DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.06.005
武昕竹, 柳淑学, 李金宣. 聚焦波浪与直立圆柱作用的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2015(6): 31-39. (WU Xin-zhu, LIU Shu-xue, LI Jin-xuan. Numerical simulation of interactions of focusing wave with a vertical cylinder[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(6): 31-39.)

# 聚焦波浪与直立圆柱作用的数值模拟

武昕竹[1,2], 柳淑学[1], 李金宣[1]
(1. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

**摘要:** 基于 Fluent 平台建立了可用于波浪传播模拟的数值计算水槽,利用不同波浪参数的线性规则波模拟分析了网格尺度 $L/\Delta x$ 对产生波浪质量的影响,确定数值水槽的网格划分尺度,并验证了阻尼消波的有效性。在此基础上,用模拟频谱的方法对聚焦波浪的传播进行了数值模拟,通过数值模拟与物理试验不同位置处的聚焦波波面和聚焦点下水质点速度时间过程线对比,验证了模拟频谱方法数值计算的有效性。进一步对聚焦波浪与直立圆柱的作用进行了数值模拟,数值模拟聚焦波面过程、聚焦波浪水质点速度、圆柱周围波浪波动过程、圆柱上所受的波压力等,并与试验结果进行了对比,数值计算结果与试验结果吻合很好,验证了所建立的数值水槽的有效性。对聚焦波波面和压力特征值进行了误差分析,并分析了误差的产生原因,为进一步研究聚焦波浪与工程结构物的作用奠定基础。

**关 键 词:** Fluent 软件; 聚焦波浪; 直立圆柱; 数值模拟
**中图分类号:** TV139.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2015)06-0031-09

大量研究证实,波浪聚焦是产生极限波浪的主要原因,不同方向、不同频率的波浪在传播过程中互相调制,使波能集中,形成一个孤立的大波,此过程称为波能聚焦。波浪聚焦的模拟方法主要分为相速度法、逆传播法和波群速法。相速度法将不同频率组成波在指定地点、指定时刻聚焦使波峰或波谷最大,是一种有效模拟极限波浪的方法。

S. T. Grilli 等[1-2]采用高阶边界元方法建立了完全非线性波浪水槽,数值模拟了极限波浪的生成及特性;黄金刚[3]试验研究了二维聚焦波浪的特性,并用高阶谱分析方法求解 Laplace 方程和非线性水面边界条件,建立了模拟极限波浪传播的数值模型;柳淑学等[4]研究了试验室中生成极限波浪的方法,并基于 Boussinesq 方程进行了数值模拟验证;李金宣等[5-7]通过物理模型试验对多向聚焦极限波浪的特性进行了研究;孙一艳等[8-9]试验研究了聚焦波浪对直立圆柱墩作用导致的涌高、作用力等的变化,并应用双傅立叶级数模型研究聚焦极限波浪的波面及水动力特征;卓晓玲等[10-11]利用势流理论建立了聚焦波和水流混合作用的完全非线性数值水槽模型,研究了水流对聚焦波的影响;罗洵等[12]用完全非线性 Boussinesq 方程建立了数值模型模拟聚焦波浪在潜堤上的非线性传播变形;夏维达等[13]采用四阶非线性薛定谔方程模拟了二维 JONSWAP 谱情况下畸形波的生成,分析了深水畸形波的演化过程,探讨了 JONSWAP 谱参数对峰度和畸形波生成概率的影响。然而由于聚焦极限波浪传播及其与工程结构物作用的复杂性,其数值模拟研究还存在许多问题,尤其是对于聚焦波浪和直立圆柱作用的数值模拟研究,还缺少成熟有效的数值计算模型,因此建立有效的计算聚焦波浪与工程结构物作用的数值计算模型,对于开展聚焦极限波浪作用于工程结构物的特性研究具有重要意义。本文基于成熟的 Fluent 软件,通过引进波浪造波边界条件建立了可用于波浪传播模

**收稿日期:** 2015-02-28
**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51309050, 51221961); 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2013CB036101, 2011CB013703)
**作者简介:** 武昕竹(1990—), 女, 吉林白城人, 硕士研究生, 主要从事随机波浪数值模拟研究。E-mail: voicewxz@163.com

