

文章编号: 1000-7598(2013)03-0849-07

多向荷载作用下层状地基刚性桩筏基础分析

纠永志^{1,2}, 黄茂松^{1,2}, 木林隆^{1,2}, 连柯楠^{1,2}

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

摘要: 提出一种多向荷载作用下层状地基中刚性桩筏基础的计算方法。基于剪切位移法, 采用传递矩阵形式分析了竖向荷载下桩顶面-桩顶面相互作用; 引入修正桩侧地基模量, 采用有限差分法分析了水平荷载下桩顶面-桩顶面相互作用; 基于层状弹性半空间理论, 分析了多向荷载下桩顶面-土表面、土表面-桩顶面、土表面-土表面的相互作用关系。建立了桩土体系柔度矩阵, 得到了多向荷载下层状地基中刚性桩筏基础的受力和变形的关系以及桩的内力和变形沿桩身分布规律。通过与有限元对比, 验证了该方法的合理性和修正地基模量的优越性, 并对多向荷载作用下的桩筏基础进行了计算分析, 计算结果表明, 水平力将会引起桩筏基础的倾斜。

关键词: 层状地基; 桩筏基础; 多向荷载; 相互作用

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Analysis of rigid piled raft foundations subjected to coupled loads in layered soils

JIU Yong-zhi^{1,2}, HUANG Mao-song^{1,2}, MU Lin-long^{1,2}, LIAN Ke-nan^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

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

Abstract: A simplified analytical approach is proposed to study the behavior of piled raft foundation with rigid raft subjected to coupled loads in layered soils. Based on the shear displacement method, using the transfer matrix, the pile-pile interaction under vertical load is analyzed. Adopting the modified subgrade modulus, the pile head-pile head interaction under horizontal load is analyzed through the finite difference method. Based on solutions for stress and displacement in layered elastic half space, the interactions between pile head and soil surface, soil surface and pile head, soil surface and soil surface subjected to coupled loads are taken into account to determine the flexibility matrix of the pile group-soil system. Then the load-settlement relationship of rigid piled raft foundations subjected to coupled loads, load and settlement of the piles along the depth are obtained. Comparison between the finite element results and the calculated results is carried out; and the feasibility of the present method for analyzing piled raft foundation and the superiority of the modified subgrade modulus are proved. The piled raft foundation with rigid raft subjected to coupled loads is analyzed. The calculating results indicate that the horizontal load will cause the pile raft foundation oblique.

Key words: layered soil; piled raft foundation; coupled loads; interaction

1 引言

传统设计方法是忽略筏-土的相互作用, 即只考虑筏板的直接承载能力, 其结果使得桩数过多、设计保守。当然, 在这种情况下, 基础的沉降非常小。但从经济的观点出发, 基础总沉降及差异沉降均应控制在结构可接受的水平, 并满足规范设计要求, 而不是过度减小。目前针对桩筏基础的研究主要集中在竖向力和水平力分别作用下的桩筏基础, 对诸如风电基础等承受多向荷载作用的桩筏基础的研究

还很少。

Poulos 和 Davis^[1]、Kuwabara^[2]、Mendonca 和 Paiva^[3]等用边界元方法对桩筏基础性状进行了分析, 考虑了承台桩-土的作用。但边界元求解桩基问题时本身还存在不少难以克服的问题。Shen^[4]基于最小势能原理, 提出了刚性板下桩筏基础相互作用的变分分析方法。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。黄茂松等^[5]基于单桩的层状剪切位移法, 考虑群桩

的遮拦效应以及筏-土相互作用,提出了一种层状地基刚性桩筏基础的简化分析方法。江杰等^[6]、黄茂松等^[7]作了进一步修正,采用了层状弹性半空间理论,考虑了土表面-土表面、土表面-桩顶面以及桩顶面-土表面的相互作用。但上述研究都是只考虑了竖向荷载。

水平荷载作用下桩筏基础的分析方法主要有混合法和有限元法,但研究目前还比较少,其中 Kitiyodom 等^[8]基于 Mindlin 解采用混合法分别对水平和竖向荷载作用下的桩筏基础进行了分析。针对竖向力、水平力及弯矩多向荷载同时作用下的桩筏基础,目前的研究还很少。

本文在文献[7]工作基础上,引入水平荷载下主动桩与被动桩地基模量,建立了多向荷载作用下层状地基中考虑桩-土-筏相互作用的刚性桩筏基础的计算方法,并通过相关计算分析进行了验证。

2 层状地基刚性桩筏基础的计算方法

2.1 桩顶面-桩顶面相互作用柔度系数

层状地基中竖向荷载下单桩和桩-桩相互作用弹性分析采用文献[7]的方法,即通过对竖向荷载下主动单桩控制方程(1)和被动单桩控制方程(2)进行求解,并推导相应的荷载传递矩阵,进而得出桩1(如图1所示)顶面施加单位竖向荷载时桩1顶面的竖向位移 $w_{11}(0)$ 和桩2(如图1所示)顶部的竖向位移 $w_{21}(0)$ 。

