

# 流体动力干扰对单排圆柱桩列 波浪力的影响<sup>1)</sup>

缪国平 余志兴 缪泉明\* 刘应中 张怀新

(上海交通大学船舶与海洋工程系, 上海 200030)

\* (中国船舶科学研究中心, 无锡 214001)

**摘要** 多物体之间的流体动力干扰特性对超大型海洋结构物的设计和研究十分重要。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,桩柱的数目可达 100 余根。得到了柱间流体动力干扰力学机理的若干新的特性。尤应指出的是,当桩柱根数超过某一数量后,桩柱上的受力表现出有规律连续依赖性。当柱数很大时,无论柱数是奇数还是偶数,中间大部分的桩柱都将表现出均匀的受力特征。这些特性的发现对其他形式多体结构物流体动力干扰的研究也有重要的借鉴和指导意义。

**关键词** 流体动力干扰,波浪力,柱列,超大型结构物,波动源

## 前 言

作为人类征服海洋努力的一部分,超大型海洋结构物的设计和研究日益受到人们的重视。超大型海洋结构物多由单体拼接而成,各单体可以是方驳型的,也可以是半潜式的。半潜式单体的水下浮力部分可以由若干圆柱型的脚柱组成。一个这样的超大型海洋结构物,其脚柱数量可达几百个之多。因此,关于多物体之间的流体动力干扰的研究显得十分重要。

若基于线性的势流理论,三维源汇分布法原则上可以用来研究这一问题<sup>[1]</sup>。然而,由于计算工作量和所需计算机容量的庞大,这方面的研究受到极大的限制。已有的结果大多限于几个物体<sup>[2]</sup>,由此仍很难推断几十个乃至上百个物体间的流体动力干扰特性。近来,Maniar 和 Newman 采用三维样条 - Galerkin 面源法计算了多达 101 根的单排垂直圆柱柱列在规则波中的受力<sup>[3]</sup>。这些桩柱下端固结于水底,上端伸出水面。他们的研究结果显示了桩柱间流体动力干扰的某些特征。特别令人感兴趣的是,他们强调,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,在连线方向上也受到波浪力的作用,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<sup>[4]</sup>。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,也会对多柱结构的设计思想带来重大的影响。尽管垂直柱群是一种相当特殊的结构形式,但它们之间流体动力干扰的机理对其他形式结构物体应有重要的借鉴和指导意义。对此进行深入的研究是有价值的。

<sup>1)</sup> 国家自然科学基金资助项目。

1997 - 03 - 14 收到第一稿, 1998 - 03 - 30 收到修改稿。

对垂直桩柱这类特殊的结构形式, MacCamy 和 Fuchs 曾基于特征函数展开法给出了单根圆柱型桩柱波浪力的解析表达<sup>[5]</sup>, 文献[2]中将其推广来计算四根和八根圆柱型桩柱群相互干扰时的波浪作用力. 对任意截面形状的桩柱, Isaacson 用波动源在截面周线上的分布给出了桩柱三维波浪载荷的求解方法<sup>[6]</sup>. 缪国平和刘应中引进了局部扰动源, 可处理任意截面形状的桩柱的水弹性振动问题<sup>[7]</sup>; 这一方法还可进而用于求解多柱的波频振动和地震作用下的高频振动问题<sup>[8]</sup>.

本文中, 我们沿用文献[6]和[8]提出的波动源在截面周线上分布的方法, 就垂直圆柱型桩列间三维流体动力干扰对波浪力的影响进行了系统的研究, 桩柱的数目可达 100 根以上, 得到了柱间流体动力干扰的若干新的特性. 其中尤应指出的是, 当桩柱根数超过某一数量后, 桩柱上的受力可表现出有规律连续依赖性; 与 Maniar 和 Newman 的结论不同, 我们的结果并未显示出有特殊波频下柱体受力激增的现象, 而且, 当柱数很大时 (无论柱数是奇数还是偶数), 中间大部分的桩柱都将表现出均匀的受力特征. 这些特性的发现和重新认识不仅对文中处理的柱列本身, 对其他形式多体结构物流体动力干扰的研究事实上也有重要的借鉴和指导意义.

