

流体动力干扰对桩柱矩阵阵列波浪力的影响*

余志兴 缪国平 刘应中 张怀新

(上海交通大学船舶及海洋工程系, 上海 200030)

摘 要 随着超大型海洋结构物的设计和研究日益受到重视, 研究多物体之间的流体动力干扰特性显得十分必要. 用波动源在截面周线上分布的方法, 就垂直桩柱间三维流体动力干扰对波浪力的影响进行了系统的研究, 不仅可得到单行柱列的流体动力干扰力学机理的新特性, 而且对多行桩柱阵列的研究也取得了若干新的发现: 多行桩柱阵列的遮蔽作用强于单行的; 无论是单行还是多行柱列, 其流体动力干扰特性存在一个十分敏感的来波频段, 在此区域内, 力的幅值会大大超过其他频域的受力, 而且桩柱阵列与交错阵列的力学特性也有所不同. 这对超大型海洋结构物的设计有着重要的指导意义.

关键词 流体动力干扰 波浪力 柱列

1 引言

超大型海洋结构物往往表现为大量的脚柱体结构, 同时涉及到复杂的多个物体的流体动力干扰问题. 由于受计算工作量和计算机容量的限制, 即便应用基于线性势流理论的三维源汇分布法^[1]也只能考察几个物体间的干扰^[2,3], 不能有效地推断几十个甚至几百个物体间的流体动力干扰特性. 因此, 发现和研究这些复杂的结构之间的流体动力干扰作用, 对工程上的设计和应用有着重要的指导作用.

Maniar 和 Newman^[4]针对下端固定、上端伸出水面的柱列进行了计算, 他们采用样条-Galerkin 方法进行求解, 得到了令人颇感兴趣的结果: 当波浪沿着柱列连线的方向传播时, 在某一特定频率下, 中间一些柱受到的波浪力可有几十倍的增加; 当波浪沿着垂直于柱列连线的方向传播时, 由于柱间的流体动力干扰, 柱体除了受到沿波向的波浪力之外, 在连线方向上还受到波浪力的作用, 而且柱数为偶数 (100根) 和奇数 (101根) 时, 柱列上该方向力的分布形态完全不一样. Maniar 和 Newman 把这一现象归之为所谓的“俘获波”影响^[5]. 这些结论牵涉到对多体间流体动力干扰本质的认识和对一些特殊物理现象的解释, 同时对多柱结

本文于1997-01-13收到, 修改稿于1997-05-06收到.

* 国家自然科学基金资助项目 (编号: 19732004).

第一作者简介: 余志兴, 男, 27岁, 硕士, 博士研究生, 从事水波与结构物相互作用方面的研究.

构的设计思想也会带来重大的影响. 尽管垂直柱群是一种相当特殊的结构形式, 但它们之间的流体动力干扰机理对其他形式结构有重要的借鉴和指导意义.

针对这个问题, 文献[6]就垂直桩柱三维流体动力干扰对波浪力的影响作了系统的研究. 对这一方法缪国平和刘应中引进了局部扰动源, 因此它可处理任意截面形状的桩柱的水弹性振动问题^[7]以及多柱的波频振动和地震作用下的高频振动问题^[8]. 由于该方法采用垂直方向的特征函数展开, 从而将三维问题化成截面周线上的二维问题求解, 数值离散时物面分块数可大幅度提高, 提高了求解精度, 同时在一般的 PC 机上即可将计算的物体数目提高到100余根. 文献[6]对单列柱群所得的结果与 Maniar 和 Newman 的结果不尽相同. 在文献[4]中在柱体受力激增的特定波浪频率上, 并无此现象出现; 相反, 在该频率上发现了十分有趣的首柱遮蔽效应. 对横向来波, 当桩柱数目很大时, 无论奇数还是偶数, 中间大部分桩柱都表现出均匀的受力特征. 这些特性的发现和对它的重新认识, 对多体间流体动力干扰的机理研究有十分重要的意义.

