



# 桩柱间距对桩柱上波浪荷载的影响

林斌, 董志勇, 王品

(浙江工业大学港口与近海工程研究所, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 桩柱间距的大小直接关系到入射波对桩柱的作用力及对平台或上部结构的上托力。基于 FLOW-3D 建立三维数值波浪水槽, 通过试验验证数值模型的准确性, 研究 4 种波况下, 桩柱间距  $L$  对作用在上游桩柱和下游桩柱波浪荷载的影响。结果表明: 由于桩柱的相互影响, 作用在两桩柱上顺向波浪荷载和横向波浪荷载均不同于孤立桩柱情形, 群桩系数  $K_G$  与桩柱间距  $L$  有密切关系, 对于顺向群桩系数  $K_{Gx}$ , 当桩柱间距  $L$  与其直径  $D$  的比值小于 1.0 时, 上游桩柱顺向群桩系数  $K_{Gxu} < 1.0$ , 下游桩柱顺向群桩系数  $K_{Gxd} > 1.0$ , 两桩柱的横向群桩系数  $K_{Gy}$  可达 3.0~4.0。随着间距的增加,  $K_{Gxu}$  逐渐增大、 $K_{Gxd}$  逐渐减小、 $K_{Gy}$  大幅减小。当  $L/D > 4.0$  时, 基本可以忽略两桩柱的相互影响。

**关键词:** 桩柱群; 桩柱间距; 波浪荷载; 群桩系数

中图分类号: TV 135; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0052-07

## Influence of spacing between piles on on-coming wave force

LIN Bin, DONG Zhi-yong, WANG Pin

(Port and Offshore Engineering Research Institute, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The spacing between piles is directly related to the incident wave force on piles and the drag force on the platform or the upper structure. A three-dimensional numerical wave flume was developed based on software FLOW-3D, and an experimental investigation was carried out firstly to confirm the efficiency and accuracy of the numerical simulation, and then the influence of spacing  $L$  on the wave force on both upstream and downstream piles was numerically studied. The results indicate that both forces on upstream plies parallel to the wave direction and perpendicular to the wave direction are different from the case of isolated pile because of the interaction of the piles, and the grouping effect coefficient  $K_G$  is closely related to the spacing  $L$ . For grouping effect coefficient parallel to the wave direction, when the two plies are in small spacing, the upstream plie  $K_{Gxu} < 1.0$ , and the downstream plie  $K_{Gxd} > 1.0$ , and the grouping effect coefficient  $K_{Gy}$  perpendicular to the wave direction can reach 3.0 ~ 4.0. With the increase in the spacing between the piles,  $K_{Gxu}$  increases gradually, whereas  $K_{Gxd}$  and  $K_{Gy}$  decrease. The interaction of piles can be neglected when the ratio of spacing  $L$  to the pile diameter  $D$  reaches 4.0.

**Keywords:** group piles; spacing between piles; wave force; grouping effect coefficient

在港口工程及近海工程中, 桩柱群是常见结构, 当桩柱间距较小时, 相互间水动力影响较强, 作用在桩柱上的波浪荷载与孤立桩柱相比将显著增大, 致使结构失稳破坏<sup>[1]</sup>。因此, 研究波浪与海洋结构物的相互作用, 具有重要的实际意义。

20 世纪 70 年代, 国内外许多学者对群桩上的波浪荷载进行过试验研究。杨正己等<sup>[2]</sup>通过规则

波与不规则波的水槽试验, 测定了作用在单桩、双桩横排、双桩纵排及 4 根桩方阵排列时各组成桩上的波浪荷载; 高道明<sup>[3]</sup>通过试验研究了 3×3 方阵排列桩的桩径、桩距对于群桩水动力系数的影响, 得出当桩柱间距小于 4 倍直径时, 由于群桩的存在, 改变了入射波浪场, 波浪水流产生的阻力比单桩大; 邓绍云<sup>[4]</sup>通过前人及其本人的试

收稿日期: 2015-11-27

作者简介: 林斌 (1988—), 男, 硕士研究生, 从事水利、港口及近海工程方向的研究。

验研究, 推导出可以计算有一定规律形式排布的群桩总阻力的半经验半理论公式; Linton 等<sup>[5]</sup>对波浪与环向规则布置的直立柱群结构相互作用问题进行了研究, 并提出求解此类问题一阶速度势的解析解; Walker 等<sup>[6]</sup>根据绕射理论, 将入射波速度势表示成贝塞尔函数, 研究波浪与多个串联直立圆柱的作用; Evans 等<sup>[7]</sup>发现作用于桩柱群上的波浪荷载与波浪频率、桩柱间距和半径的比值存在密切联系, 在特定的频率以及比值下受到的波浪荷载是孤立桩柱时的 54.1 倍。