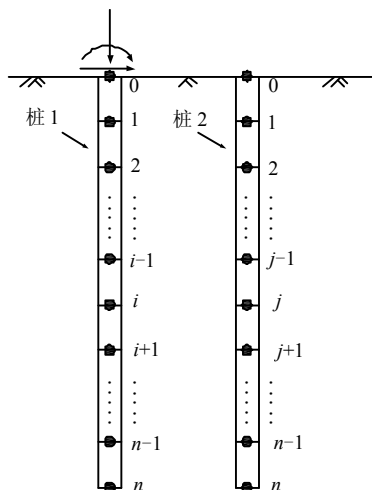


图1 桩-桩相互作用示意图

Fig.1 Sketch of pile-pile interaction

$$\frac{d^2 w_{11}(z)}{dz^2} - \lambda^2 w_{11}(z) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d^2 w_{21}(z)}{dz^2} - \lambda^2 [w_{21}(z) - w_s(s, z)] = 0 \quad (2)$$

式中: $\lambda = \sqrt{\frac{k_z}{E_p A_p}}$, $k_z = \frac{2\pi}{\ln(r_m/r)} G$, r 为桩的半径,

r_m 为有效影响半径, G 为土体剪切模量, E_p 为桩的弹性模量, A_p 为桩的横截面积; $w_{11}(z)$ 为主动桩桩1在深度 z 处的桩身竖向位移; $w_{21}(z)$ 为桩2在桩1的影响下产生的附加竖向位移; $w_s(s, z)$ 为桩2处因桩1产生的自由土体竖向位移, s 为桩间距。

本文结合文献[9]中推弹性地基梁被动地基模量的过程以及 Vesic 模量的推导方法推导了适用于水平受荷桩受到主动荷载和被动土体位移时的修正地基模量,其中桩侧的主动地基模量可表示为

$$k_y = \frac{7.5(1-\nu)^2}{\eta} \frac{E_s}{3-4\nu} \frac{1}{1-\nu^2} \sqrt{\frac{E_s D^4}{E_p I_p}} \quad (3)$$

而桩侧的被动地基模量可表示为

$$k_{py} = \frac{11.5(1-\nu)^2}{\eta} \frac{E_s}{3-4\nu} \frac{1}{1-\nu^2} \sqrt{\frac{E_s D^4}{E_p I_p}} \quad (4)$$

式中:

$$\eta = \left\{ (7-8\nu) + \frac{2}{R_1} + \frac{3-4\nu}{R_1^3} + \frac{2}{R_2^3} \left(2 - \frac{3}{R_1^2} \right) + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_1 + 2\frac{z}{r}} \left[2 - \frac{1}{R_1 \left(R_1 + 2\frac{z}{r} \right)} \right] \right\} / (7-8\nu),$$

$$R_1 = \sqrt{1 + 4\left(\frac{z}{r}\right)^2}, \quad R_2 = \sqrt{\left(\frac{z}{r}\right)^{-\frac{4}{3}} + \left(\frac{z}{r}\right)^{\frac{2}{3}}}, \quad z \text{ 为距桩}$$

顶面的深度; D 为直径; E_s 为桩侧土的弹性模量; ν 为桩侧土的泊松比; I_p 为桩截面抗弯模量。当 $K_r = \frac{E_p I_p}{E_s L^4} \geq 0.1$ 时, 取 $\frac{E_s D^4}{E_p I_p} = 10 \left(\frac{D}{L} \right)^4$,

其中 L 为桩长。

通过引入修正地基模量,针对主动桩水平变形控制微分方程(5)和被动桩水平变形控制微分方程(6)采用有限差分法求解,便可对层状地基中水平荷载下单桩和桩-桩相互作用进行分析。对于方程(6),首先运用层状地基中弹性理论位移基本解^[10]求解在主动桩作用下的被动桩处的自由土体位移场,然后用有限差分法对被动桩控制微分方程进行求解。

$$\frac{d^4 y_{11}(z)}{dz^4} + 4\lambda^4 y_{11}(z) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d^4 y_{21}(z)}{dz^4} + 4\lambda_p^4 [y_{21}(z) - y_s(s, z)] = 0 \quad (6)$$

式中: $\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_y}{4E_p I_p}}$; $\lambda_p = \sqrt[4]{\frac{k_{py}}{4E_p I_p}}$; $y_{11}(z)$ 为主动

桩 1 在深度 z 处的桩身水平位移; y_{21} 为由于桩 1 的影响桩 2 处产生的附加水平位移; z 为计算点所处的深度; $y_s(s, z)$ 为由于桩 1 的影响桩 2 处产生的水平向自由土体位移。