## 1 问题的提法和求解方法概述

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, 根据线性波浪理论, 存在速度势  $\phi(x, y, z, t)$ . 它可以分解为入射波速度势和绕射势. 若入射波波幅为  $A$ , 频率为  $\omega$ , 传播方向与  $OX$  轴的夹角为  $\theta$ , 则入射波速度势可表示为

$$\phi_I(x, y, z, t) = \frac{\cosh k(z+H)}{\cosh kH} \phi_I(x, y) \exp(-i\omega t) \quad (1)$$

$$\phi_I(x, y) = -\frac{igA}{\omega} \exp[-ik(x\cos\theta + y\sin\theta)] \quad (2)$$

其中,  $k$  为入射波波数, 满足色散关系

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

而绕射势可相应地写作

$$\phi_D(x, y, z, t) = \frac{\cosh k(z+H)}{\cosh kH} \phi_D(x, y) \exp(-i\omega t) \quad (4)$$

其中,  $\phi_D$  满足二维 Helmholtz 方程

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

它的基本解为

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

可称之为波动源,  $H_0^{(1)}$  为零阶第一类 Hankel 函数.  $P(x, y)$  和  $Q(x, y)$  分别为场点和源点,  $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$  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  $r \rightarrow \infty$  时, 具有  $\ln r$  型的奇异性. 令  $\rho(Q)$  为源强分布密度, 则

$$\phi_D(x, y) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^M \frac{\rho(Q_i)}{c_i} G(P, Q_i) \quad (7)$$

其中,  $C_i$  的桩柱截面的周线. 因此绕射问题中的总速度势  $(x, y, z, t)$  可记为

$$\begin{aligned} \phi(x, y, z, t) = & \phi_I + \phi_D = \\ & \frac{\cosh k(z+H)}{\cosh kH} \left[ -\frac{A g}{\omega} \exp[-ik(x \cos \alpha + y \sin \alpha)] + \right. \\ & \left. \exp(-i\omega t) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

它满足的物面条件是在柱面上

$$\frac{\partial(\phi_D + \phi_I)}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

其中,  $\frac{\partial}{\partial n}$  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  $(Q)$  的第二类 Fredholm 积分方程. 由于速度势沿水深方向的变化已经分离出来, 求  $(Q)$  的积分方程完全是  $(x, y)$  平面上的二维问题, 它可按文[8]中的离散化方法求解. 一旦源强求得, 可按(8)式得到流场中的速度势.

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

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

将压力沿物面积分可得作用在柱体上的流体作用力

$$F_i \exp(-i\omega t) = i\omega \int_{-H}^0 \int_{C_i} \phi(x, y, z, t) n dl \quad (11)$$

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

## 2 计算结果与讨论

作为方法的考核, 用本文方法得到的单根圆柱桩上波浪力的计算结果与解析解(见文[5])的比较见文[8]. 为进而确认按上述方法的程序在多柱情况下计算的可靠性, 我们选择了如图 1(a) 所示的 4 柱情况作为考核的基础, 图中各柱具有相同的半径, 波浪方向与  $x$  轴方向夹角  $\alpha = \pi/4$ , 柱体间距  $R/a = 4$ , 水深  $H/a = 10$ . 图 1(b) 中分别列出了以不同方法计算得到的第一桩柱上所受波浪力, 以资比较. 为了便于数据比较, 这里采用与文[2]相同的无量纲化因子, 即:  $4ga \tanh kH / [k^2 H_1(ka)]$ . 图中实线为本文的计算结果, 点划线为缪泉明用中国船舶科学研究中心开发的三维源汇分布法<sup>[11]</sup>得到的计算结果, 在三维源汇分布法中, 每一桩柱周向 20 等分, 垂向 6 等分, 计 120 块面元. 从比较的结果来看, 这两种方法计算结果的整体趋势基本是一致的, 特别在  $ka < 2.3$  时两者吻合程度十分良好, 可以确证本方法的可靠性; 在  $ka > 2.3$  的高频范围, 两者在数值上存在一定的差异, 这些差别或可归结为分块离散造成的误差. 我们认为, 本文采用的方法在垂向直接用解析表达, 避免了垂向分块, 计算精度应高于三维源汇分布法. 而文[2]中提出的方法, 继承了 McIver 和 Evans (1984)<sup>[10]</sup>的工作, 其解法中包含对高阶 Hankel 函数的求解, 级数截断项数取为 6 项, 由图 1 可看出, 文[2]在同年发表的更正结果<sup>[11]</sup>与本文非常一致.

