桩筏基础相互作用非线性简化分析

江 杰[1, 2]，黄茂松[1, 2]，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，上海 200063）

摘 要：提出一种桩筏基础相互作用的简化分析方法。对筏板和土体的接触面进行单元离散，在单桩弹塑性分析的基础上，分析了桩－桩、桩－土、土－土的相互作用关系。推导了桩土体系的刚度矩阵，得到刚性筏板群桩基础的竖向荷载沉降关系，桩的轴力沿深度的分布和桩、筏板各自分担的荷载。无需对桩和土体沿深度方向进行单元离散，简化了计算过程。由于考虑了土体的非均匀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。与有限元、边界元计算值以及实际工程实测值进行对比分析，验证了本文方法的正确性，并可应用于实际工程问题的分析。

关键词：桩筏基础；刚度矩阵；非线性；相互作用

中图分类号：TU473 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2008)01－0112－06

作者简介：江 杰(1979－)，男，湖北麻城人，博士研究生，从事桩土相互作用方面的研究。E-mail: jie_jiang001@126.com。

Analysis of interaction mechanism of piled raft foundation by use of simplified nonlinear model

JIANG Jie[1,2], HUANG Mao-song[1,2], LIANG Fa-yun[1,2], GU Qian-yan[3]

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education P. R. China, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. The Ninth Design & Research Institute for Shipbuilding Industry of China, Shanghai 200063, China)

Abstract: A simple and practical approach was presented for the analysis of behavior of vertically loaded pile groups embedded in homogeneous and nonhomogeneous soil with the rigid raft in contact with the ground. The interface between soil and raft was divided into a number of approximate square discrete elements. Based on the elasto-plastic analysis of single pile, the interactions between pile and pile, pile and soil, soil and soil were taken into account to determine the stiffness matrix of pile group-soil system. Then the vertical load-settlement relationship of piled raft foundation, axial load distribution in the piles along the depth and the load shared by piles and rafts were obtained. There was no need of discretization of soil and piles along pile shaft in the analysis. Therefore, the solving procedure was simplified. For considering the strength of soil varying along the depth and nonlinear interaction between piles and soil, the theoretical model agreed with the fact quite well. Comparison among the results of the finite element, boundary element, the field tests and the calculated results was carried out, and the feasibility of the present method for the analysis of piled raft foundation was proved.

Key words: piled raft foundation; stiffness matrix; nonlinearity; interaction

0 引 言

传统的桩筏基础设计，通常假设所有荷载都是由筏板底下的桩来承担。采用这种保守的设计方法是因为对桩－筏－土相互作用这个复杂的三维问题的理解还不够。近些年来，国内外的研究人员对桩筏基础的分析做了许多有益的工作。桩筏基础的概念最先由Davis 等[1]提出；Butterfield 等[2]、Kuwabara[3]等用边界元的方法对刚性筏板的群桩基础性状进行了分析；Ottaviani[4]和 Liang 等[5]采用三维有限元的方法对桩－筏－土的相互作用进行了研究。然而以上方法都需要对桩和土体沿深度方向进行单元离散，建模复杂，运算规模过大，难以直接应用于工程实际。

用变分方法对桩筏基础进行分析，可以克服以上方法存在的缺点。Liang等[6]采用变分方法对桩筏基础

基金项目：上海市科委科技攻关重点资助项目（062012005）；同济大学青年优秀人才培养行动计划资助项目（2006KJ043）

收稿日期：2007－02－12

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

进行分析，只对筏板和土体的接触面进行单元离散，求解出筏板的变形和接触面的压力分布就能实现对桩筏基础的求解，计算量大为简化。但变分方法目前只用在假设桩和土体完全弹性的基础上，难以模拟实际工程中的桩筏基础所存在的非线性性状。在非线性简化分析方面，杨敏[7]引用荷载超限转移法（cut-off）来考虑土的理想弹塑性，以模拟桩、土地基单元超过极限承载力的情况。该方法只是在程序上运用一些处理方法使所求出单元的荷载中超过极限承载力的部分在周围其它单元重分布，并没有从桩土相互作用机理上进行探讨。Guo和Randolph[8]提出适用于单桩的弹塑性简化分析方法，但没有将之应用到群桩和桩筏基础的分析中。