由 Wong 等^[11]关于桩-桩相互作用的定义, 可得到桩 j 对桩 i 的影响系数分别为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{P_{wij}}^{pp} &= \frac{w_{ij}(0)}{w_{jj}(0)} \\ \alpha_{H_{yij}}^{pp} &= \frac{y_{Hij}(0)}{y_{Hij}(0)} \\ \alpha_{M_{yij}}^{pp} &= \frac{y_{Mij}(0)}{y_{Mij}(0)} \\ \alpha_{H_{\theta ij}}^{pp} &= \frac{\theta_{Hij}(0)}{\theta_{Hij}(0)} \\ \alpha_{M_{\theta ij}}^{pp} &= \frac{\theta_{Mij}(0)}{\theta_{Mij}(0)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $w_{ij}(0)$ 为桩 j 顶部仅施加单位竖向荷载时, 在邻近桩 i 顶部产生的竖向位移; $w_{jj}(0)$ 为桩 j 顶部仅施加单位竖向荷载时, 桩 j 自身顶部产生的竖向位移; $y_{Hij}(0)$, $\theta_{Hij}(0)$ 分别为桩 j 顶部仅施加单位水平荷载时, 在邻近桩 i 顶部产生的水平位移、转角; $y_{Hij}(0)$, $\theta_{Hij}(0)$ 分别为桩 j 顶部仅施加单位水平荷载时, 在桩 j 自身桩顶部产生的水平位移、转角; $y_{Mij}(0)$ 、 $\theta_{Mij}(0)$ 分别为桩 j 顶部仅施加单位弯矩时, 在邻近桩 i 顶部产生的水平位移、转角; $y_{Mij}(0)$ 、 $\theta_{Mij}(0)$ 分别为桩 j 顶部仅施加单位弯矩时, 在桩 j 自身桩顶部产生的水平位移、转角。

单桩的竖向柔度、水平力作用下的水平柔度、弯矩作用下的水平柔度、水平力作用下的转角柔度、弯矩作用下的转角柔度分别为 $f_{P_{wij}}^{pp} = w_{jj}(0)$, $f_{H_{yij}}^{pp} = y_{Hij}(0)$, $f_{M_{yij}}^{pp} = y_{Mij}(0)$, $f_{H_{\theta ij}}^{pp} = \theta_{Hij}(0)$, $f_{M_{\theta ij}}^{pp} = \theta_{Mij}(0)$, ($j=1, 2, \dots, n_p$), n_p 为桩的个数。

桩-桩相互作用的柔度系数分别为

$$\begin{aligned} f_{P_{wij}}^{pp} &= \alpha_{P_{wij}}^{pp} w_{jj}(0), \quad f_{H_{yij}}^{pp} = \alpha_{H_{yij}}^{pp} y_{Hij}(0), \\ f_{M_{yij}}^{pp} &= \alpha_{M_{yij}}^{pp} y_{Mij}(0), \quad f_{H_{\theta ij}}^{pp} = \alpha_{H_{\theta ij}}^{pp} \theta_{Hij}(0), \\ f_{M_{\theta ij}}^{pp} &= \alpha_{M_{\theta ij}}^{pp} \theta_{Mij}(0), \quad (i, j=1, 2, \dots, n_p, i \neq j)。 \end{aligned}$$

2.2 桩顶面-土表面相互作用柔度系数

竖向荷载下的桩顶面-土表面相互作用柔度系数为

$$f_{P_{wij}}^{sp} = \sum_{k=1}^n w_{Pij}^k(0) (i=1, 2, \dots, n_s; j=1, 2, \dots, n_p) \quad (8)$$

式中: n_s 为土单元个数; $f_{P_{wij}}^{sp}$ 为竖向荷载作用下桩顶面-土表面竖向位移相互作用柔度系数; $w_{Pij}^k(0)$ 为桩 j 顶面作用单位竖向荷载时桩身节点 k 在土表面单元 i 的轴对称荷载作用下的层状地基位移基本

解^[10]。

由于土体不能承受弯矩, 因此, 土体不具有转动自由度, 这样水平力和弯矩作用下的桩顶面-土表面相互作用柔度系数为

$$\left. \begin{aligned} f_{H_{yij}}^{sp} &= \sum_{k=1}^n u_{Hij}^k(0) (i=1, 2, \dots, n_s; j=1, 2, \dots, n_p) \\ f_{M_{yij}}^{sp} &= \sum_{k=1}^n u_{Mij}^k(0) (i=1, 2, \dots, n_s; j=1, 2, \dots, n_p) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $f_{H_{yij}}^{sp}$ 为水平荷载作用下桩顶面-土表面水平位移相互作用柔度系数; $f_{M_{yij}}^{sp}$ 为弯矩荷载作用下桩顶面-土表面水平位移相互作用柔度系数; $u_{Hij}^k(0)$ 和 $u_{Mij}^k(0)$ 分别为桩 j 顶面作用单位水平力和弯矩时, 桩身节点 k 在土表面单元 i 的非轴对称荷载作用下的层状地基的位移基本解^[10]。