上述文献主要从试验和理论方面进行了相关的研究, 随着计算机技术和计算流体力学的发展, 采用数值模拟研究波浪对于桩柱群的作用不失为经济可靠的方法。本文应用 FLOW 3D 软件建立数值波浪水槽, 通过试验模型验证数值模型的可靠性, 并研究了 4 种波况下, 不同间距时作用在上游桩柱和下游桩柱的时均波浪荷载, 与孤立桩柱的时均荷载作比较, 得出各个群桩系数, 最后分析桩柱波浪荷载历时曲线、桩柱周围自由液面和桩柱周围流场。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程

FLOW 3D 将连续性方程和动量方程作为波浪运动的控制方程, 和常规的方程略有区别, 其连续性方程和动量方程中带有体积分和面积分参数, 具体的表达式如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\rho$  表示液体的密度;  $V_F$  表示体积函数,  $u$ 、

$v$ 、 $w$  分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的流速;  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  分别表示  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的面积函数;  $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$  表示流体在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的重力加速度;  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  为物体在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的黏滞力加速度。

本文选用重整化 (RNG  $k-\varepsilon$ ) 模型处理动量方程中的紊流, 采用 Hirt 等<sup>[8]</sup>提出的 VOF 法对自由液面进行跟踪, 应用有限差分法对方程进行离散并用 GMRES 算法<sup>[9]</sup>迭代求解离散之后的方程。

### 1.2 计算区域网格划分及边界条件

计算工况参考实际波浪水槽试验, 计算区域取 8.0 m×0.6 m×0.8 m, 水槽初始水深设置为 0.5 m, 在水槽工作段布置 2 个等直径串联桩柱 (图 1)。

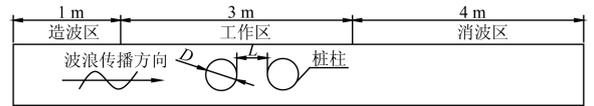


图 1 数值模型示意图

本文模拟的波浪参数, 波高范围内网格大小为 0.005 m, 波高范围外网格大小随水深逐渐增大, 长度和宽度方向网格大小均为 0.025 m。为了更好地研究圆柱周围水动力特性, 以圆柱体为中心, 前后左右 0.4 m 范围内嵌套 1 个三维大小均为 0.01 m 的均匀大小网格。在消波段采用变空间步长, 即在数值波浪水槽出流侧加大网格步长的设置, 使其无法准确模拟波浪表面, 从而使波高减小、反射降低。在  $x=3.5$  m 到水池右端采用等差数为 0.02 的渐变网格, 其中最小网格步长为 0.012 m, 最大网格步长为 0.42 m, 总网格数为 62.8 万个。消波效果见图 2, 在  $x=3.0$  m 处通过入射波和反射波的波面分离, 得到在该处的反射系数为 0.068。

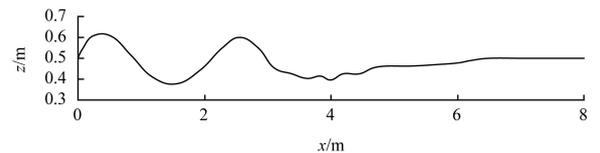


图 2 自由液面沿  $x$  轴变化曲线

水槽左侧设置为造波边界, 右侧边界采用 Orlandi<sup>[10]</sup>提出的 Sommerfeld 辐射边界条件, 底面设置为固壁边界, 其它边界均设置为对称边界。

本文为了便于数值模型的验证, 将计算区域的宽度设置为 0.6 m, 其与桩柱的直径的比值  $D/L=2.0$ , 通常需要考虑边界对于桩柱所受波浪荷载的影响。但 Yeung 等<sup>[11]</sup> 关于边壁对于桩柱所受波浪荷载影响的研究指出, 边壁对于桩柱的影响主要集中在高频处, 并且当水槽的宽度为半波长的整数倍时, 影响最为剧烈, 当波数与水深的乘积小于 2.0 时, 基本可以忽略边壁的影响。考虑到本试验中 4 种工况下均为低频波, 波数与水深的乘积均小于 2.0, 且水槽宽度并不是半波长的整数倍, 因此关于边壁对于桩柱波浪荷载的影响不做详细讨论。