本文沿用文献[6]的方法, 进而考察了流体动力干扰对桩柱阵列波浪力的影响, 这些阵列的布局可以是矩阵排列或是交错排列. 我们发现, 桩柱矩阵阵列与交错阵列的力学特性也有所不同, 并且与单列柱群相仿, 对于多行柱列也存在一个十分敏感的来波频段, 在此区域内, 波浪频率小的变化可以导致流体动力干扰特性显著的改变, 桩柱所受的波浪力的幅值可以有很大的变化. 研究这些力学现象对超大型海洋结构物的设计显得十分重要.

2 理论与数值方法

在水深为 H 的等深水域中布置有 $M (\geq 1)$ 个大尺度任意截面的垂直桩柱, 底端固定, 上端伸出水面, oxy 坐标系取在静水面上, oz 轴垂直向上, 考虑流体是理想不可压缩的, 流动无旋, 则根据线性波浪理论, 存在速度势 $\Phi(x, y, z, t)$. 可以把速度势分解为入射波速度势和绕射势. 若入射波波幅为 A , 频率为 ω , 传播方向与 ox 轴的夹角为 α , 则入射波速度势 Φ_i 可表示为

$$\Phi_i(x, y, z, t) = \frac{\cosh k(z+H)}{\cosh kH} \varphi_i(x, y) e^{-i\omega t}, \quad (1)$$

$$\varphi_i(x, y) = -\frac{igA}{\omega} e^{-ik(x\cos\alpha + y\sin\alpha)}, \quad (2)$$

式中, k 为入射波波数, 满足色散关系:

$$\omega^2 = gk \tanh kH. \quad (3)$$

绕射势可相应地写成

$$\Phi_d(x, y, z, t) = \frac{\cosh k(z+H)}{\cosh kH} \varphi_d(x, y) e^{-i\omega t}, \quad (4)$$

式中, φ_d 满足二维 Helmholtz 方程:

$$\frac{\partial^2 \varphi_d}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_d}{\partial y^2} + k^2 \varphi_d = 0, \quad (5)$$

它的基本解为

$$G(P, Q) = i\pi H_0^{(1)}(kr), \quad (6)$$

$G(P, Q)$ 可称之为波动源; $H_0^{(1)}$ 为零阶第一类 Hankel 函数; $P(x, y)$ 和 $Q(\xi, \eta)$ 分别为场点和

源点; $r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$ 为场点到源点的距离. 波动源 $G(P, Q)$ 满足外传波的辐射条件, 在 $r \rightarrow 0$ 时, 具有 $\ln r$ 型的奇异性. 令 $\sigma(Q)$ 为源强分布密度, 则

$$\varphi_a(x, y) = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^M \int_{C_i} \sigma(Q) G(P, Q) dl, \quad (7)$$

式中, C_i 为第 i 根桩柱截面的周线. 这样绕射问题中的总速度势 $\Phi(x, y, z, t)$ 可记为

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, z, t) &= \Phi_i + \Phi_d \\ &= \frac{\cosh k(z+H)}{\cosh kH} \left[-\frac{iAg}{\omega} e^{-ik(x\cos\alpha + y\sin\alpha)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^M \int_{C_i} \sigma(Q) G(P, Q) dl \right] e^{-i\omega t}. \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)满足的物面条件是在柱面上

$$\frac{\partial(\varphi_a + \varphi_i)}{\partial \vec{n}} = 0, \quad (9)$$

式中, $\partial/\partial \vec{n}$ 指对柱面内法线矢量方向的偏导. 按这一物面条件可以得到决定源强 $\sigma(Q)$ 的第二类 Fredholm 积分方程, 并可按文献 [9] 中的离散化方法求解. 一旦求得源强, 可按式(8)得到流场中的速度势.

由 Bernoulli 方程可得流场中任意一点的动压力 $p(x, y, z, t)$:

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho i \omega \Phi(x, y, z, t). \quad (10)$$

将压力沿物面积分可得作用在柱体上的流体作用力:

$$\vec{F}_i e^{-i\omega t} = \rho i \omega \int_{-H}^0 dz \int_{C_i} \Phi(x, y, z, t) \vec{n} dl, \quad (11)$$

式中, F_i 为第 i 个柱体所受的流体作用力复数幅值; \vec{n} 为物面单位内法线矢量.