2.3 土表面-桩顶面相互作用柔度系数

由于土体不能承受弯矩, 因此, 土表面-桩顶面只考虑竖向力和水平力作用下相互作用, 运用层状地基弹性理论位移基本解^[10]可以得到土表面单元 j 分别作用单位竖向力和水平力时所引起的桩 i 处的自由土体位移场, 进而运用有限差分法对考虑遮拦效应的被动桩控制方程进行求解便可得被动桩的竖向位移、侧向位移和转角。这样竖向力和水平力作用下的土表面-桩顶面相互作用柔度系数分别为

$$\left. \begin{aligned} f_{P_{wij}}^{ps} &= w_{Pij}^s(0) (i=1, 2, \dots, n_p; j=1, 2, \dots, n_s) \\ f_{H_{yij}}^{ps} &= y_{Hij}^s(0) (i=1, 2, \dots, n_p; j=1, 2, \dots, n_s) \\ f_{H_{\theta ij}}^{ps} &= \theta_{Hij}^s(0) (i=1, 2, \dots, n_p; j=1, 2, \dots, n_s) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $f_{P_{wij}}^{ps}$ 为竖向荷载作用下土表面-桩顶面竖向位移相互作用柔度系数; $f_{H_{yij}}^{ps}$ 、 $f_{H_{\theta ij}}^{ps}$ 分别为水平力作用下土表面-桩顶面水平位移和转角相互作用柔度系数; $w_{Pij}^s(0)$ 为土表面单元 j 处作用单位竖向力时引起的 i 桩桩顶竖向位移; $y_{Hij}^s(0)$ 、 $\theta_{Hij}^s(0)$ 分别为土表面单元 j 处作用单位水平荷载时引起的 i 桩桩顶侧向位移和转角。

2.4 土表面-土表面相互作用柔度系数

由于土体不能承受弯矩, 并且没有转角自由度, 因此, 土表面单元之间的相互作用只考虑竖向力作用下的竖向位移相互作用和水平力作用下的侧向位移相互作用。这样土表面-土表面相互作用柔度系数可表示为

$$\left. \begin{aligned} f_{P_{wij}}^{ss} &= w_{Pij}(0) (i, j=1, 2, \dots, n_s) \\ f_{H_{yij}}^{ss} &= u_{Hij}(0) (i, j=1, 2, \dots, n_s) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $f_{P_{wij}}^{ss}$ 为竖向荷载作用下土表面-土表面竖向位移相互作用柔度系数, $f_{H_{yij}}^{ss}$ 为水平荷载作用下土表面-土表面水平位移相互作用柔度系数; $w_{Pij}(0)$

为土单元 j 作用单位竖向力时在土单元 i 的层状地基的位移基本解; $u_{Hij}(0)$ 为土单元 j 作用单位水平力时在土单元 i 的层状地基的位移基本解。

2.5 多向荷载作用下刚性桩筏基础分析

为了简化计算假定承台为刚性, 对于刚性承台桩筏基础, 桩筏的相互作用不仅通过桩-土体系的相互作用的形式表现, 桩顶和土单元还受到承台的约束而协调各个桩顶和土单元的不均匀位移, 增强其整体性, 由承台的约束条件和每根桩顶部和土单元的平衡条件, 可以得到刚性承台桩筏基础的整体控制矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} f_{Pw} & 0 & 0 & D_w \\ 0 & f_{Hy} & f_{My} & D_y \\ 0 & f_{H\theta} & f_{M\theta} & D_\theta \\ A_P & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_H & 0 & 0 \\ A_M & 0 & C_M & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ H \\ M \\ \delta_w \\ \delta_y \\ \delta_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ P_c \\ H_c \\ M_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: f_{Pw} 、 f_{Hy} 子矩阵为 $(n_s + n_p)$ 阶矩阵; f_{My} 为 $(n_s + n_p) \times n_p$ 矩阵; $f_{H\theta}$ 为 $n_p \times (n_s + n_p)$ 矩阵; $f_{M\theta}$ 为 n_p 阶矩阵;

$$D_w = - \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & x_n \end{bmatrix}_{(n_s+n_p) \times 3}; \quad D_y = - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{(n_s+n_p) \times 3};$$

$$D_\theta = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{n_p \times 3}; \quad x_i \text{ 为沿着水平位移的方向单}$$

元相对转动轴的坐标; $A_P = B_H = [1 \cdots 1]_{1 \times (n_s + n_p)}$, $C_M = [1 \cdots 1]_{1 \times n_p}$, $A_M = [x_1 \cdots x_n]_{1 \times (n_s + n_p)}$; 向量 P 和 H 为 $(n_s + n_p)$ 阶列向量, 分别代表待求的各桩顶和土表面单元的竖向力、水平力; M 为 n_p 阶列向量, 代表待求的各桩顶的弯矩。 δ_w 、 δ_y 和 δ_θ 为未知的承台的竖向位移、水平位移和转角; P_c 、 H_c 和 M_c 为施加在承台顶部的竖向力、水平力和弯矩。对式 (12) 进行求解, 就可以得到各桩顶部的竖向力、水平力、弯矩以及承台的竖向位移、水平位移和转角。

3 算例验证与分析

Kitiyodom 等^[8]曾对图 2 所示的桩筏基础模型分别作用竖向力和水平力时进行了计算分析。

本文将采用上述方法对筏板顶部分别作用竖向力、水平力以及同时作用竖向力与水平力时的桩筏基础进行计算, 并与有限元结果进行对比, 验证本文方法的正确性。同时将选用修正地基模量与选用 Vesic 模量时的计算结果进行对比, 证明了本文所