笔者[9]在 Guo 和 Randolph 方法的基础上，进一步考虑了桩土相互作用的非线性特性，并成功地应用于群桩分析中。本文在文献[9]的工作基础上考虑了筏板对承载力的贡献，对刚性筏板的下群桩基础进行分析，对筏板和土的接触面进行单元离散。在单桩弹塑性分析的基础上，分析了桩－桩、桩－土、土－土的相互作用关系，推导了桩土体系刚度矩阵，得到了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。考虑了土体的非均匀性和桩土相互作用的非线性特性，并将计算结果与有限元、边界元计算结果和实测结果进行了对比。

1　非均质土中单桩的计算方法

Guo 等[8]给出了非均质地基中单桩竖向荷载沉降的弹塑性解答。假设土体的剪切模量和极限摩阻力均随深度以幂函数分布，

$$G = A_g z^n \quad , \tag{1}$$

$$\tau_f = A_v z^\theta \quad , \tag{2}$$

式中，A_g 和 A_v 为剪切模量和极限摩阻力的分布常数，为了简化分析，本文假设 n 等于 θ，n 不等于 θ 的情况将另文讨论。

当桩周土完全处于弹性阶段，桩顶荷载 P_t 和位移 w_t 的关系可表示为

$$\frac{w_t}{P_t} = \frac{1}{G_L r_0 \pi C_{v0}} \sqrt{\frac{\zeta}{2\lambda}} \quad 。 \tag{3}$$

式中　G_L 为桩底土的剪切模量；$\zeta = \ln(r_m / r_0)$，$r_m = 2.5L(1-\nu)\rho$，L 为桩长，ν 为土的泊松比，ρ 为 $L/2$ 深度处与桩尖处的土的剪切模量之比；r_0 为桩半径；$\lambda = E_p / G_L$，E_p 为桩的弹性模量。式（3）中 C_{v0} 可表达为

$$C_{v0} = \lim_{z,y\to 0} C_v(z) = \lim_{z,y\to 0} \frac{C_1(z) + \chi C_2(z)}{C_3(z) + \chi C_4(z)} \left(\frac{z}{L}\right)^{n/2}, \tag{4}$$

其中，

$$\chi = \frac{2}{\pi(1-\nu)} \sqrt{\frac{2\zeta}{\lambda}} \quad , \tag{5}$$

$C_1(z) = -cI_{m-1}(y) + bK_{m-1}(y)$，$C_2(z) = dI_{m-1}(y) + aK_{m-1}(y)$，$C_3(z) = cI_m(y) + bK_m(y)$，$C_4(z) = -dI_m(y) + aK_m(y)$，其中 I 和 K 分别为第一类和第二类修正的 Bessel 函数，$m = 1/(n+2)$，变量

$$y = \frac{2mL}{r_0} \sqrt{\frac{2}{\lambda\zeta}} \left(\frac{z}{L}\right)^{1/2m} \quad , \tag{6}$$

系数 a，b，c，d 分别为修正的 Bessel 函数 $I_m(y)$，$I_{m-1}(y)$，$K_{m-1}(y)$，$K_m(y)$ 在 $z = L$ 的值。

当桩周土部分进入塑性时，随着荷载的增加，自桩顶至某一深度 L_1 处出现桩土的滑移现象，定义滑移度 $\mu = L_1 / L$ $(0 < \mu \le 1)$，

$$P_t = w_e k_s E_p A_p L^{n/2} C_v(\mu L) + \frac{2\pi r_0 A_v (\mu L)^{1+\theta}}{1+\theta} \quad , \tag{7}$$

$$w_t = w_e \left[1 + \mu k_s L^{n/2+1} C_v(\mu L)\right] + \frac{2\pi r_0 A_v (\mu L)^{2+\vartheta}}{(2+\theta) E_p A_p} \quad 。 \tag{8}$$

