

与式 (7) 相类似的, 可以推导出刚性筏板下地基土单元的表面位移 $w_{sk}(0)$ 为

$$w_{sk}(0) = \sum_{j=1}^n \left\{ N_{0j} \hat{w}_{kj}(0, 0) - \int_0^z N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{w}_{kj}(0, \xi)}{\partial \xi} d\xi \right\} + \sum_{l=n+1}^{n+m} Q_{0l} \hat{w}_{kl}(0, 0). \quad (8)$$

在计算模型的建立中可知, 式 (3) 中的虚拟桩轴向位移 $w_{*i}(z)$ 应等于真实桩轴向位移 $w_{pi}(z)$, 因此, 将 $w_{*i}(z)$ 记为 $w_{pi}(z)$ 。对于刚性筏板, 其下的各桩桩顶位移以及地基土单元表面的竖向位移均相等, 即有

$$w_c = w_{pi}(0) = w_{si}(0) = w_{sk}(0), \quad (9)$$

式中 w_c 为刚性筏板的竖向位移。

式 (9) 实际上只补充了 $n+m-1$ 个约束条件, 还需补充一个约束条件方可求解。

由荷载平衡条件, 即各桩顶分担荷载 N_{0i} 以及地基土单元表面的压力 Q_{0k} 之和应等于刚性筏板上作用的总荷载 N_0 , 可再补充了 1 个约束条件:

$$N_0 = \sum_{i=1}^n N_{0i} + \sum_{k=n+1}^{n+m} Q_{0k}. \quad (10)$$

这样就可以求解出由式 (6) 所构成的第二类 Fredholm 积分方程组, 从而得到 N_{0i} , Q_{0k} 以及各虚拟桩的桩身轴力和位移。而第 i 根真实桩的桩身轴力应等于第 i 根虚拟桩的桩身轴力 $N_{*i}(z)$ 和相应截面处的半空间扩展土轴力 $N_{si}(z)$ 的合力, 即

$$N_i(z) = N_{*i}(z) - N_{si}(z). \quad (11)$$

将式 (5c) 代入式 (11), 即可得到第 i 根真实桩在 z 截面处的桩身轴力。为与土力学的表达习惯一致, 将求得轴力表示为以压为正的形式, 则有

$$N_i(z) = \sum_{j=1}^n N_{0j} \hat{f}_{ij}(z, 0) - \sum_{j=1}^n \int_0^z N_{*j}(\xi) \frac{\partial \hat{f}_{ij}(z, \xi)}{\partial \xi} d\xi + \sum_{k=n+1}^{n+m} Q_{0k} \hat{f}_{ik}(z, 0). \quad (12)$$

至此, 本文得到了桩筏基础中的桩-土荷载分担、沿桩身的荷载传递和位移等工程性状的解答。

值得指出的是, 在建立第二类 Fredholm 积分方程过程中, 各桩的长度、直径、弹性模量及桩间距等参数可以各不相同, 因此, 本文方法还可用于分析桩长、桩径、桩身刚度和桩间距均不相等的混合型复合桩基问题。而当不考虑筏板下地基土的作用时, 也可用于分析传统的群桩基础。

2 数值分析方法和程序验证

在求解过程中, 对式 (6) 所构成的第二类 Fredholm 积分方程组进行数值计算是关键。式 (6) 的积分方程组中含有的未知函数分别为 n 根虚拟桩的桩身轴力 $N_{sj}(\xi)$ 和 n 根桩的桩顶作用的荷载 N_{0i} 以及筏板下的 m 个地基土单元表面作用的荷载 Q_{0k} 。如假定第 i 根桩在积分区间 $[0, L_i]$ 内的分段数为 s_i , 则 n 根虚拟桩的轴力未知数共为 $\sum_{i=1}^n (s_i + 1)$ 个; n 根桩的桩顶作用荷载的未知数为 n 个, 筏板下 m 个地基土单元表面作用荷载的未知数为 m 个, 则式 (6) 的积分方程组中含有的未知量总数为 $\sum_{i=1}^n (s_i + 1) + m + n$ 个。联合式 (6)、(9) 和 (10) 便构成一个定解的线性方程组。