提出的修正地基模量的优越性。相关的对比结果如图 3、4 所示, 图中各量的含义如下:

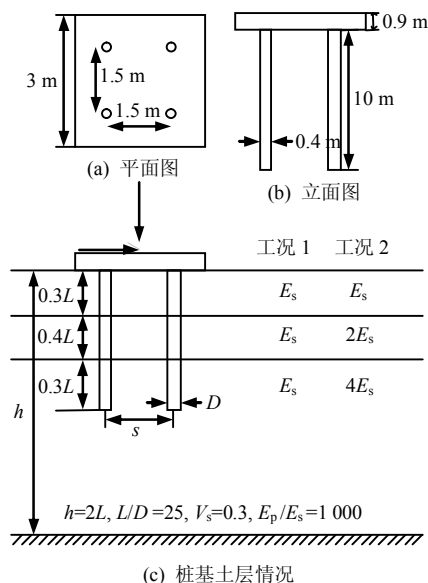


图 2 地基中桩筏基础的示意图

Fig.2 Sketches of piled raft foundation and soil profiles

$$\left. \begin{aligned} I_{wv} &= \frac{wE_s D}{P_c}, C_{av} = \frac{F_v}{P_c} \\ I_{uH} &= \frac{uE_s D}{H_c}, C_{bH} = \frac{F_b}{H_c D}, C_{sH} = \frac{F_s}{H_c} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: F_v 为桩身轴力; F_b 为桩身弯矩; F_s 为桩身剪力; w 为桩身沉降; u 为桩身水平位移。

图 3、4 为竖向力和水平力分别作用下的桩筏基础计算结果。从图 3、4 可看出, 筏板顶部仅作用竖向荷载时本文计算结果与有限元计算结果基本一致, 证明本文方法用于计算竖向力作用下的桩筏基础是合理的。同时, 从图 3(c)~3(e)、4(c)~4(e)中可以看出, 筏板顶部仅作用水平荷载时本文计算结果和有限元计算结果基本一致, 而选用 Vesic 模量时的计算结果与有限元计算结果有较大偏差。

为了探讨多向荷载作用下桩筏基础的特性, 针对图 2 所示的层状地基模型工况 2 同时作用大小相等的竖向力和水平力的情况进行了计算, 并与有限元法的结果进行了对比。图 5 为竖向力和水平力同时作用下桩筏基础计算结果。对比图 4(c)~4(e)和图 5(c)~5(e)可以看出, 竖向荷载对桩筏基础中桩的水平受力和变形特性没有明显的影响; 但从图 4(a)、4(b)和图 5(a)、5(b)可以看出, 水平力对桩筏基础中桩的轴力有很大的影响, 水平力将会使桩筏基础中前后桩轴力和竖向位移发生变化, 即使前桩轴力和竖向位移变小, 也会使后桩轴力和竖向位移增大。