式中　$w_e = \frac{A_v}{A_g} r_0 \zeta$；$k_s = \frac{L}{r_0} \sqrt{\frac{2}{\lambda\zeta}} \left(\frac{1}{L}\right)^{1/2m}$；$A_p$ 为桩的截面积。还可以得到单桩轴力沿深度的分布，

$$P(z) = w_e G_L r_0 \pi C_v(z) \sqrt{\frac{2\lambda}{\zeta}} + 2\pi r_0 A_v \frac{(\mu L)^{\theta+1} - z^{\theta+1}}{\theta+1} \quad , \tag{9}$$

当 μ 趋近零，则桩侧土刚进入塑性状态，设此时桩顶荷载为

$$P_1 = \lim_{\mu\to 0} P_t = w_e k_s E_p A_p L^{n/2} \lim_{\mu\to 0} C_v(\mu L) \quad 。 \tag{10}$$

当 $\mu = 1$ 时，桩侧土刚好全部进入塑性状态，设此时桩顶荷载为 P_2，设此时桩顶荷载达到桩的极限承载力，荷载将不再增加。

$$P_2 = P_t\big|_{\mu=1} = w_e k_s E_p A_p L^{n/2} C_v(L) + \frac{2\pi r_0 A_v L^{1+\theta}}{1+\theta} \quad 。 \tag{11}$$

2　桩筏基础分析模型

筏板和土的接触面离散成一系列的四边形单元，并使桩顶面填充在四边形单元内，如图 1 所示。

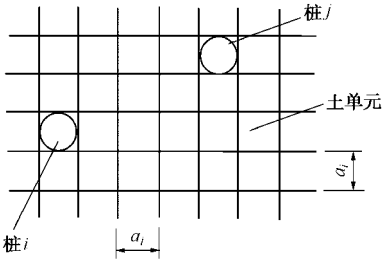


图 1　筏板和土接触面单元的划分

Fig. 1 Discretization of the interface between soil and raft

考虑筏板和土的位移协调，则有

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\{P_{sp}\}=[K_{sp}]\{w_{sp}\}\quad , \tag{12a}$$

$$\{P_{sp}\}=\{P_{s1},P_{s2}\ldots,P_{sn_s},P_{p1},P_{p2}\ldots,P_{pn_p}\}^{T}, \tag{12b}$$

$$\{w_{sp}\}=\{w_{s1},w_{s2}\ldots,w_{sn_s},w_{p1},w_{p2}\ldots,w_{pn_p}\}^{T}, \tag{12c}$$

式中 P_{si} 和 w_{si} 分别为土单元 i 上的等效集中力和平均位移，$P_{si}=\iint p_s \mathrm{d}A_{si}$，$p_s$ 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（12a）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。

3 桩土体系刚度矩阵的确定

土单元中心和桩顶的竖向位移可以通过叠加原理得到，可将式（12a）写成柔度矩阵的形式：

$$\{w_{sp}\}=[F_{sp}]\{P_{sp}\}\quad , \tag{13}$$

式中，$[F_{sp}]$ 为桩土体系的 $(ns+np)\times(ns+np)$ 柔度矩阵，可以改写为子矩阵的形式

$$[F_{sp}]=\begin{bmatrix} f^{ss} & f^{sp} \\ f^{ps} & f^{pp} \end{bmatrix}\quad , \tag{14}$$

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。如图 2 所示[10]。

3.1 当桩全部都处于弹性状态时

（1）如果土体为均质时，子矩阵 $[f^{ss}]$ 中的柔度系数可以通过 Boussinesq 解的积分形式求得[11]：

$$f_{ii}^{ss}=\frac{\sqrt{\pi}(1-\nu^2)}{2E_s a_i}\quad (i=1,2,..,n_s)\quad , \tag{15}$$

$$f_{ij}^{ss}=\frac{(1-\nu^2)}{\sqrt{\pi}E_s a_i}\sin^{-1}\left(\frac{a_i}{s_{ij}\sqrt{\pi}}\right)\quad (i,j=1,2,\ldots n_s;i\neq j)。 \tag{16}$$