根据上面推导的方法, 用 Fortran90 语言编写了刚性筏板下桩筏基础的计算程序 PRRF (Piled rigid raft foundation), 并与一些经典文献的结果进行对比。对于桩筏基础, 比较精确的解答是边界元法。为验证本文解答的精确性, 将本文解答与 Butterfield & Banerjee^[12]和 Kuwabara^[6]的边界元解答分别进行对比, 在分析中所采用的无量纲参数与原文献保持一致。

图 3 是与 Butterfield & Banerjee^[12]解答的对比, 图中的 N_0 为筏板上作用荷载的总和, G_s 为地基土剪切模量, w_c 为承台的沉降, L 为桩长, d 为桩的直径, K_G 为以地基土剪切模量为基准的桩土相对刚度, $K_G = E_p/G_s$ 。计算时筏板下地基土在平面内被划分为 16 个矩形单元, 并等效为同样面积的圆形土体单元。由于在该四桩承台中各桩的荷载相等, 只需给出地基土分担荷载即可确定各桩所受的荷载, 基础沉降特性以无量纲参数 $N_0/(G_s w_c d)$ 表示。从图中可以看出, 本文方法所求得的基础沉降特性与 Butterfield & Banerjee 解答可以很好地吻合, 地基土的荷载分担随桩长细比的变化趋势也基本一致, 但本文方法所求得的地基土荷载分担比要略小于 Butterfield & Banerjee 解答, 但相对误差均在 10% 以内。

图 4 是与 Kuwabara^[6]解答的对比, 计算模型为 3×3 的 9 桩模型, 其中角桩、边中桩和内桩的编号分别为桩 1、桩 2 和桩 3, 计算参数为: 方形刚性筏板边长 $B=13d$, $s/d=5$, $K_p=1000$, $\mu_s=0.5$, $L/d=25$ 。桩身轴力 $N(z)$ 以无量纲参数 $N(z)/N_{av}$ 表示, N_{av} 为桩顶平均荷载名义值, $N_{av} = N_0/n$ (n 为桩数); K_p 为以土的弹性模量为基准的相对刚度, $K_p = E_p/E_s$; 基础沉降特性以无量纲参数 $N_0/(E_s w_c d)$ 表示, 地基土在平面内划分为 64 个单元。从图 4 (a) ~ 4 (c) 中可以看出, 本文方法所求得的地基土和各桩的荷载分担、基础沉降特性与 Kuwabara 解答的相对误差均在 5% 以

内, 本文方法的精度是令人满意的。由此本文认为, 图 3 中的荷载分担比与 Butterfield 解答有一定误差的原因可能是 Butterfield & Banerjee^[12]在计算中边界单元划分较粗所致。图 4 (d) 中还给出了桩身轴力沿竖向的分布曲线, 与 Kuwabara 解答也基本一致, 揭示了考虑地基土作用时不同位置桩的轴力分布特性。

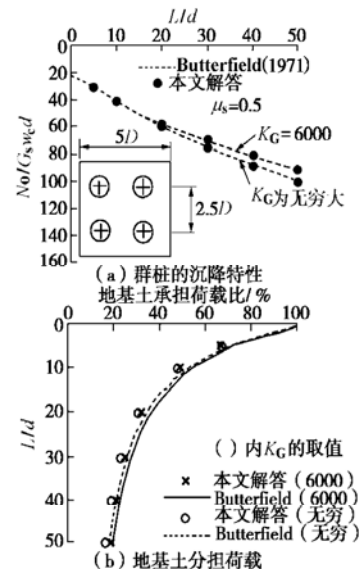


图 3 本文解答与 Butterfield & Banerjee 解答的对比

Fig. 3 Comparison between the present solution and that of Butterfield & Banerjee

3 桩筏基础工程性状的参数分析

针对与图 4 相同的 9 桩模型来分析桩筏基础的工程特性及各种参数的影响, 这样的分析对象既具有典型的代表性, 又不至于使得问题过于复杂。如无特别说明, 所取分析参数均与图 4 相同。基础的沉降特性以无量纲刚度 $N_0/(E_s w_c d)$ 表示, 各桩的荷载分担特性以无量纲参数 N_{0i}/N_{av} 表示。