拟计算的数值计算模型,通过规则波计算,分析了网格划分尺度对于波浪模拟结果的影响,在此基础上,采用 VOF 模型,通过求解 N-S 方程对聚焦波浪及其与直立圆柱的作用进行数值模拟,并将数值模拟结果与物理试验结果进行对比。

# 1 数值波浪水槽的构建

## 1.1 数值水槽尺度及造波消波方法验证

为验证数值水池推板造波和阻尼消波的正确性,首先模拟了规则波的传播。数值水槽长 30 m,宽 3 m,高 3 m,水深 2 m。造波边界选择推板造波,根据线性理论,产生振幅为 $a$,频率为 $\omega$ 的规则波时的造波机运动 $S(t)$ 和速度 $V_s(t)$ 为:

$$S(t)=\frac{a}{T(\omega)}\sin(kx-\omega t) \tag{1}$$

$$V_s(t)=-\frac{a\omega}{T(\omega)}\cos(kx-\omega t) \tag{2}$$

式中:$T(\omega)$ 为造波机传递函数。对于推板造波机,可按式(3)计算:

$$T(\omega)=\frac{4\sinh^2(kh)}{2kh+\sinh(2kh)} \tag{3}$$

式中:$k$ 为波浪的波数;$h$ 为水深。

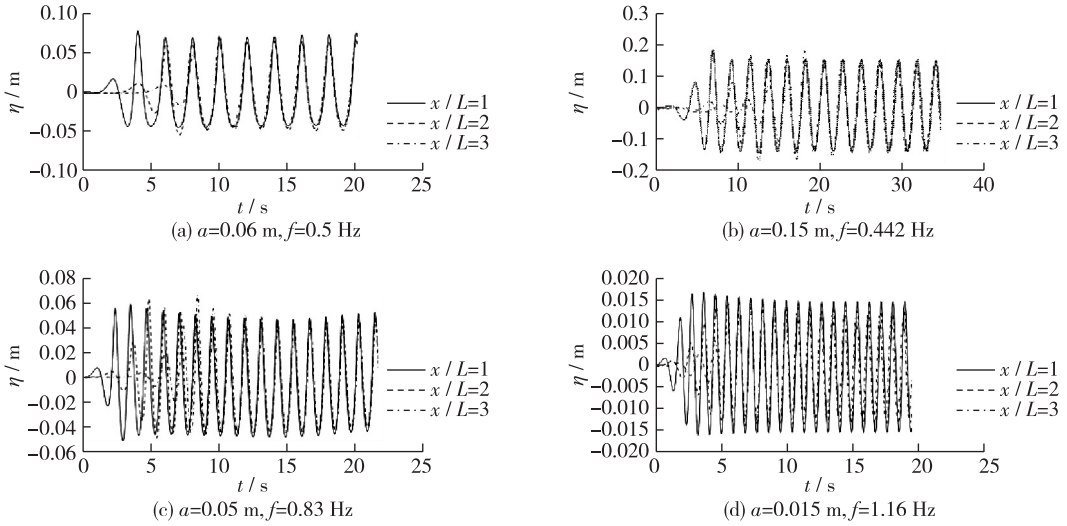
本文选择 4 个组次的规则波进行模拟,对应的波浪参数及网格划分尺度如表 1,为了验证 $x$ 方向单位网格尺度的划分对波浪模拟效果的影响,针对不同波长,每个波长范围内网格数量分别取为 40, 27, 20 和 12。表中 $\Delta x$ 为 $x$ 方向单位网格尺度。

**表 1 规则波浪参数及网格尺度**

Tab. 1 Wave parameters and grid scale of regular wave

| 组次 | $f$/Hz | $L$/m | $L/\Delta x$ | $\Delta x$/m | $a$/m |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.5 | 4.05 | 40 | 0.1 | 0.06 |
| 2 | 0.442 | 8.0 | 27 | 0.3 | 0.15 |
| 3 | 0.83 | 2.05 | 20 | 0.1 | 0.05 |
| 4 | 1.16 | 1.25 | 12 | 0.1 | 0.015 |