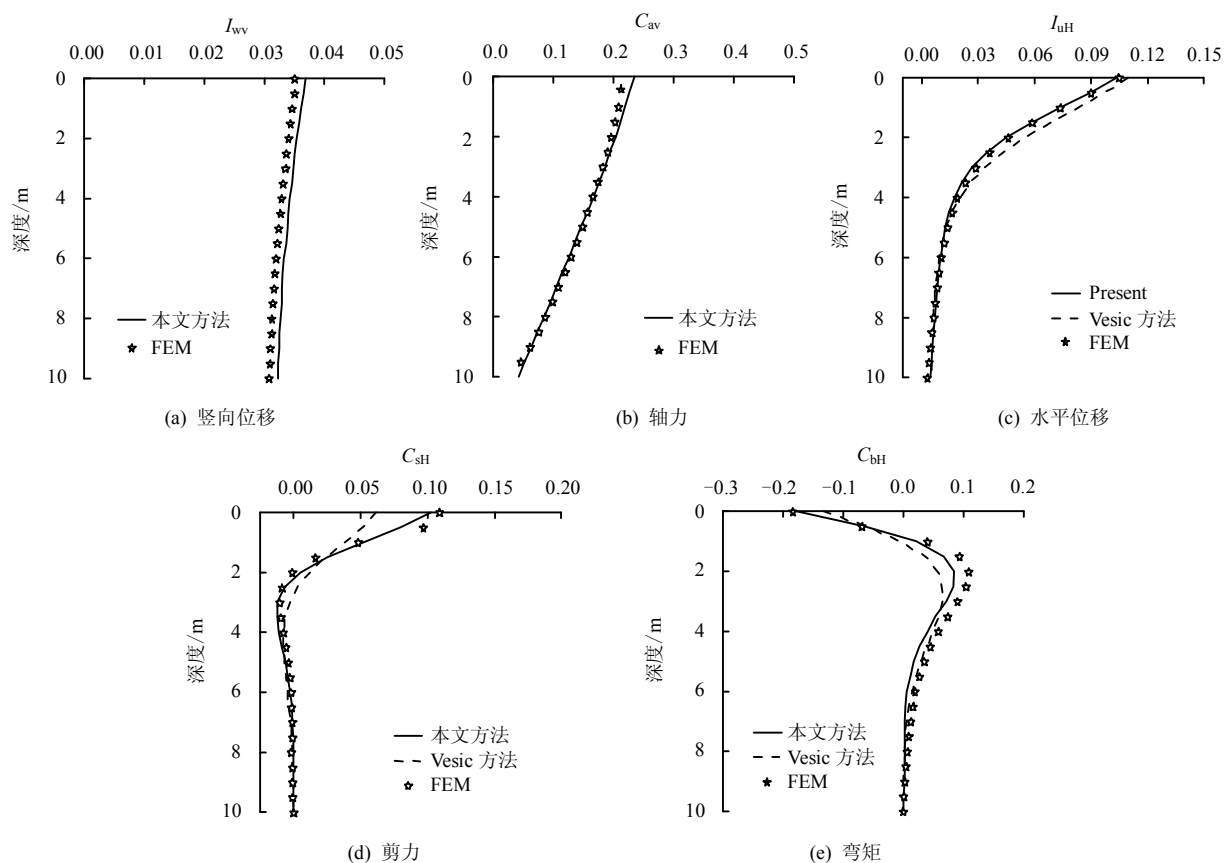


图3 竖向力和水平力分别作用下桩筏基础计算结果 (工况1)

Fig.3 Responses of piles in a piled raft foundation under vertical load or horizontal load (case 1)

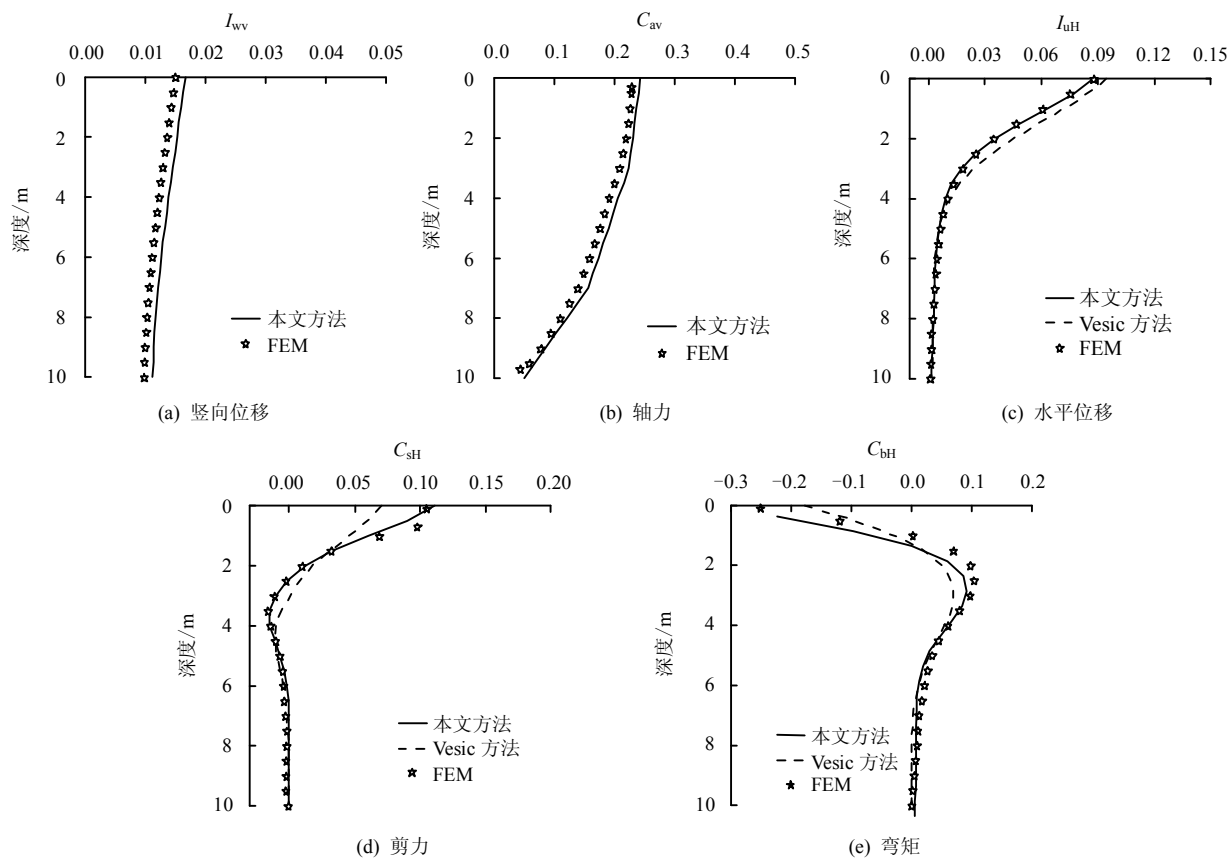


图4 竖向力和水平力分别作用下桩筏基础计算结果 (工况2)