式中 E_s 为土的弹性模量；s_{ij} 为土单元 i，j 的中心距离；a_i 为土单元 i 的宽度；柔度系数 f_{ii}^{ss} 表示土单元 i 在单位荷载下的位移；f_{ij}^{ss} 表示作用在土单元 j 上的单位荷载引起土单元 i 上的位移。当土体为非均质土体时，子矩阵 $[f^{ss}]$ 中的柔度系数可以很容易通过轴对称有限元分析得到，具体求解方法见文献[11]。

（2）子矩阵 $[f^{pp}]$ 中的柔度系数 f_{ii}^{pp} 可以由式（3）得到：

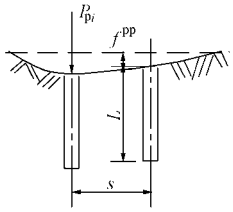
$$f_{ii}^{pp}=\frac{1}{G_L r_0 \pi C_{V0}}\sqrt{\frac{\zeta}{2\lambda}}\quad (i=1,2\ldots,n_p)\quad , \tag{17}$$

柔度系数 f_{ij}^{pp} 通过 Guo 和 Randolph[12]给出的桩桩相互作用系数得到：

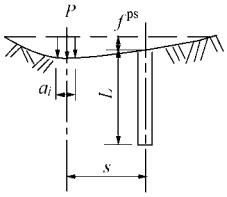
$$f_{ij}^{pp}=\frac{1}{G_L r_0 \pi C_{V2}}\sqrt{\frac{\zeta_2}{2\lambda}}-\frac{1}{G_L r_0 \pi C_{V0}}\sqrt{\frac{\zeta}{2\lambda}}$$

$$\left(i,j=1,2\ldots,n_p;i\neq j\right)。 \tag{18}$$

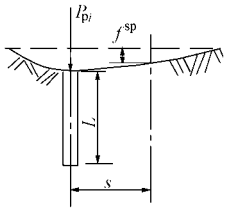
式中 柔度系数 f_{ii}^{pp} 为桩 i 在桩顶单位荷载作用下的桩顶位移；f_{ij}^{pp} 为作用在桩 j 顶面单位荷载引起桩 i 顶面的位移；$\zeta_2=\ln(r_{mg}/r_0)+\ln(r_{mg}/s'_{ij})$；$s'_{ij}$ 为桩 i，j 中心距离；C_{v2} 的定义和 C_{v0} 一样，只需把式（4）～（6）中的 ζ 换成 ζ_2 即可；$r_{mg}=2.5L(1-\nu)\rho+r_g$；$r_g=(0.3+0.2n)s$；$s$ 为 s'_{ij} 和 r_m 的小值。



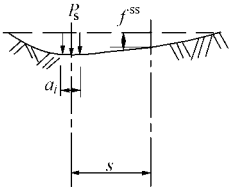
（a）桩桩相互作用



（b）土桩相互作用



（c）桩土相互作用



（d）土土相互作用

图 2 桩土表面相互作用

Fig. 2 Interaction between piles and soil

（3）子矩阵 $[f^{sp}]$ 中的柔度系数可以通过桩侧土的荷载位移关系求得，忽略桩底对土表面的影响。

$$f_{ij}^{sp}=\frac{\ln(r_m/s''_{ij})}{\ln(r_m/r_0)}f_{jj}^{pp}\quad (i=1,2\cdots,n_s;j=1,2\ldots,n_p)\quad , \tag{19}$$

式中，柔度系数 f_{ij}^{sp} 表示作用在桩 j 顶面单位荷载引起的土单元 i 中心的位移，s''_{ij} 表示桩 j 顶面和土单元 i 的中心距离。

（4）子矩阵 $[f^{ps}]$ 中的各柔度系数可以通过 Maxwell 相互作用原理求得

$$f_{ij}^{ps}=f_{ji}^{sp}\quad (i=1,2\cdots,n_p;j=1,2\ldots,n_s)\quad , \tag{20}$$

式中，柔度 f_{ij}^{ps} 表示作用在土单元 j 上的单位荷载引起的桩 i 顶面位移。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