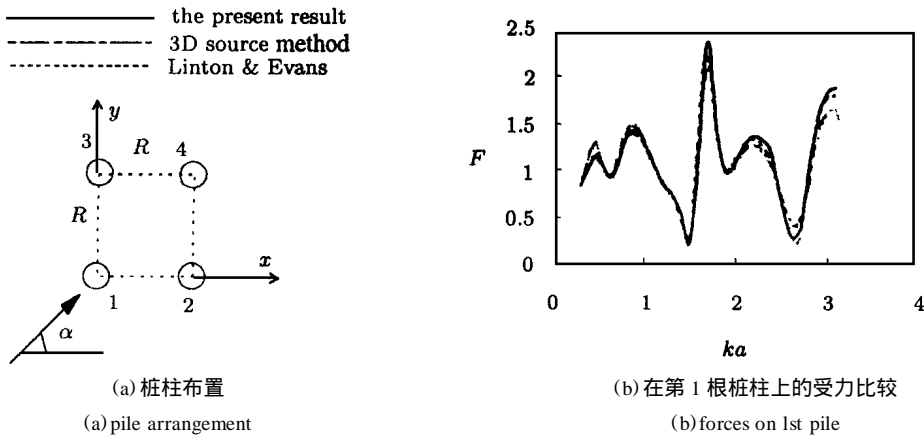


图1 作用在4根柱上沿波浪方向力的幅值( $a/H=1/2$ ,  $R/H=2$ ,  $\alpha=45^\circ$ )

Fig. 1 Force upon 4 piles along wave direction ( $a/H=1/2$ ,  $R/H=2$ ,  $\alpha=45^\circ$ )

经过以上验证后,对沿  $x$  轴成直线排列的圆柱型桩列在不同浪向和频率下所受的波浪力进行了系统的计算,以考察柱间的流体动力影响.柱数可达 100 根以上,各柱具有相同的半径,柱间的距离相同,取为 4 倍柱半径,水深为  $H/a=10$ . 采用的无因次化方法与单柱的表达式相同.当桩柱的数目为  $M$  时,总的单元数目为  $20M$ . 由于本文将三维问题转化为二维问题,故不必在水深方向再划分网格,从而大大地减少了对计算容量的需求,并提高了计算的精度.图 2 为迎浪时( $\alpha=0$ )取  $ka$  为  $\pi/6, 0.6954, \pi/4$  和  $\pi/2$  时力的幅值沿柱列的分布状态,柱数为 100,其中一号柱对应迎浪的第一根桩柱.作为比较和考证,我们同样用中国船舶科学研究中心开发的三维源汇分布法计算了 100 根桩柱在迎浪状态时的波浪力.如前所述,每柱分成 120 块面元,总的面元数达 12000 块.为简单计,我们仅在图 2(b)中以连续曲线形式给出用三维源汇分布法计算得到的波浪力幅值沿柱列的分布,以资比较.总体来说,三维源汇分布法的计算结果与本方法的结果在数值范围与趋势上十分接近,进一步考核了本方法的有效性.