## 2 模型验证

为了验证数值波浪水槽的准确性, 用试验进行验证, 模型试验在波浪水槽内进行, 水槽长 18.0 m、宽 0.6 m、深 1.0 m, 水槽的一端配有摇板式造波机, 可产生规则波, 尾部设有消波设施, 可有效消除波浪反射。试验压力数据采集系统采用 CY-YD-205 压电式压力传感器, 由 YE6263 压力数据采集仪实时采集数据, 采集时间为 25 s。验证对象选用直径  $D=0.3$  m 的孤立圆柱, 分别在表 1 所示的 4 种波浪要素下, 把数值模拟计算得到的圆柱上波峰波谷之间 8 个压力剧烈变化的位置(图 3)与模型试验(图 4)做比较。从图 5 不难看出, 4 种波况下, 计算和实测压力吻合良好, 尤其是工况 C 和工况 D, 计算结果和实测结果基本一致。4 种波况中, 最小误差为 4.32%, 最大误差为 13.26%。因此可认为所建立的三维数值波浪水槽是合理的, 同时也表明所建立的数值波浪水槽能够模拟各种波浪情况下波浪与结构物的相互作用。

表 1 波浪要素

工况	波长 $L/m$	波高 $H/m$	周期 $T/s$	波速 $c/(m/s)$	波数 $k/m^{-1}$
A	4.123	0.112	2.72	1.511	1.524
B	3.261	0.151	2.107	1.553	1.926
C	2.118	0.175	1.352	1.562	2.976
D	1.753	0.210	1.182	1.560	3.589

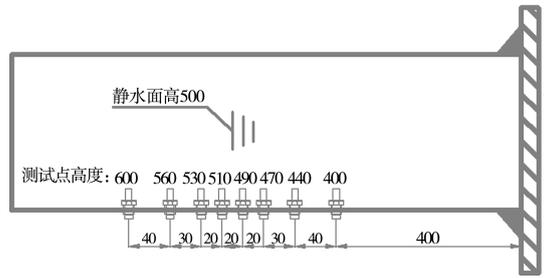


图 3 传感器位置分布 (单位: mm)

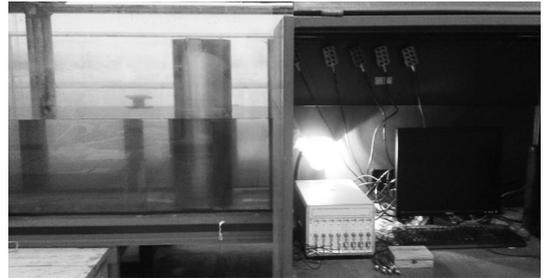
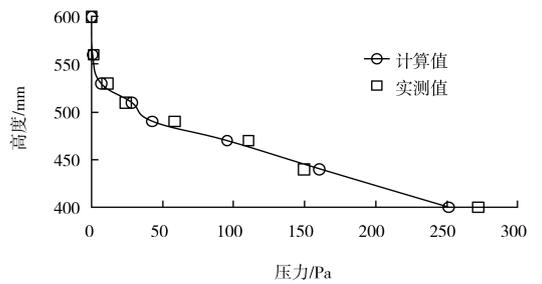
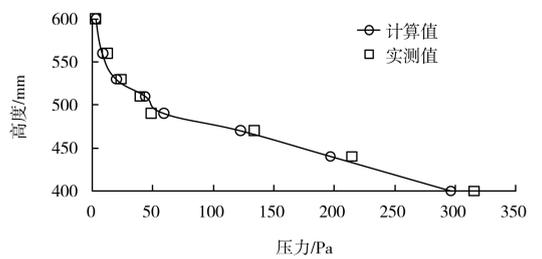