3.1 桩筏基础的基本特性

在所取分析参数条件下, 计算得到该桩筏基础各桩及地基土的荷载分担比、沉降特性和各桩沿桩身的轴力分布, 可分别参见图 4 (a) ~ 4 (d), 通过对这些图形的分析, 可以得到如下的一些结论:

(1) 承台下地基土参与桩筏基础的共同作用而发挥了较为可观的承载作用, 本算例中地基土承担了将近 30% 的荷载。同时, 筏板下不同位置的地基土单元平均应力分布与桩相类似, 也呈现出明显的四周大中间小的分布特征。

(2) 从图 4 (d) 的桩身轴力分布曲线中可看出, 由于地基土参与共同作用, 浅层地基土与桩的相对沉降使得桩身上部的轴力分布发生了明显的变化, 并可由桩身轴力分布推算出角桩和边桩桩身上部的桩侧摩

阻力明显减小, 而内桩的桩身上部甚至出现了负摩阻力。这个现象在其他学者^[6]的研究中也有所报道, 但他们没有对此做出的解释。

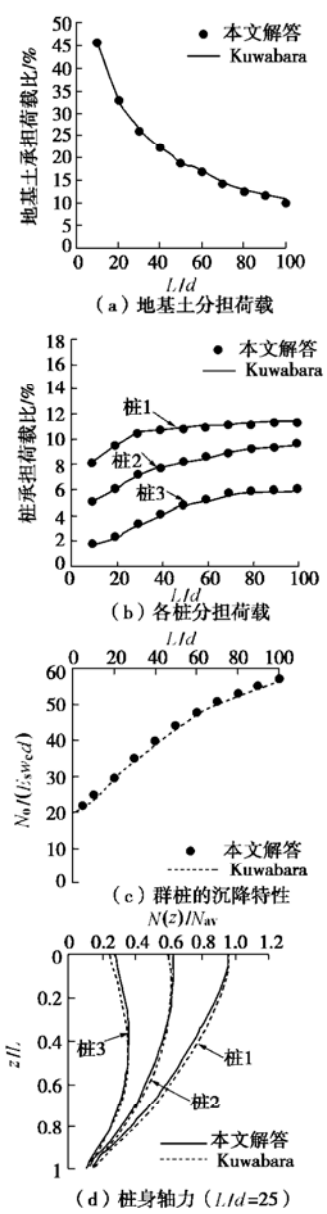


图 4 本文解答与 Kuwabara 解答的对比
Fig. 4 Comparison between the present solution and that of Kuwabara

3.2 桩身刚度对桩筏基础沉降和荷载分布的影响

图 5 分别给出了桩身刚度对桩、土荷载分担、基础沉降特性以及各桩竖向轴力分布的影响, 由此可见:

(1) 随着桩身刚度的增加, 地基土承担的荷载逐渐减小, 当桩身刚度增加到一定程度后, 地基土荷载分担的减小趋势逐渐变缓, 而桩 3 所承担荷载也随之有所降低。与之相应的, 桩 2 和桩 1 所承担荷载则有所提高, 其中角桩增加的幅度更为明显。桩身轴力分布曲线也反映出类似规律。

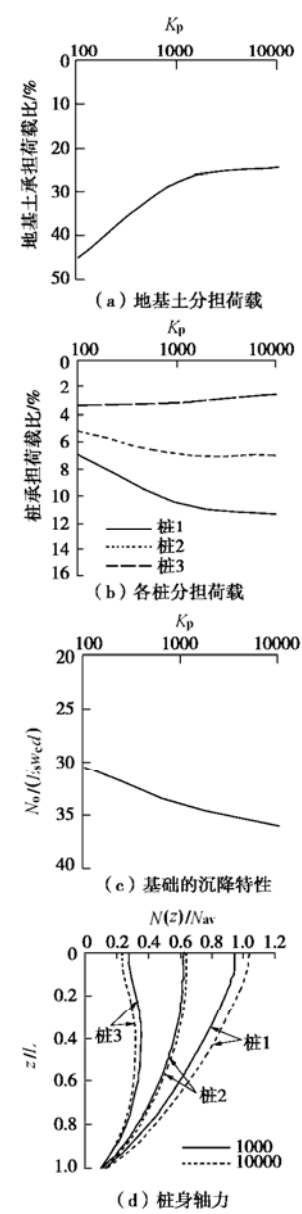


图 5 桩身刚度对基础沉降和荷载分布特性的影响
Fig. 5 Effect of pile rigidity on the settlement and load distribution of piled raft