3 计算结果分析

为验证本文计算方法的可靠性, 我们采用与文献 [6] 相同的方法进行验证, 即对单根桩柱进行计算(图1)和对四方阵浪向角为 $\alpha = 45^\circ$ 时的情况与文献 [2] 相比较(图2), 并考察4根柱的桩柱列在不同浪向角应具有的对称性进行比较, 具体可参见文献 [6].

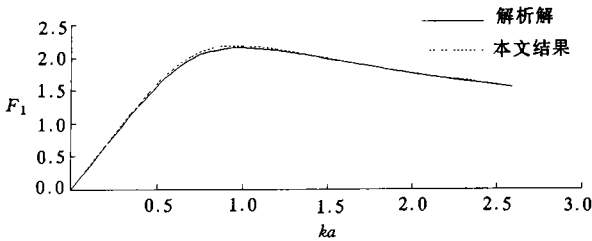


图1 单根桩柱所受的波浪力

本文对圆柱型桩柱矩阵阵列 $N = N_r \times N_c = 2 \times 40, 3 \times 40$ 以及交错阵列 $N = 3 \times 40 - 1$ (其中中间一行桩柱数为39) 作了计算, 桩柱的分布排列见图3, 其中取 $R_1 = R_2 = 4a$, 这里 a 为圆柱的半径. 在本文的计算中, 采用常数边界单元, 对每个桩柱截面沿周向等分成20块单元, 由于本文将三维问题转化成二维问题, 故沿水深方向不再需要划分, 对阵列总柱数为 N 的问题, 划分单元共为 $20N$ 块, 因此大大减小了计算机的内存开销, 而且与三维源汇法相比, 分块数可大幅度提高, 波浪力沿垂向的分布无数值离散的误差, 从而提高了求解精度.

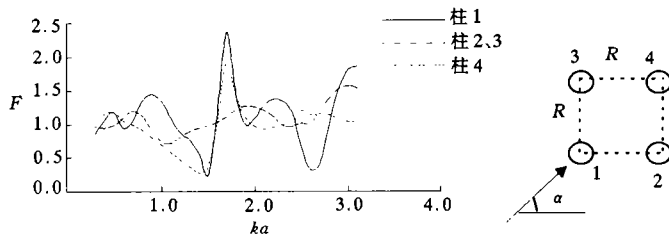


图2 作用在4根柱上沿波浪方向力的幅值

$$a/h=1/2, R/h=2, \alpha=\pi/4$$

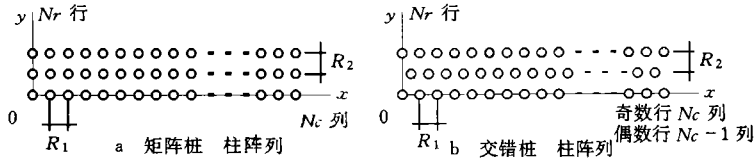


图3 桩柱的布置示意图

在文献 [6] 的单柱列计算中, 浪向角 $\alpha=0^\circ$ (或 90°) 时, 则 y (或 x) 方向不受干扰. 与此不同, 桩柱阵列的每根桩柱将在 x 和 y 方向上均受其他桩柱的干扰. 计算结果如图4~6. 本文在一张图中同时绘制了桩柱在 x 和 y 方向的受力曲线. 图中的垂直虚线将桩柱按行数分割开来, 即第一根虚线之左为第1行桩柱, 之右为第2行桩柱, 依此类推. 力的无因次化因子采用 $2\rho gAH \tanh(kH)/kH$, 这样的无因次化将水深的影响除掉了, 有利于结果的比较. 图4~6中当 $\alpha=0^\circ$ 时, 由于桩柱排列的对称性, 每张图中左右两边的受力相同, 表现出对称性; 在 $\alpha=90^\circ$ 的图中, 每张图的左、中和右图均表现为自相对称性.

图4a 为 $ka=0.5236$ 时 2×40 根桩柱分两行的计算, x 和 y 方向的力均表现为中拱, 只不过 x 方向的力的幅值大很多, 说明沿波的横向柱间干扰比较小; 图4b 和 c 均呈文献 [6] 所述各柱受力以 $1/\sqrt{x}$ 衰减的趋势, 而 $ka=0.6954$ 时却未出现文献 [6] 所述的后方某根柱上在波浪力降为0的特殊现象, 这可能是由于偶数行的影响, 使遮蔽作用超过了某一临界状态, 后文奇数行的计算结果证实了这一点. 图4d、c 和 f 为 $\alpha=90^\circ$ 时的计算结果. 此时, y 方向的力为阶梯形变化, 在同一行上的桩柱受力平均, 后一行受前一行的遮蔽影响而受力减小, 且随 ka 增大而减小.