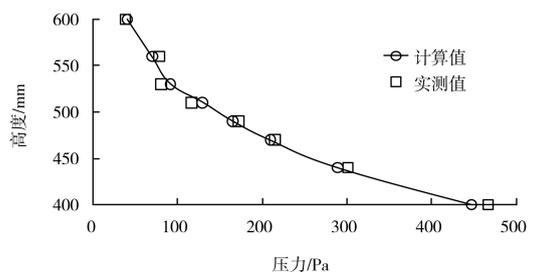
图 4 试验模型



a) 工况 A



b) 工况 B



c) 工况 C

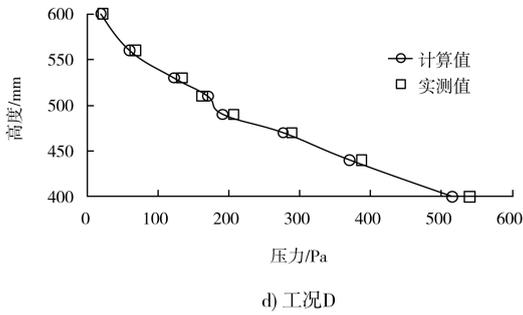


图5 计算压力与实测压力对比

### 3 结果讨论

本文以两个串联圆柱为研究对象,其直径均为 0.3 m。根据 JTJ 221—1987 《港口工程技术规范》<sup>[12]</sup> 关于串联群桩干扰系数的建议,当  $L/D > 4$  时,可以忽略桩柱间的相互干扰效应,因此考虑间距范围为  $0.1D \sim 4D$ 。在  $0.1D \sim 1D$  范围每隔 0.1 倍间距算一组数据,  $1D \sim 4D$  范围每隔  $0.5D$  算一组数据,计算时间均为波浪稳定后的 25 s。

#### 3.1 桩柱顺向群桩系数随间距变化规律

4 种工况下,不同间距时上游桩柱和下游桩柱所受到的顺向时均波浪荷载  $F_{Gx}$  与对应孤立桩柱上顺向波浪荷载  $F_x$  的比值定义为顺向群桩系数  $K_{Gx}$ <sup>[13]</sup> (图 6):

$$K_{Gx} = F_{Gx} / F_x \quad (3)$$

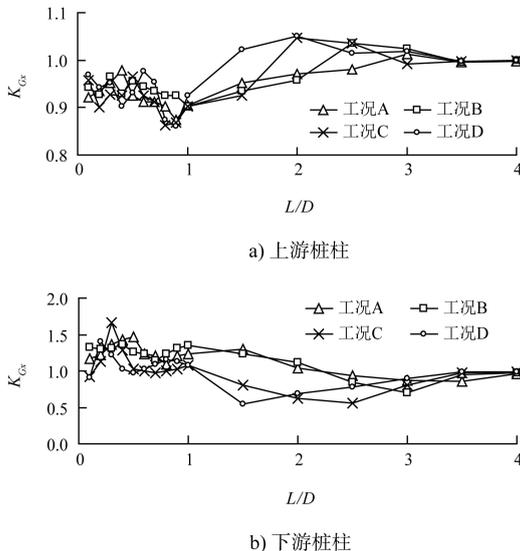


图6 不同间距时顺向群桩系数

比较图 6a) 和图 6b) 发现,上游桩柱顺向群桩系数  $K_{Gxu}$  和下游桩柱顺向群桩系数  $K_{Gxd}$  随间距变

化规律基本呈相反趋势:对于上游桩柱,间距较小时,变化呈小幅波动状态,但其群桩系数均小于 1.0,之后随着相对间距的增加逐渐增大,但增幅不大,显然,不同于通常认为上游桩柱比下游桩柱作用力大的概念。当间距较小时,  $K_{Gxd} > 1.0$ ,工况 C 中,当  $L/D = 0.3$  时,其最大值更是达到了 1.731。之后随间距增大逐渐减小,出现最小值 0.528。无论是上游桩柱还是下游桩柱,当  $L/D = 4.0$  时,群桩系数均趋于 1.0,此时桩柱间的相互影响可以忽略。

#### 3.2 桩柱横向群桩系数随间距变化规律

图 7 为上游桩柱和下游桩柱的横向群桩系数  $K_{Gy}$  随间距的变化曲线。比较图 7a) 和图 7b) 可知,上游横向群桩系数  $K_{Gyu}$  和下游桩柱横向群桩系数  $K_{Gyd}$  随间距的变化相似:当  $L/D < 1.0$  时,其值较大,工况 C 中,  $K_{Gyd}$  的最大值为 3.82,当  $L/D > 1.0$  时,其值大幅减小,至  $L/D = 3.0$  时基本趋于 1.0。