图 1 分别给出 4 个组次的规则波在水槽中距离造波板 1 倍、2 倍、3 倍位置处的波面时间过程的对比。由图 1(a)~(c)可以看出,采用推板造波、阻尼消波的方法在数值水槽内能较好地生成所期望的规则波,不同位置处的波面基本一致,消波效果较好,模拟波高亦达到目标波高。




(a) $a$=0.06 m, $f$=0.5 Hz (b) $a$=0.15 m, $f$=0.442 Hz (c) $a$=0.05 m, $f$=0.83 Hz (d) $a$=0.015 m, $f$=1.16 Hz

图 1 不同波浪参数规则波在不同位置处波面时间过程线

Fig. 1 Wave time series of regular wave with different parameters in different positions

图 1(a)，(c)和(d)对应的 $\Delta x$ 均为 0.1 m，而对应的 $L/\Delta x$ 分别是 40，20 和 12，自由面处加密的最小 $\Delta y$ 值为 0.01 m，自由面处的 $\Delta y$ 加密可以增加自由面的捕获精度，从图 1(a)，(c)可以看出波浪模拟的效果较好，且这两个组次的 $\Delta x:\Delta y$ 的最大值都为10:1，在 Fluent 中 $\Delta x:\Delta y$ 影响着时空截断误差，这个值可能会造成数值计算中的假收敛，而对于模拟值衰减影响并不明显，考虑到网格数量的减少能增加计算速度，故在计算聚焦波浪的数值模型中采用了自由面加密处的 $\Delta y=0.01$ m 和 $\Delta x=0.1$ m 的网格尺度。图 1(d)虽然 1 倍波长位置处的波面过程模拟较好，但是波浪传播过程中沿程波浪衰减比较严重，这主要是由于网格数量过少所致。但在实际波浪模拟过程中，网格过多也会造成数值衰减较大[14]，因此，为了得到模拟质量较好的波浪，建议 1 个波长范围内可设置 20~50 个网格。

### 1.2　聚焦波及其与圆柱作用的数值水槽构建

**1.2.1**　*聚焦波造波方法*　孙一艳[9]详细总结了聚焦波浪的产生原理。事实上，根据线性理论，假定波浪在指定时刻 $t=t_f$ 时聚焦于 $x=x_f$，各组成波在该处叠加，这时任意位置处的波面 $\eta(x,t)$ 为：

$$\eta(x,t)=\sum_{i=1}^{N}a_i\cos[k_i(x-x_f)-\omega_i(t-t_f)] \tag{4}$$

式中：频率为 $\omega_i$ 组成波的波幅 $a_i$ 由给定的波浪频谱来确定，即

$$a_i=AS_i(\omega)\Delta\omega_i/\sum_i S_i(\omega)\Delta\omega_i \tag{5}$$

式中：$S_i(\omega)$ 为模拟的频谱，本文采用 JONSWAP 谱；$A$ 是假定聚焦波的幅值。

参考式(1)，在指定时间和位置产生所要求的聚焦波时造波机推程 $S_1(t)$ 和速度 $V_{s1}(t)$ 可以表示为：

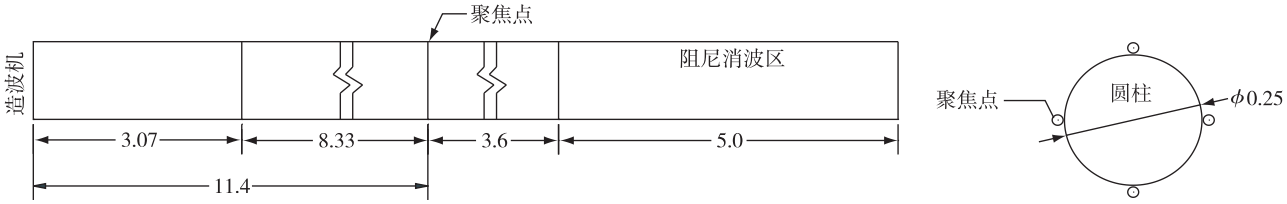
$$S_1(t)=\sum_{i=1}^{N}\frac{a_i}{T(\omega_i)}\sin[k_i(x-x_f)-\omega_i(t-t_f)] \tag{6}$$

$$V_{s1}(t)=-\sum_{i=1}^{N}\frac{a_i\omega_i}{T(\omega_i)}\cos[k_i(x-x_f)-\omega_i(t-t_f)] \tag{7}$$