图5为 3×40 阵列的计算结果. $\alpha=0^\circ$ 时中间一行由于桩柱布置的对称影响, y 方向力全部为0. 和 2×40 阵列不同, 当 $ka=0.6954$ 时, 出现了文献 [6] 所述的特殊现象: 后方某根柱上波浪力几乎降为0, 但由单行柱的第15根附近提前到第8根附近, 即第1行和第3行在第8根附近前方桩柱遮蔽作用达到最强, y 方向的力则变化平缓. 有趣的是, $ka=0.7854$ 时, y 方向的力也表现出 $ka=0.6954$ 时 x 方向的力的特征. 图5d~f 为 $\alpha=90^\circ$ 的结果. 由图可见, 随着 $ka=0.5236$ 变化到 0.7854 的过程中, y 方向的力减小, 而中间桩列的受力逐渐趋近于第3行桩柱的受力. 这可能是由于此时波长减小到一定程度后, 遮蔽作用由最大开始稍减, 并趋于稳定的缘故. x 方向的力并未有太大变化. 在 $ka=0.6954$ 时, 左图和右图的力幅值稍稍增大, 呈中拱形, 表现 $ka=0.6954$ 时力的幅值变化最明显.

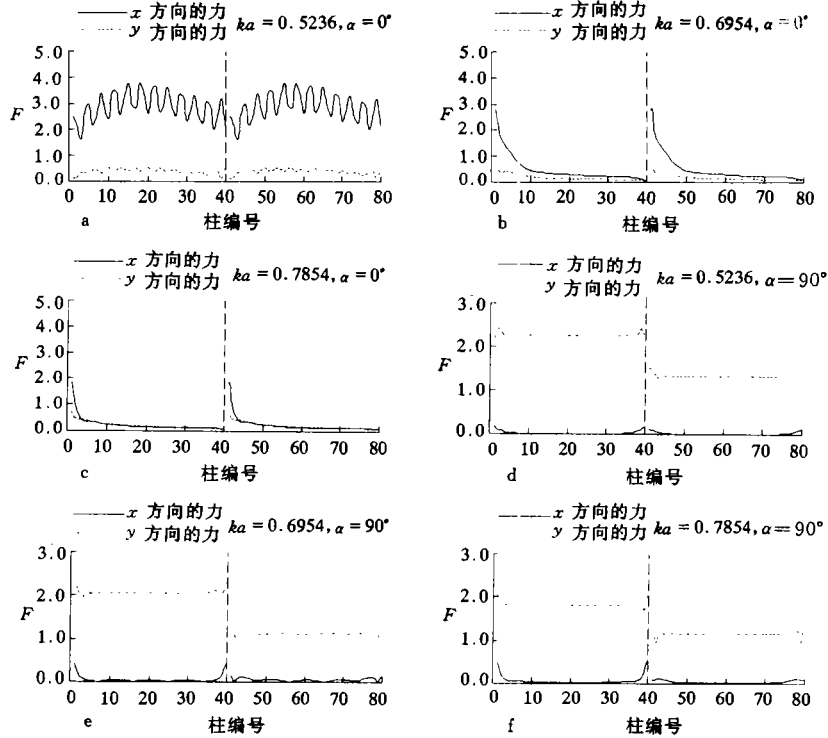


图4 2x10桩柱阵列的受力曲线

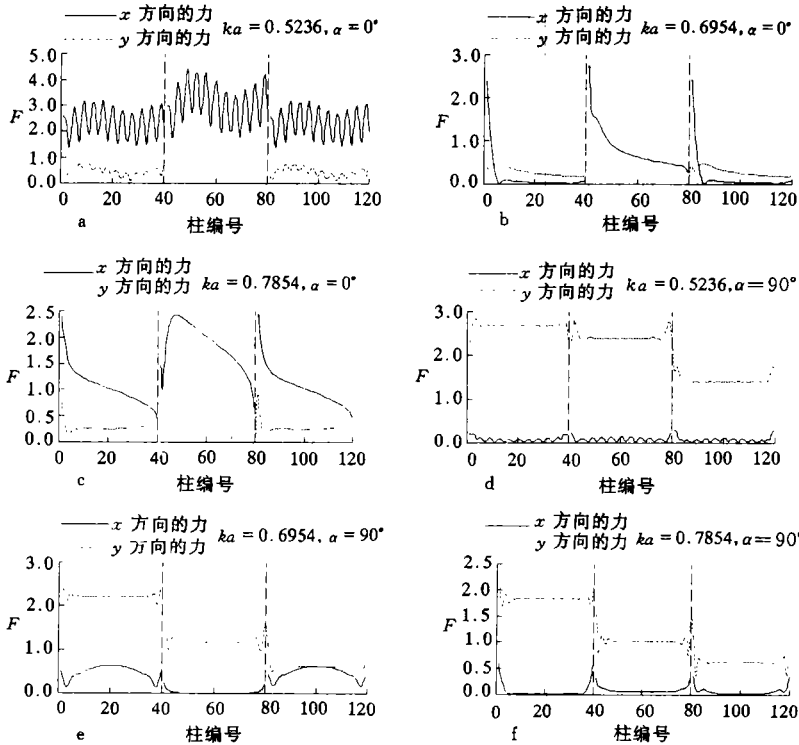


图5 3x10桩柱阵列的受力曲线

图6为交错阵列的计算结果,同前面的图一样, $\alpha=0^\circ$ 时,由于对称性,第2行桩柱 y 方向的力为0.当 $ka=0.6954$ 时, x 方向出现了较大的波动,尤其是第2行桩柱的受力,其峰值远大于第1、3行桩柱受力,并且由于位置交错影响,其变化趋势和第1、3行桩柱也完全不同,而当 $ka=0.7854$ 时,遮蔽的作用在第2行桩柱表现最为明显,后方几乎全部趋于0.这说明由于交错柱列之间相互影响,使中间行桩柱在后方柱上的影响几乎完全被屏蔽.