柔度矩阵$\left[F_{sp}\right]$可以通过以上各式完全确定，刚度矩阵$\left[K_{sp}\right]$可表示为$\left[K_{sp}\right]=\left[F_{sp}\right]^{-1}$，把刚度矩阵代入式（12a）就能求出刚性筏板下各桩顶的力和土体所承担的荷载。

3.2　当部分桩进入塑性时

假设桩 i 开始进入塑性，即 $P_1 \le P_{pi} < P_2$，Chow[13]曾指出：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。根据这一结论，只需把子矩阵$\left[f^{pp}\right]$中的柔度系数 f_{ii}^{pp} 用 w_{pi}/P_t 代替，P_t 用式（7）确定。随着荷载增加，当部分桩完全进入塑性时，假设桩 i 完全进入塑性，即 $P_{pi} \ge P_2$，可以认为该桩达到其承载力的极限状态，此时只需把子矩阵$\left[f^{pp}\right]$中的柔度系数 f_{ii}^{pp} 用 w_{pi}/P_2 代替，P_2 用式（11）确定。

综上所述，本文的分析步骤为：考虑刚性筏板，筏板底部桩和土位移相等，给定一系列的筏板位移，通过式（12a）可求出桩土各自分担的荷载，当桩顶荷载超过 P_1 时，桩开始进入塑性，把柔度矩阵按 3.2 节的方法进行调整，能很好模拟实际桩进入塑性时应力转移的过程，从而得到荷载重分布的目的。

4　算例分析

从以上的分析可以看出，桩筏基础的弹性解是本文分析的基础，首先来验证其正确性。Chow 等[14]用有限元的方法对 2×2 群桩进行了分析，筏板为刚性。本文的方法将筏板和土体接触面分为 32 个土单元和 4 个桩单元，分析得到的桩筏基础整体刚度和筏板分担荷载比例与有限元的计算结果对比，结果如图 3 所示。为了方便起见，桩筏基础的整体刚度用 $P/(wE_s d)$ 表示，其中 P 为作用在桩筏基础上的外荷载，P_c 为筏板分担的荷载，w 为筏板的竖向位移，d 为桩的直径。

Kuwabara[3]用边界元法对 3×3 刚性筏板群桩进行了分析。筏板的尺寸为 $26r_0 \times 26r_0$，将筏板和土体接触面分为 160 个土单元和 9 个桩单元。桩筏基础的整体刚度用 $P/(Gr_0 w n_p)$ 表示，其中 n_p 为桩数，G 为土体的剪切模量，P_i 为筏板和桩各自分担的荷载，计算结果如图 4 所示。

由图 3，4 可以看出，本文的计算结果和 Chow 的有限元计算结果、Kuwabara 的边界元计算结果都很接近。随着桩的长径比增大，桩筏基础整体刚度和桩的荷载分担比例随之增大，筏板分担的荷载则随之减小，且较小的桩长径比对桩筏整体刚度和筏板分担的荷载有显著的影响。刚性筏板下角桩分担的荷载最大，边桩次之，中心桩最小，符合工程实际情况。

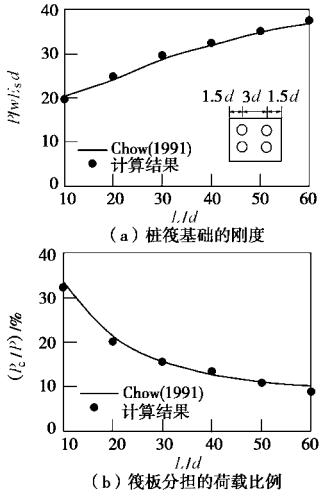


图 3　2×2 桩筏基础的计算结果对比(E_p/E_s=1000)

Fig. 3 Comparison of results for two-by-two-piled raft

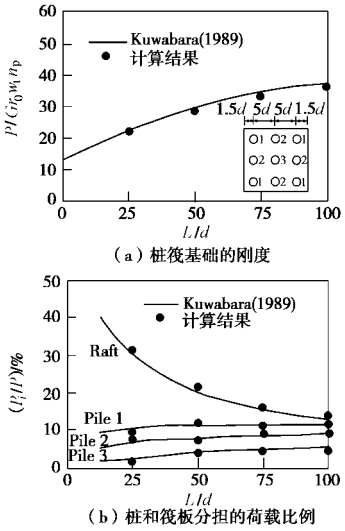


图 4　3×3 桩筏基础的计算结果对比(E_p/G=3000)