同样利用 UDF，将式(7)编译进 Fluent 中，并加载给推板，作为推板的造波信号，即可产生所需要的聚焦波浪。

**1.2.2**　*模型构建及网格划分*　为了将数值计算结果与孙一艳[9]关于二维聚焦波浪及其与圆柱作用的试验研究结果对比，数值水槽的建立参考了孙一艳在试验研究中的布置，取聚焦点距造波机距离为 11.4 m，如图 2(a)所示。而为了减少计算量，聚焦点后数值水槽尺度略小于物理试验水槽长度，取为8.6 m，其中右端 5 m 为阻尼消波区。水槽高 1 m，水深 $h=0.5$ m。沿水槽方向布置 6 个浪高仪，第 1 个浪高仪距离造波机 3.07 m，同时在聚焦点位置水面下 0.15 m 处布置了速度测点。

进行聚焦波浪与圆柱作用模拟时，圆柱直径为 0.25 m，放置在水池中轴线上，圆柱迎浪面距离造波板 11.4 m，如图 2(b)所示。圆柱左右各有 1 根浪高仪距离圆柱 0.01 m 测量圆柱侧壁的涌高波面。同时在圆柱周围布置了 9 个压力测点，以观测聚焦波浪作用时圆柱上的压力分布。




(a) 水槽布置　　(b) 圆柱周围浪高仪布置

图 2　聚焦波浪水槽布置(单位：m)

Fig. 2　Arrangement of a focusing wave model (unit: m)

参考上述规则波模拟结果，结合本文模拟的聚焦波浪参数，水槽长度方向网格取为 $\Delta x=0.1$ m；在自由面上下各 0.1 m 范围内进行均匀网格加密 $\Delta y=0.01$ m；自由面下 0.1 m 到水槽底部，采用等比划分，比率为

1.12,保证第 1 个网格与自由面加密的 $\Delta y$ 相同;自由面上 0.1 m 到水槽顶部,$\Delta y = 0.05$ m,如图 3(a)所示。

当水槽加入圆柱时,$\Delta x$ ,$\Delta y$ 设置方法与无圆柱时水槽相同,水池宽度方向在圆柱附近加密 $\Delta z = 0.1$ m,其余部分 $\Delta z = 0.42$ m,如图 3(b)所示。圆柱附近皆为结构化网格,保证网格质量,如图 3(c)所示。

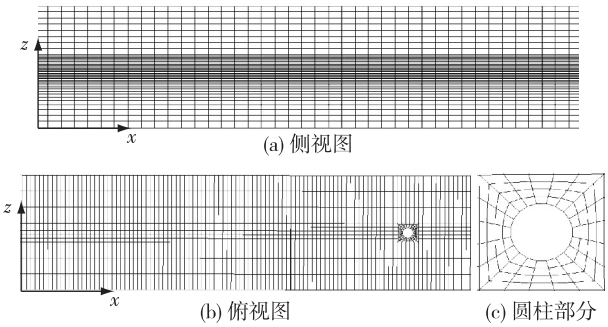



图 3 数值水槽的网格布置

Fig. 3 Grid arrangement of a numerical model

**1.2.3** 计算参数与边界条件设置 本文采用非定常分离隐式求解器求解,Fluent 软件用 VOF 方法捕捉自由表面,自由面重构格式采用几何重构(Geo-Reconstruct)格式,近壁面采用平衡的壁面函数处理。参考压力值为 101 325 Pa,考虑重力影响计为 9.81 m/s$^2$,设置工作流体密度 1.225 kg/m$^3$。控制方程扩散项采用基于单元体的最小二乘法差值(Least Squares Cell Based),对压力方程采用 PRESTO! 格式,动量方程、湍动耗散率方程采用一阶迎风格式。压力速度耦合方式采用压力隐式算子分割法(PISO)。

## 2 二维聚焦波空间波面与水质点速度的数值模拟结果

本文针对孙一艳[9]试验中的 4 个组次进行了模拟验证,对应的波浪参数见表 2。表 2 中为 $f_p$ 峰频,$\Delta f$ 为频率范围,$A$ 为聚焦波波幅。当 $A$ 为正时表示波峰聚焦,当 $A$ 为负时表示波谷聚焦。数值模拟指定的聚焦位置距离造波板 11.4 m,与物理试验一致。