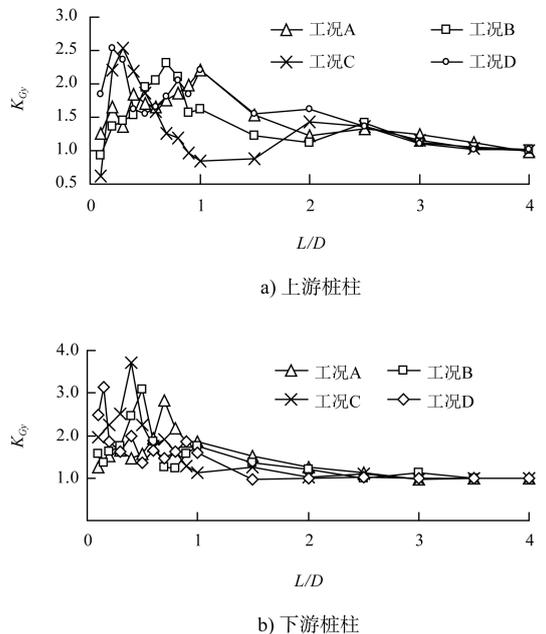


图7 不同间距时横向群桩系数

### 4 原因分析

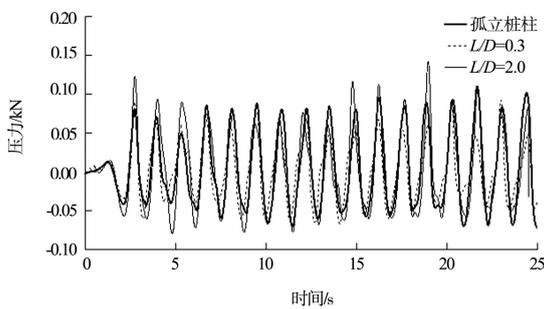
根据上述结果,各种波况下间距较小 ( $L/D < 1.0$ ) 时和较大 ( $L/D > 1.0$ ) 时,桩柱受到的波浪荷载显著不同,但是各种波况下的变化趋势大致相似。对于工况 B,小间距时干扰最剧烈的位置出

现在  $L/D=0.3$  处，大间距时干扰最强烈的位置在  $L/D=2.0$  处，本文以工况 B 为例，给出了出现最大值和最小值群桩系数时桩柱波浪荷载历时曲线、周围自由液面和桩柱间流场。

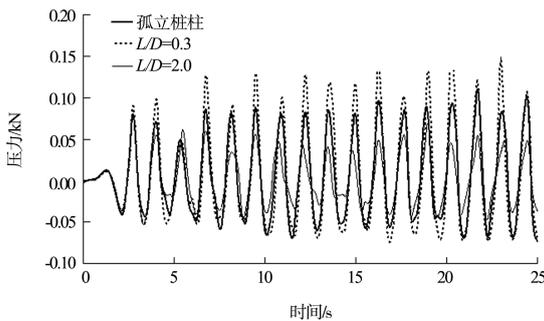
#### 4.1 波浪荷载历时曲线

图 8 为工况 B 中桩群系数出现最大值和最小值时 ( $L/D$  分别为 0.3 和 2.0) 波浪荷载的历时曲线。由图 8a)、8b) 可见，当  $L/D=0.3$  时，上游桩柱波浪荷载的峰值较孤立桩柱时小，下游桩柱的峰值较孤立桩柱偏大，除峰值外的其它值和孤立桩柱近似，因此上游桩柱的顺向波浪荷载较孤立桩柱小，下游桩柱顺向波浪荷载较孤立桩柱大； $L/D=2.0$  时，上游桩柱与孤立桩柱受荷载近似；下游桩柱的波浪荷载峰值较孤立桩柱明显偏小，这解释了为什么在此处下游桩柱波浪荷载明显小于孤立桩柱。

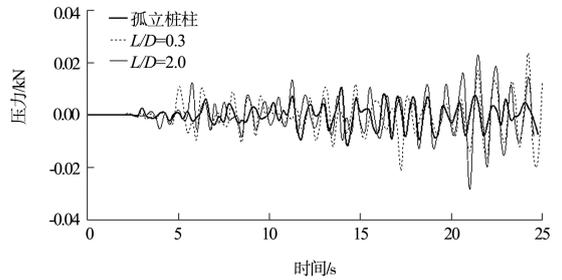
观察图 8c) 和图 8d) 可知，作用在上下游桩柱上的横向波浪荷载呈不规则的波动状态，其大小比顺向波浪荷载小一个数量级。当  $L/D=0.3$  时波动幅度较大， $L/D=2.0$  时波动幅度较小，但均比孤立桩柱情形大，因此无论是上游桩柱还是下游桩柱，其横向群桩系数都大于 1.0。