Fig. 4 Comparison of results for three-by-three-piled raft

Koizumi 等[15]对 3×3 桩筏基础进行现场试验，桩的直径 300 mm，壁厚 3.2 mm，桩埋深 5.55 m，桩距 900 mm；角桩中心到筏板边缘距离 450 mm。计算参数由现场单桩试验曲线拟合得到[14]，土体的极限摩阻力和弹性模量随深度线性增大，桩顶处土体极限摩阻力 25 kN/m^2，桩底土体极限摩阻力 40 kN/m^2；桩顶处土体弹性模量 12500 kN/m^2，且以每米 1.352 kN/m^2 沿深度增加；土体的泊松比取 0.499。筏板和土紧密接触，将桩和土体接触面分为 72 个土单元和 9 个桩单元。由图 5，7 可以看出桩筏基础的荷载－沉降关系和桩的轴力沿深度分布曲线与实测结果吻合得较好。由图 6 可知，当桩都处于弹性状态时，荷载分担关系曲线也和实测的基本吻合。当桩开始进入塑性，随着桩分担的荷载向土体转移，计算值和实测值偏差增大。这主要是因为本文假设当桩达到其假设的极限承载力 P_2 时桩分担的荷载就不再增加，增加的外荷载全部由筏板承担，从而引起筏板分担的荷载比实测值偏大，这可

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

以通过进一步的研究加以改进。

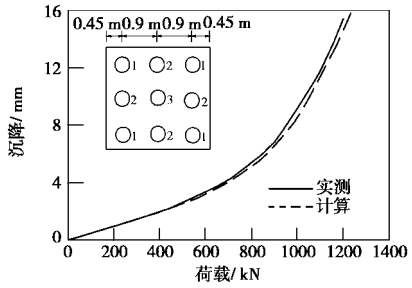


图 5 3×3 桩筏基础的荷载－沉降关系

Fig. 5 Load-displacement curve of three-by-three-piled raft

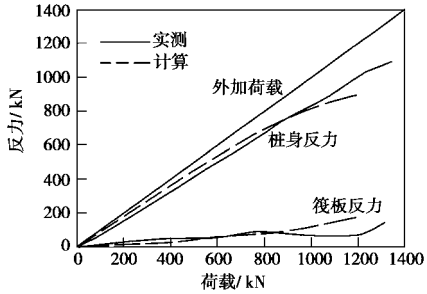
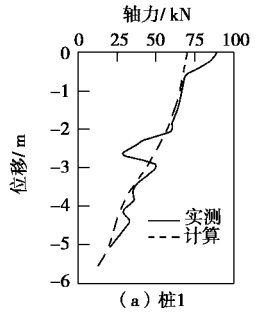
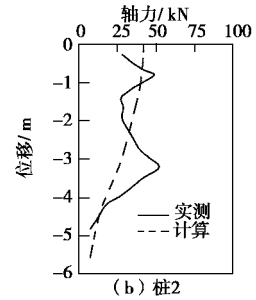


图 6 3×3 桩筏基础的荷载分担关系

Fig. 6 Load carried by raft and piles of three-by-three-piled raft





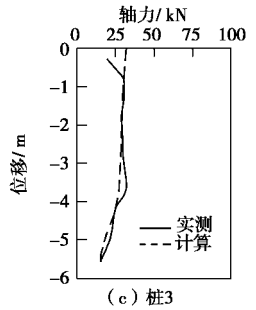


图 7 3×3 桩筏基础桩的轴力分布图(P=589 kN)