Fig.4 Responses of piles in a piled raft foundation under vertical load or horizontal load (case 2)

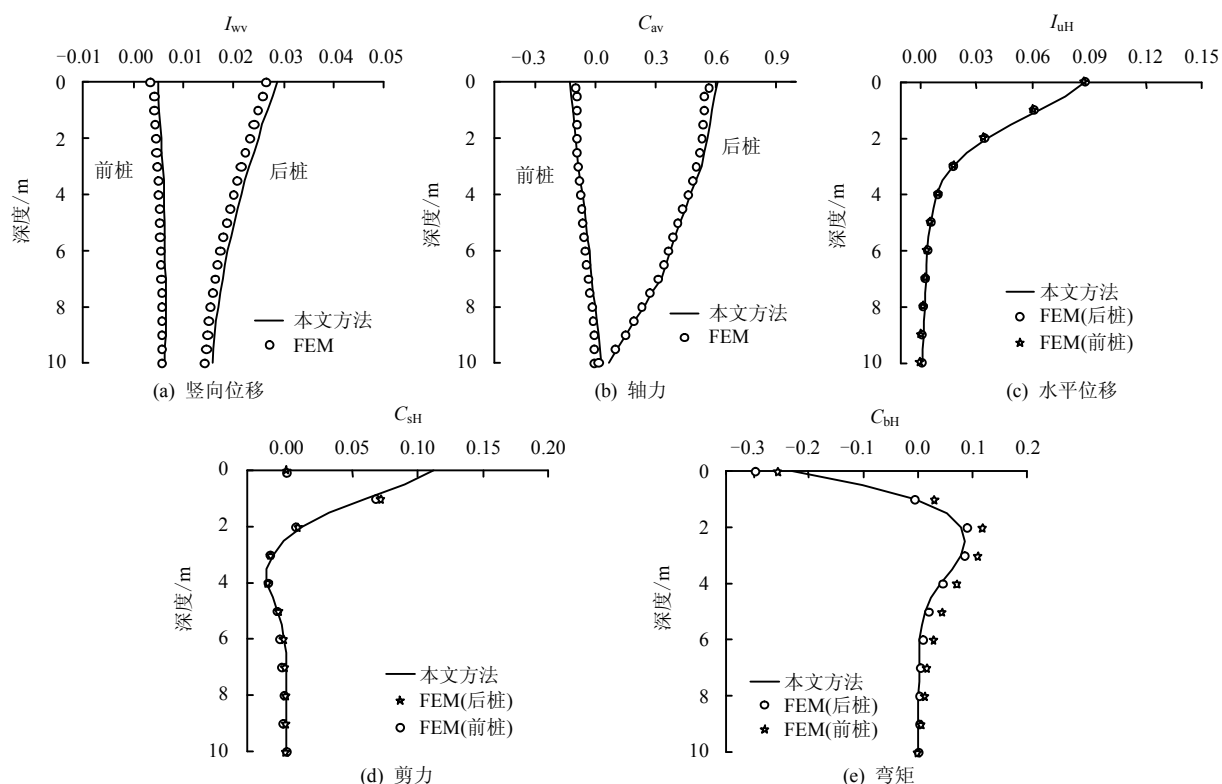


图 5 多向荷载作用下桩筏基础计算结果 (工况 2)

Fig.5 Responses of piles in a piled raft foundation under coupled loads (case 2)

为了系统探讨水平力对桩筏基础的的竖向变形特性的影响, 针对不同水平力作用下的桩筏基础的桩端轴力和竖向变形进行了计算, 如图 6 所示。

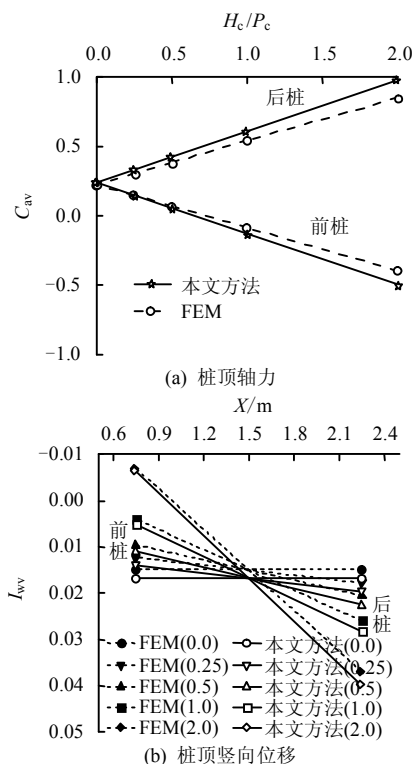


图 6 多向荷载作用下桩筏基础计算结果 (工况 2)

Fig.6 Responses of piles in a piled raft foundation under coupled loads (case 2)

从图 6(a)可以看出, 随着水平力的增大桩筏基础中后桩的轴力逐渐变大, 而前桩的轴力逐渐变小, 并且当水平力增大到一定程度时前桩开始出现受拉现象。从图 6(b)可以看出, 水平力将引起桩筏基础的不均匀沉降, 随着水平力的增大, 前桩竖向位移逐渐减小, 而后桩竖向位移逐渐增大, 从而使桩筏基础倾斜程度逐渐加剧。