图 2(a)体现了波长较长时力的幅值沿柱列平缓变化,而相位为有规律的线性变化,说明尽管在长波时柱间存在干扰,但前柱的遮蔽作用不明显.图 2(b)中力在前 15 根柱中迅速减小,而后柱力的变化非常平缓.对较短波长,图 2(c)和 2(d)显示出力的变化趋势如同[3]中提到的  $1/\sqrt{x}$  规律衰减,即: Faltinsen<sup>[9]</sup>用渐近匹配的展开方法所得结果.这些结果表明,迎浪侧桩柱有遮蔽效应.

和文[3]的结果相比较,发现波浪力趋势的变化在  $ka$  为  $\pi/6, \pi/4$  和  $\pi/2$  时基本上相同,数值上的差异由无因次化因子不同所致.明显不同的是  $ka=0.6954$  时的结果.文[3]中的计算结果为柱列两端受力低落,而中央却凸起,力的幅值成几十倍地增加.本文的计算结果与之截然不同(图 2(b)).在这个特定的频率下,可直观地看到前方桩柱对后方的遮蔽作用一开始非常明显,但这一遮蔽效应局限于某一范围,该范围之外,这种作用趋于平均化,因此后方桩柱上的力变化平缓.这一现象同样见诸于  $ka$  为  $\pi/4$  和  $\pi/2$  的情况.可以设想:当柱数  $M$  时,则越向后,桩柱的受力变化就越小,而在文[3]中,这种遮蔽作用似乎消失了,而换之以  $M$  时相当于俘获波(trapped Wave)来解释.

图3为100根和101根桩柱在  $\alpha=0$ 和  $\pi/2$ 时,  $x$ 方向和  $y$ 方向力的比较.从图3(a),3(b)

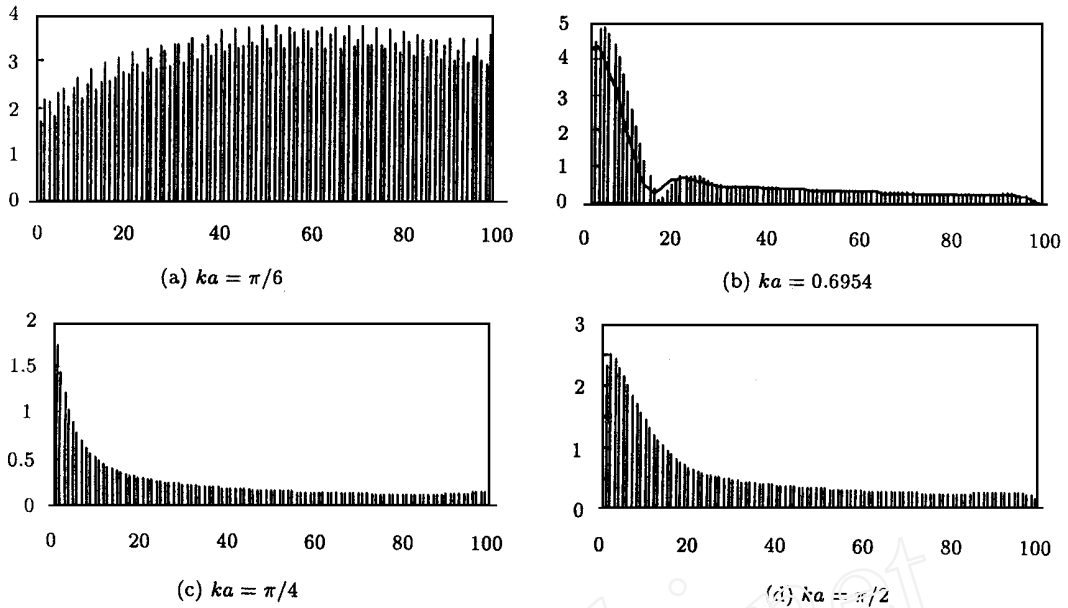


图 2 以不同的  $ka$  在逆浪中的受力情况 ( $R/a = 4$ , 横坐标为桩柱序号, 1 为迎着迎浪的桩柱)  
 Fig. 2 In-line wave force amplitude in head seas for different  $ka$  ( $R/a = 4$ , the horizontal axis denotes the pile sequence number and 1 corresponds to the first pile)