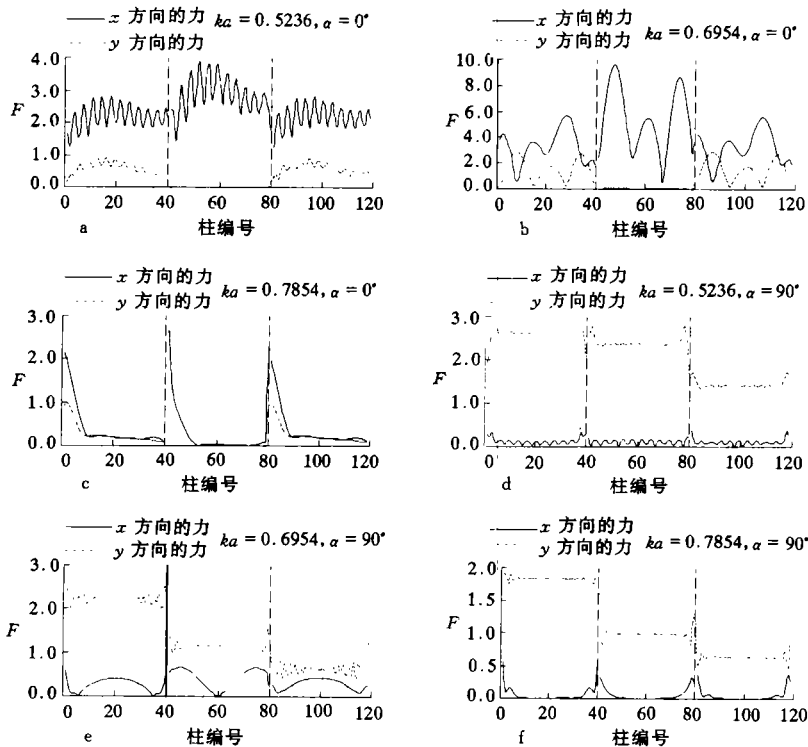


图6 3×40 交错阵列的受力曲线

图6d~f为 $\alpha=90^\circ$ 时的结果,除了图5d~f中的规律外, y 方向的力在整个排列方向上有较大的波动,特别是图6e, $ka=0.6954$ 时,尽管在中央都趋于平均,但第1、3行桩柱两端波动较为剧烈,由于交错布置的影响,第2行桩柱波动平缓. x 方向的力也表现特别,交错阵列横向影响此时相对较大,第1、3行桩柱上都是对称的中拱性,而第2行却为中凹,出现了文献[4]中提及的现象,即奇数根排列中央凹下两边翘起,偶数根排列中央拱起.由以上各图均可看出, $ka=0.6954$ 附近是一个敏感的频率区域,在该区域内波浪力幅值及其在各柱上的分布形态对频率变化的依赖性十分显著.

4 结论

基于文献[6]的方法,本文深入地考察了桩柱阵列间的流体动力干扰波浪力,桩柱数目可达100余根,得到以下结论:

4.1 对于纵向来波,多行和单行阵列有类似的特征,但多行阵列的遮蔽作用更为明显.

4.2 交错阵列和矩阵阵列对横向波的平均遮蔽作用差别不大,但交错阵列会在柱列两端出现

较大的波动.

4.3 存在一个来波频段,在此范围内波浪干扰力变化十分敏感,甚至会超出一般情况下的几倍,这对工程上的设计尤其具有特殊意义.

采用什么样的阵列布置方式,才能使得柱列有最大的遮蔽作用,并在工程上得以应用,这个问题仍有待研究.

参考文献

- 1 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论. 上海: 上海交通大学出版社, 1987
- 2 Linton C M, Evans D V. The interaction of waves with arrays of vertical circular cylinders. *J. Fluid Mech.*, 1990, **215**, 549~569
- 3 MacCamy R C, Fuchs R A. Wave forces on piles: a diffraction theory, U. S. Army Corps of Engineering, Beach Erosion Board. Tech. Memo., 1954, (69): 1~40
- 4 Maniar H D, Newman J N. Wave diffraction by long array of circular cylinders. In: *The Eleventh Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Hamburg, 1996, 17~20
- 5 Callan M, Linton C M, Evans D V. Trapped modes in two-dimensional wave guides. *J. Fluid Mech.*, 1991, **229**, 51~64
- 6 Miao Guoping, Yu Zhixing, Miao Q M *et al.* On hydrodynamic interaction upon the wave forces on vertical pile array. In: *Proceedings of China-Korea Marine Hydrodynamics Meeting*, Editorial Board of Shipbuilding of China, Shanghai, 1997, 168~178