4 结 论

本文提出了一种多向荷载作用下层状地基中桩筏基础的计算方法, 通过有限元结果进行对比证明本文方法的正确性, 并得到了如下结论:

(1) 竖向力对桩筏基础的水平变形和受力特性没有明显的影响。

(2) 水平力将会引起桩筏基础的不均匀沉降, 且随着水平力的增大, 前桩位移和轴力逐渐变小, 而后桩位移和轴力逐渐变大, 从而使筏板产生倾斜。

(3) 选用修正桩侧地基模量得出的桩的水平受力和变形较为精确, 而选用 Vesic 模量将会使桩的水平受力和变形产生较大的误差。

参 考 文 献

- [1] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.

- [2] KUWABARA F. An elastic analysis of piled raft foundations in a homogeneous soil[J]. **Engineering Structures**, 1989, 29(1): 81—92.
- [3] MENDONCA A V, PAIVA J B. An elastostatic FEM/BEM analysis of vertically loaded raft and piled raft foundation[J]. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, 2003, 27(9): 919—933.
- [4] SHEN W Y, CHOW Y K, YONG K Y. A variational approach for the analysis of pile group-pile cap interaction[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(4): 349—357.
- [5] 黄茂松, 江杰, 梁发云, 等. 层状地基中桩基础的竖向荷载位移关系非线性分析方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1423—1429.
- HUANG Mao-song, JIANG Jie, LIANG Fa-yun, et al. Nonlinear analysis for settlement of vertically loaded pile foundation in layered soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(10): 1423—1429.
- [6] 江杰, 黄茂松, 梁发云, 等. 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, et al. Analysis of interaction mechanism of piled raft foundation by use of simplified nonlinear model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(1): 112—117.
- [7] 黄茂松, 李波. 往复荷载下层状地基柔性筏板-群桩共同作用分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2388—2394.
- HUANG Mao-song, LI Bo. Analysis of interaction mechanism of flexible raft-piles in layered soils under repeated loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(8): 2388—2394.
- [8] KITIYODOM P, MATSUMOTO T. A simplified analysis method for piled raft foundations in non-homogeneous soils[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2003, 27: 85—109.
- [9] 俞剑, 张陈蓉, 黄茂松. 被动状态下地埋管线的地基模量[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 123—132.
- YU Jian, ZHANG Chen-rong, HUANG Mao-song. Subgrade modulus of underground pipelines subjected to soil movements[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(1): 123—132.
- [10] 艾智勇. 弹性层状理论及其在桩筏基础中的应用研究[D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [11] WONG S C, POULOS H G. Approximate pile-to-pile interaction factors between two dissimilar piles[J]. **Computers and Geotechnics**, 2005, 32: 613—618.

第12届全国渗流力学学术会议(第1轮征文通知)

各科研院所、大专院校及相关单位:

为了推动渗流力学研究成果的交流, 迎接渗流力学发展的新挑战, 促进科研工作者对渗流力学理论与应用的战略思考, 第十二届全国渗流力学学术会议将于2013年8月在青岛召开。欢迎各位专家、学者以及工程技术人员踊跃投稿, 参加本次学术会议, 届时也将邀请国际知名渗流力学专家与会交流。具体事宜如下:

主题: 渗流力学进展与挑战

主办单位: 中国力学学会、中国石油学会

承办单位: 中国石油大学(华东)

协办单位: 中科院渗流流体力学研究所

征稿范围: (1) 渗流力学新进展、新挑战与思考; (2) 能源开发中的渗流力学; (3) 岩土、水利工程中的渗流力学; (4) 环境科学与化工中的渗流力学; (5) 生物医学中的渗流力学; (6) 多孔介质传热与传质分析; (7) 多尺度、多物理场渗流力学; (8) 渗流物理实验方法与技术; (9) 计算渗流力学。

时间与地点: 2013年8月在中国石油大学(华东)举行, 地点山东省青岛市。

征文要求: 录用论文以论文集形式出版, 论文格式以《中国石油大学学报》(自然科学版)要求为准, 部分优秀论文将由《中国石油大学学报》(自然科学版)(EI源刊、中文核心期刊)2013年增刊出版。来稿恕不退还, 请自留底稿。此外, 本次会议将遴选优秀学生论文奖给予奖励。

时间安排: (1) 第1轮通知(征文通知): 2012年11月20日; (2) 提交摘要截止日期: 2013年2月28日; (3) 第2轮通知(摘要录用): 2013年3月30日; (4) 提交全文截止日期: 2013年4月30日; (5) 论文修改截止日期: 2013年5月30日; (6) 第3轮通知: 2013年6月30日。

会务联系: 缪青维 电话: 0532-86981701 Email: shenliu2013hw@126.com

学术联系: 黄朝琴(15588988009)、孙海(15063975865) Email: shenliu2013tg@126.com

会议网址: <http://121.251.254.69:346/index.asp>