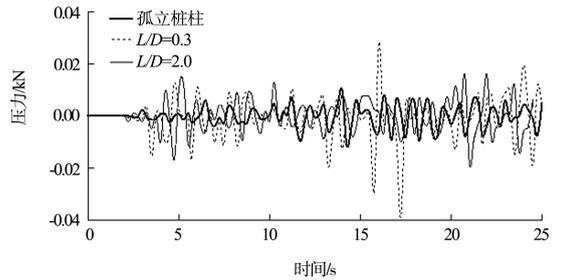
a) 上游桩柱顺向波浪荷载



b) 下游桩柱顺向波浪荷载



c) 上游桩柱横向波浪荷载

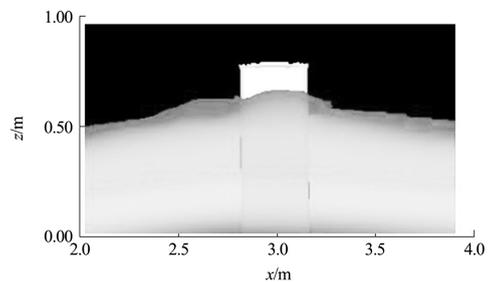


d) 下游桩柱横向波浪荷载

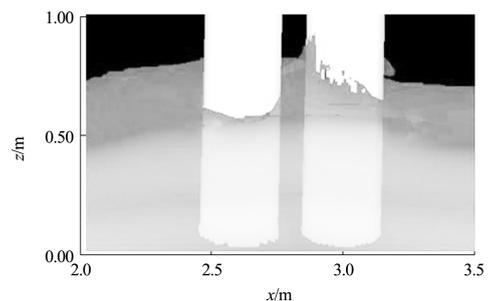
图 8 作用在桩柱上的波浪荷载历时曲线

#### 4.2 桩柱周围自由液面变化规律

图 9 为波浪从左向右传播过程中，波峰和波谷分别经过群桩时的波浪三维图，比较图 9a)、9b) 和 9c) 不难发现，波峰经过桩柱群时，当  $L/D=0.3$  时上游桩柱周围自由液面和孤立桩柱情形下比较相似，自由液面较为平缓，高度较孤立桩柱时偏低，下游桩柱周围波浪发生破碎，且有较大的