- 7 Isaacson M de St Q. Vertical cylinders of arbitrary section in waves. *J. Waterway Port Coastal and Ocean Div.*, ASCE, 1978, **104** (WW4): 309~324
- 8 缪国平, 刘应中. 任意截面大尺度垂直柱体的波浪力和水动作用力. *海洋学报*, 1991, **13**(5): 728~736
- 9 Miao Guoping, Liu Yingzhong, Mi Z X. Computation of hydrodynamic forces on vibrating multiple large vertical cylinders of arbitrary section. *Marine Structures*, 1993, 279~294.

On effects of hydrodynamic interaction on wave forces on pile arrays of multiple rows

Yu Zhixing,¹ Miao Guoping,¹ Liu Yingzhong,¹ Zhang Huaixin¹

1. *Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030*

Abstract—Much attentions have been paid on the study of hydrodynamic interaction between multiple objects which is known as an important factor in the design and study of super-large offshore structures. A systematic study has been carried out on the interaction effects of three-dimensional wave forces on vertical pile arrays by using the wave source distribution method. Not only can the properties of hydrodynamic interaction of single row piles be got, but also some new discoveries are found for the pile arrays of multiple rows. It is found that the shield effect of multiple rows is larger than single one. There is a sensitive wave frequency range in which the variation of the wave forces will probably much larger than those in the other frequency range. The mechanical characteristics for the matrix-like pile arrays are different from those for the staggered pile arrays. Those discoveries may give important guidance to the design of the super-large offshore structures.

Key words Hydrodynamic interaction, wave force, pile array