Fig. 7 Axial load distribution in the piles of three-by-three-piled raft

5 结 论

在单桩弹塑性理论法研究的基础上，分析了桩－桩、桩－土、土－土的相互作用关系，推导了桩土体系刚度矩阵，得到刚性筏板群桩基础竖向荷载沉降关系，桩轴力沿深度的分布以及桩、筏板各自分担的荷载。不用对桩土沿深度方向进行离散，简化了计算量。考虑了土体的非均匀性和桩土相互作用的非线性特性，因此更符合工程实际情况，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，考虑桩土间的滑移现象能够更好地反映单桩在实际荷载作用下的工作性状。

(2) 随着桩的长径比增大，桩筏基础整体刚度和桩的荷载分担比例随之增大，筏板分担的荷载则随之减小，且较小的桩长径比对桩筏整体刚度和筏板分担的荷载有显著的影响。

(3)刚性筏基的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，符合工程实际情况。故在实际工程中可以采用长短桩的组合方式节约工程造价。

(4) 本文只考虑了刚性筏基的情况，对于柔性筏基需进一步的研究。

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] BUTTERFIELD R, BANERJEE P K. The problem of pile group-pile cap interaction[J]. Geotechnique, 1971, **21**(2): 135－142.

[3] KUWABARA F. An elastic analysis of piled raft foundations in a homogeneous soil[J]. Soils and Foundations, 1989, **29**(1): 82－92.

[4] OTTAVIANI M. Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups[J]. Geotechnique, 1975, **25**(2): 159－174.

[5] LIANG F Y, CHEN L Z, SHI X G. Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load[J]. Computers and Geotechnics, 2003, **30**(6):443－453.

[6] LIANG F Y, CHEN L Z. A modified variational approach for the analysis of piled raft foundation[J]. Mechanics Research Communications, 2004, **31**: 593－604.

[7] 杨 敏, 王树娟, 王伯钧, 周融华. 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. (YANG Min, WANG Shu-juan, WANG Bo-jun, ZHOU

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Rong-hua. Practical analysis of piled raft foundation considering ultimate capacity of piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(5): 82 − 86. (in Chinese))

[8] GUO W D, RANDOLPH M F. Vertically loaded piles in non-homogeneous media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, **21**(8): 507 − 532.

[9] 江　杰, 黄茂松, 顾倩燕. 非均质地基中群桩竖向荷载沉降关系分析[J]. 岩土力学, (JIANG Jie, HUANG Mao-song, GU Qian-yan. Analysis for settlement of vertically loaded pile groups in non-homogeneous soil[J]. Rock and Soil Mechanics. (in Chinese))

[10] HAIN S J, LEE I K. The analysis of flexible raft–pile systems[J]. Geotechnique, 1978, **28**(1): 65 − 83.

[11] CHOW Y K. Vertical deformation of rigid foundations of arbitrary shape on layered soil media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1987, **11**: 1 − 15.

[12] GUO W D, RANDOLPH M F. An efficient approach for settlement prediction of pile groups[J]. Geotechnique, 1999**,** **49**(2): 161 − 179.

[13] CHOW Y K. Analysis of vertically loaded pile groups[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1986, **10**: 59 − 72.

[14] CHOW Y K, TEH C I. Pile-cap–pile-group interaction in nonhomogeneous soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1991, **117**(11): 1655 − 1668.

[15] 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.

河海大学《Water Science and Engineering》创刊

英文期刊 Water Science and Engineering（水科学与水工程）由河海大学创办，2008 年正式出版。该刊为季刊，面向国内外公开发行，国内统一连续出版物号为 CN32-1785/TV。

办刊宗旨：以党和国家的方针政策为指导，弘扬科学精神；探索水利学规律，创新水工程技术；反映水科学研究领域的最新成果，交流水工程建设的新技术和新经验；注重人与自然的和谐共处，促进水资源的可持续利用；发扬学术民主，促进国际交流；为我国的经济建设和社会发展服务。

主要刊登：国内外水科学研究、水工程建设、水资源保护、水生态修复等领域用英文撰写的原创性研究（技术）论文；也刊登英文报道的国内外相关学术会议及技术交流等动态消息。

投稿地址：210098 南京西康路 1 号河海大学《Water Science and Engineering》编辑部；投稿邮箱：wse@hhu.edu.cn；咨询热线：025-83786363。

（《Water Science and Engineering》编辑部　供稿）

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net