(2) 随着桩身刚度的增加, 基础的无量纲刚度 $N_0/(E_s w_c d)$ 逐渐增大, 也即基础的沉降逐渐减小。

3.3 桩长细比对桩筏基础沉降和荷载分布的影响

在所取分析参数条件下, 桩长细比对桩、土荷载分担和基础沉降特性的影响如图 4 (a) ~4 (c) 中所示, 由此可见:

(1) 随着桩长细比的增加, 地基土承担的荷载显著减小, 当桩长细比增加到 $L/d = 100$ 时, 地基土承担的荷载降低到 10.9%; 而各桩分担荷载均相应地有所提高, 其中内桩增加的幅度最为明显, 边中桩次之。

(2) 随着桩长细比的增加, 基础的无量纲刚度显著增大, 也即基础沉降减小了。因此, 增加桩长对控制基础沉降的效果较为明显。

4 结 语

本文将积分方程在桩基工程中的应用进一步推广至桩筏基础的求解,考虑了刚性筏板下地基土的共同作用,推导出桩筏基础的第二类 Fredholm 积分方程;通过数值计算,可求得包含各桩的荷载分担、沿桩身的荷载传递和位移以及地基土的荷载分担等各种信息,较为全面地反映了桩筏基础在工作荷载下的工程性状。与经典文献的对比,验证了本文方法和计算程序的正确性,本文方法可用于较大规模的群桩问题的分析,具有较好的工程应用前景。

本文方法对桩筏基础进行的参数分析表明:承台下地基土参与桩筏基础的共同作用可以发挥较为可观的承载作用;随着桩身刚度或桩长细比的增加,地基土承担的荷载逐渐减小,其中桩长细比的影响较明显。

本文方法在求解过程中考虑了桩与桩以及桩与土之间的相互作用,因此,可用于研究桩群的“加筋效应”和“遮帘效应”对桩、土相互作用的影响,而引入宋二祥等(2003)^[13]对垫层特性提出的假定,本文方法还可推广至带垫层复合地基的分析。对这些问题的分析将另文阐述^[14]。

参考文献:

- [1] Davis E H, Poulos H G. The analysis of piled raft systems [J]. Australia Geotechnique Journal, 1972, **G2**(1): 21-27.
- [2] Burland J B, Broms B B, Mello De V F B. Behavior of foundations and structures [A]. In: Proceeding 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering [C]. Tokyo, 1977, 2. 495-546.
- [3] Poulos H G. Pile 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] Ottaviani M. Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups [J]. Geotechnique, 1975, **25**(2): 159-174.
- [6] Kuwabara F. An elastic analysis of piled raft foundations in a homogeneous soil [J]. Soils and Foundations, 1989, **29**(1): 82-92.
- [7] Poulos H G, Davis E H. Pile foundation analysis and design [M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [8] 杨 敏,王树娟,王伯钧,等.考虑极限承载力下的桩筏基础相互作用分析[J].岩土工程学报,1998,20(5):82-86.
- [9] 宰金珉.高层建筑与群桩基础非线性共同作用—复合桩基理论与应用研究[D].上海:同济大学博士学位论文,2000.
- [10] Muki R, Sternberg E. Elastostatic load-transfer to a half-space from a partially embedded axially loaded rod [J]. International Journal of Solids and Structures, 1970, **6**(7): 69-90.
- [11] 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(4):57-67.
- [12] Butterfield R, Banerjee P K. The problem of pile group-pile cap interaction [J]. Geotechnique, 1971, **21**(2):135-142.
- [13] 宋二祥,沈 伟,金 淮,等.刚性桩复合地基—筏板基础体系内力、沉降计算方法[J].岩土工程学报,2003,25(3):268-272.
- [14] 梁发云.混合桩型复合地基理论与试验研究[D].上海:上海交通大学博士学位论文,2004.