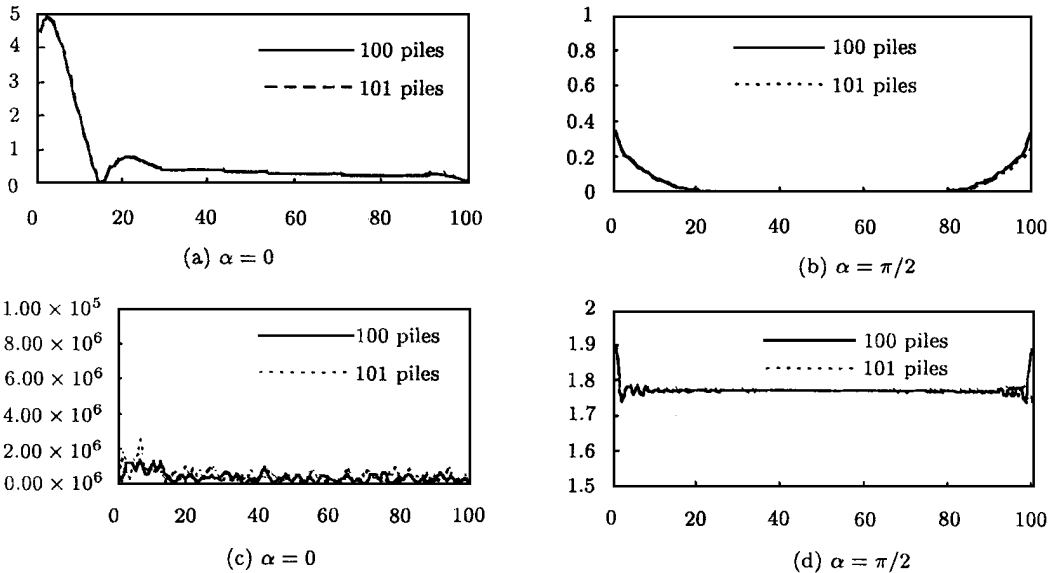


图 3 100 和 101 根桩列在不同的浪向的  $x$  和  $y$  方向力的比较  
 (其中,  $a, b$  和  $c, d$  分别为浪向角为 0 和  $\pi/2$  时的  $x$  和  $y$  方向力,  $ka = 0.6954$ )  
 Fig. 3 Comparison of the wave forces in  $ox$  direction ( $a, b$ ) and  $oy$  direction ( $c, d$ ) on arrays of 100 and 101 piles at various wave angles ( $ka = 0.6954$ )

可以看出,当  $\alpha = \pi/2$  时,只剩下由柱间方向的干扰产生的力,中央部分桩柱的受力为 0,而两端

的力也不大. 图 3(c), 3(d) 表明  $y$  方向的力在  $\theta = 0$  时实际上为 0, 当浪向角  $\theta = \pi/2$  时,  $y$  方向力增大, 但中间部分桩柱上的力的分布是均匀的. 这一现象与直观上的推测是一致的, 即当柱数  $M$  很大时, 中间部分桩柱位置的差异的影响越来越小, 柱与柱之间的力应当趋于等同. 文献[3]中对柱数为奇数(101)和偶数(100)的情况, 得到明显不一样的力的分布形态. 本文的研究结果表明这一结论是不现实的.

我们进而考察了当柱数  $M$  逐渐增加时, 柱体受力的变化, 计算了在  $ka$  为  $\pi/6, 0.6954, \pi/4$  和  $\pi/2$ ,  $\theta = 0$ , 柱数为  $M = 10n$ , ( $n = 1, 2, \dots, 10$ ) 时的受力, 结果见图 4. 可以看出, 当  $M$  增加时, 图 4 几个图都表现了相同的性态, 即: 当桩柱根数超过某一数量后, 迎浪侧桩柱遮蔽效应影响的范围基本不变, 在考察的情况中, 大致为 15 至 20 根桩柱的距离. 该范围之外, 桩柱上的受力呈现出规律的连续依赖性; 长波情况下, 尽管遮蔽效应并不明显, 但桩柱受力仍然表现出规律的连续依赖性.