a) 波峰经过孤立桩柱



b)  $L/D=0.3$  波峰经过群桩

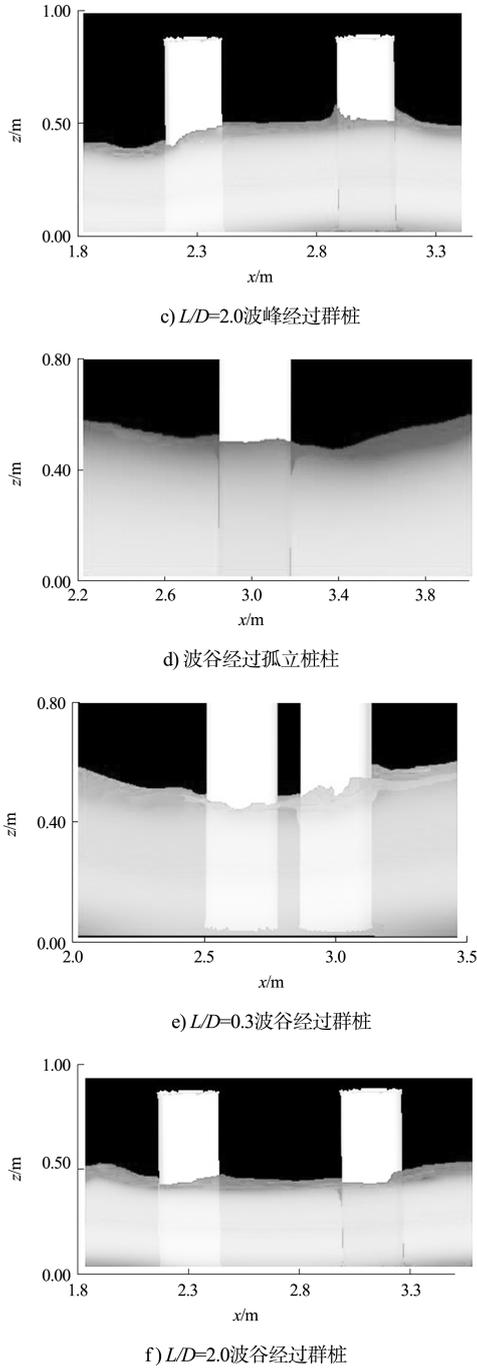


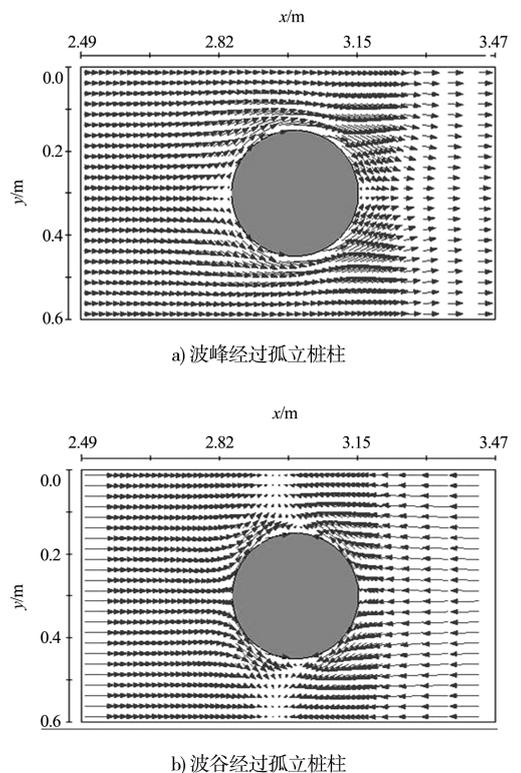
图 9 波峰和波谷经过桩柱附近时的波浪三维图

爬高, 表明此时波浪对于下游桩柱的冲击较大。当  $L/D = 2.0$  时, 波峰较为平缓地通过上下游桩柱, 到达下游桩柱时, 波峰大幅减少。观察图 9d)、9e) 和 9f) 可以发现, 波谷通过桩柱时也有类似情形。

### 4.3 桩柱间流场

图 10 为波峰和波谷经过群桩时的自由液面附近的流场 ( $d = 0.4 \text{ m}$ )。从图 10a) ~ e) 可以看出,

波峰经过群桩时, 孤立桩柱情形桩柱周围流场较平缓, 没有产生明显的涡旋; 当  $L/D = 0.3$  时, 由于下游桩柱的干扰作用, 改变了上游桩柱的尾流状况, 在背面形成了较多不对称的涡街, 之后涡街脱落, 撞击下游桩柱, 导致下游桩柱表面的自由液面明显升高, 进而在桩柱正面形成一个正压区, 同时由于上游桩柱的存在, 也改变了下游桩柱周围的流场, 在桩柱下游形成了一个较大的涡旋, 从而在桩柱背面形成负压区, 由于桩柱上下游的压力差, 使得作用在下游桩柱上的横向波浪荷载和顺向波浪荷载较孤立桩柱情形明显偏大, 对于上游桩柱, 则桩柱前后面都是正压区, 但是其周围生成了明显的涡旋, 因此其顺向波浪力较孤立桩柱情形偏小, 而横向波浪力较孤立桩柱情形偏大; 当  $L/D = 2.0$  时上游桩柱表面形成两个较大的对称涡街, 与下游桩柱反射回来的涡街相互作用, 由于两种涡街质点的旋转方向相反, 使其相互削弱, 宏观的表现是桩柱间的液面比较平缓, 波峰和波谷处的自由液面的变化程度都较孤立桩柱时偏小, 下游桩柱前后面的压差基本相等, 因此顺向波浪荷载较小。观察图 10b)、10d)、10f) 可以看出, 波谷经过时也有类似的现象。