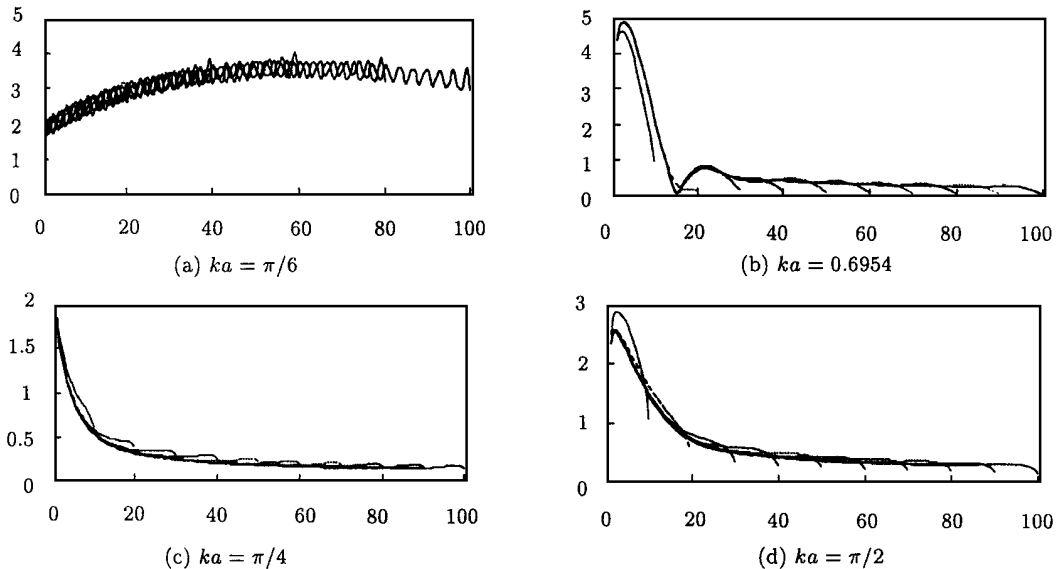


图 4 当  $ka$  为  $\pi/6, 0.6954, \pi/4$  和  $\pi/2$  时不同数目的柱群迎浪时受力的比较

Fig. 4 Comparison of the wave load distributions on arrays containing different pile numbers (from 10 to 100 with the interval of 10)

### 3 结 论

多物体之间的流体动力干扰特性对超大型海洋结构物的设计和研究十分重要. 本文用波动源在截面周线上分布的方法, 就直线排列的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, 桩柱的数目可达 100 根以上, 得到了柱间流体动力干扰的若干新的特性. 对于文中处理的对象而言, 它们是:

1) 当波浪沿着柱列连线的方向传播时, 迎浪侧的桩柱的遮蔽效应与波长有关, 且限于较短的波长; 波长较长时, 尽管柱间干扰依然存在, 但遮蔽效应并不明显.

2) 当桩柱根数超过某一数量后, 迎浪侧桩柱遮蔽效应影响的范围基本不变, 该范围外桩柱上的受力呈现出某种有规律的连续依赖性; 长波情况下, 尽管遮蔽效应并不明显, 但桩柱受力仍然

表现出规律的连续依赖性。

3) 当柱数很大时(无论柱数是奇数还是偶数),在各种浪向中,除了两端部分的桩柱的波浪力出现振荡变化外,中间大部分的桩柱都表现出均匀的受力特征。

4) 存在一相当狭窄的波长范围,在这一范围内,由于柱间的遮蔽效应和干扰效应重要性相当,无论是波浪力幅值大小和沿桩列的分布形态对波长的变化均十分敏感。以本文计算的桩列为例,该敏感波长范围在  $ka = 0.6954$  附近。对这一敏感特性的进一步研究仍是必要的。

这些特性的发现和重新认识不仅对文中处理的柱列本身,对其他形式多体结构物流体动力干扰的研究事实上也有重要的借鉴和指导意义。用文中的方法,除了可对其他非圆截面柱列和其他柱群排列形式在波浪中的流体动力干扰特性进行研究外,原则上还可结合局部扰动源的分布,用于大数目柱列在流场中振动时的流体动力干扰特性和流-固耦合的研究,这方面的工作结果将另文发表。

### 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 (Liu YZ, Miao GP. Ship Motion in Sea Wave. Shanghai: Shanghai Jiao Tong Univ. Press, 1987 (in Chinese))
- 2 Linton CM, Evans DV. The interaction of waves with arrays of vertical circular cylinders. *J Fluid Mech*, 1990, 215: 549 ~ 569
- 3 Maniar HD, Newman JN. Wave diffraction by long array of circular cylinders. The Eleventh Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Hamburg, 1996. 17 ~ 20
- 4 Callan M, Linton CM, Evans DV. Trapped modes in two - dimensional wave guides. *J Fluid Mech*, 1991, 229: 51 ~ 64
- 5 MacCamy RC, Fuchs RA. Wave forces on piles: A diffraction theory. U. S. Army Corps of Engineering, Beach Erosion Board, Tech. Memo., 1954 (69): 1 ~ 40
- 6 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
- 7 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) (Miao GP, Liu YZ. Hydrodynamic forces on multiple large vertical cylinders of arbitrary section. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, 13(5) (in Chinese))
- 8 Miao GP, Liu YZ, Mi ZX. Computation of Hydrodynamic Forces on Vibrating Multiple Large Vertical Cylinders of Arbitrary Section. *Marine Structures*, 1993, 6: 279 ~ 294
- 9 Falinsen O. A rational strip theory of ship motions: Part II. Ph D thesis, The University of Michigan, Ann Arbor, 1971
- 10 McIver P, Evans DV. Approximation of wave forces on cylinder arrays. *Appl Ocean Res*, 1984, 6: 101 ~ 107
- 11 Linton CM, Evans DV. Corrigendum: The interaction of waves with arrays of vertical circular cylinders. *J Fluid Mech*, 1990, 218: 663

ON THE EFFECTS OF HYDRODYNAMIC INTERACTION UPON  
THE WAVE FORCE ON VERTICAL PILE  
ARRAY OF SINGLE ROW<sup>1)</sup>

Miao Guoping Yu Zhixing Miao Quanming\* Liu Yingzhong Zhang Huaixin

(*Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China*)

\* (*China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214001, China*)

**Abstract** A systematic study has been carried out on the effects of three - dimensional wave forces of vertical pile array , applying method of wave source distribution on arbitrary sectional contour of the piles. The piles involved in computation reach up to 100. Some new properties of hydrodynamic interaction among piles are obtained. It should be emphasized that the forces on piles shows continuous dependence when the piles number increases over a certain number. When the number is very large , forces on the middle piles are almost uniform whether the number is odd or even. For the cases involved in the present paper , we may draw the following conclusions among others , i. e.

1. In head sea condition , the shielding of the front piles are dominant in relatively shorter waves.

2. With the increase of the wave length , the interference effects among piles will gradually become stronger and finally be dominant in the long wave range while the shielding effects are getting weaker.

3. There exists a quite narrow wave length range in which the distribution of the wave force amplitudes along a pile array will vary quite sensitive to small changes in wave length both in its configuration and magnitude due to the compatibility between the shielding and interference effects among piles.

Those new findings , although drawn from arrays of vertical cylindrical piles , would give insight into the hydrodynamic interaction phenomena for multiple objects of general shape in waves. These discoveries are significant guidance of the study of hydrodynamic interaction upon other forms of offshore structures.

**Key words** hydrodynamic interaction , wave force ,pile array , super large structure , wave sources

<sup>1)</sup> The project supported by the National Natural Science Foundation of China.

Received 14 March 1997 , revised 30 March 1998.