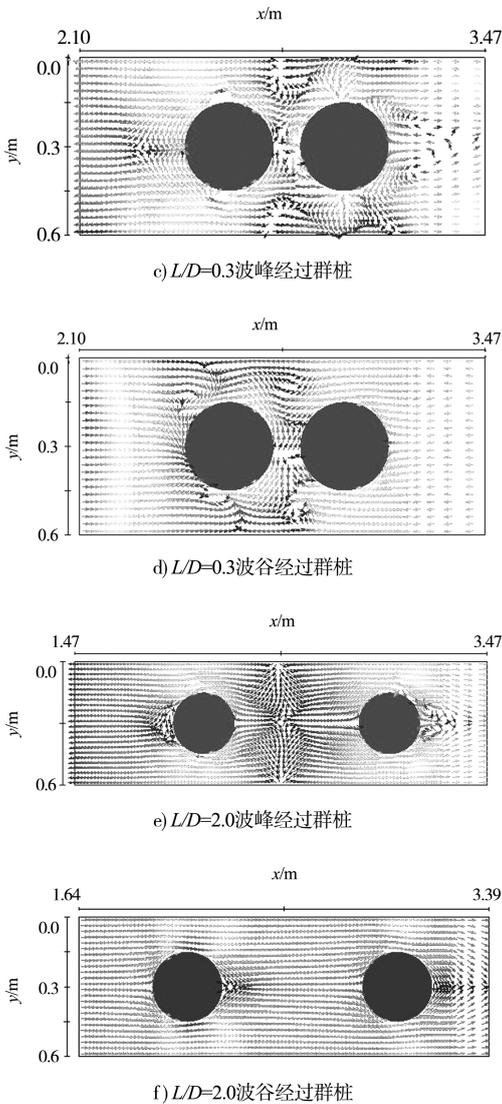


图10 波峰和波谷经过群桩时的表面流场

## 5 结论

本文通过对不同波浪要素下桩柱间距对串联桩柱所受波浪荷载影响的数值模拟与试验验证,可得出以下几点结论:

1) 当相对间距小于 1.0 时,上游桩柱群桩系数小于 1.0,下游桩柱大于 1.0,随着间距的增大,上游桩柱顺向波浪荷载小幅增大,下游桩柱大幅减小。

2) 当相对间距达到 4.0 时,可以忽略桩柱间的相互干扰对于顺向波浪荷载的影响。作用在桩柱上的横向波浪荷载较顺向波浪荷载小一个数量级,当两桩柱间距较小时,桩柱间干扰作用对横向波浪荷载影响显著,作用在每个桩柱上的横向

群桩系数可达 3.0~4.0。

3) 当相对间距达到 3.0 时,桩柱间相互干扰作用基本上对横向波浪荷载不产生影响。

4) 对于高桩码头和海洋平台的桩柱群,必须考虑其相互干扰和间距给其波浪荷载带来的影响。

## 参考文献:

- [1] Kjeldsen S. Dangerous wave groups[J]. Norwegian Maritime Research, 1984 (2): 4-16.
- [2] 杨正己,左其华,苏卫东.作用于群桩上的波浪力[J].水利水运科学研究,1992(3): 231-243.
- [3] 高道明.规则波作用下群桩波浪力的试验研究[J].大连理工大学学报,1987(1): 137-140.
- [4] 邓绍云.桩柱水流绕流阻力特性及其计算[J].中国港湾建设,2007(1): 4-6.
- [5] Linton C M, Evans D V. Interaction of waves with arrays of vertical circular cylinders[J]. Journal of Fluid Mech, 1990, 215(1): 549-569.
- [6] Walker D A G, Taylor R E. Wave diffraction from linear arrays of cylinders[J]. Ocean Engineering, 2005, 32: 2 053-2 078.
- [7] Evans D V, Porter R. Near-trapping of waves by circular arrays of vertical cylinders [J]. App Ocean Res, 1997, 19(2): 83-99.
- [8] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary[J]. Compute Phys, 1981, 39: 201-225.
- [9] Saad Y, Schultz M. A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems[J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1986(7): 856-869.
- [10] Orlandi I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows [J]. Computer Phys, 1976, 21(3): 251-269.
- [11] Yeung R W, Sphaier S H. Wave-interference effects on a truncated cylinder in a channel[J]. Journal of Engineering Mathematics, 1989, 23(2): 95-117.
- [12] JTJ 221—1987 港口工程技术规范[S].
- [13] 张宁川,俞聿修.不规则波作用下的群桩效应[J].海洋通报,1993,12(3): 95-101.