**表 2 聚焦波浪参数**

Tab. 2 Focusing wave parameters

| 组次 | $f_p$/Hz | $\Delta f$/Hz | $A$/m |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.83 | 0.66 | −0.03 |
| 2 | 0.63 | 0.60 | −0.03 |
| 3 | 0.63 | 0.60 | 0.03 |
| 4 | 0.83 | 0.66 | 0.06 |

试验结果表明,距离造波板 3.07 m 的两个浪高仪波面时间过程线与试验基本吻合,说明采用上述推板造波可以得到与试验一致的波浪,同时数值模型模拟聚焦波浪的传播过程有效(见图 4,图 4 中只给出 1 种工况的对比结果)。

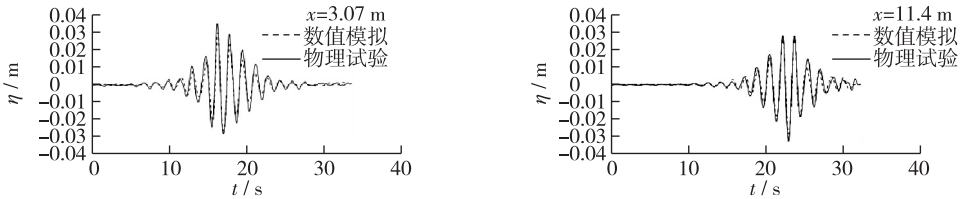



图 4 数值模拟波面时间过程线与试验结果对比

Fig. 4 Comparison between numerical wave time series and experimental results

需说明的是,数值模拟结果与试验结果不可避免地存在一定差异,原因是物理试验中存在造波板相位滞后误差以及传播过程中的能量损耗,而数值模拟中存在数值耗散,以及网格尺度对于模拟结果的影响等。由前述规则波的数值模拟结果可见,在 $\Delta x = 0.1$ m 时,$f = 0.5$ 和 0.83 Hz 时的模拟结果都好,而 $f = 1.16$ Hz 时,波浪产生较大的沿程衰减,1 和 4 模拟组次对应 $f_p = 0.83$ Hz,$f_{min} \sim f_{max}$ 为 0.50~1.16 Hz,这说明基于 $L_p$ 划分网格的方法可保证峰频和低频时的模拟波浪质量,但高频部分的模拟效果会受影响,这也是 Fluent 基于网格算法模拟聚焦波的一个弊端。因为根据线性理论,聚焦波浪可以看做是不同频率不同相位的规则波在指定时间和地点聚焦形成的,而高频部分的波浪模拟质量不佳会影响整体模拟效果。试验结果还表明,网格加密与否对计算结果影响不大,考虑到网格对计算速度的影响,认为取 $\Delta x = 0.1$ m 可满足计算精度要求。

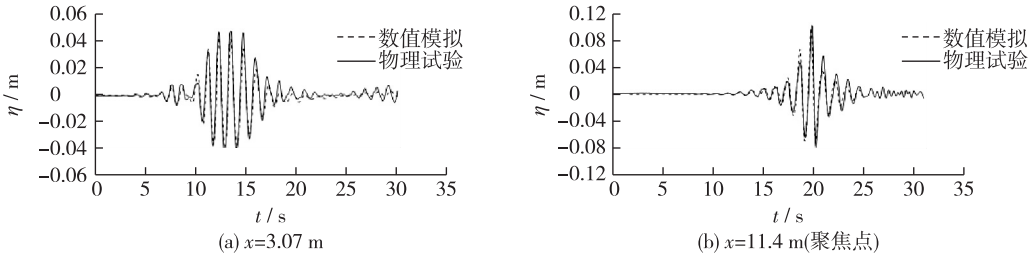
聚焦波浪聚焦点水面下0.15 m处的水质点速度时间过程与物理试验结果的比较表明，无论是水平速度还是垂直速度均与物理试验结果相吻合，同时水平速度时间过程线与波面时间过程线形状相似。

## 3　聚焦波与圆柱作用的数值模拟结果

### 3.1　聚焦波空间波面及圆柱周围涌高模拟

为了进一步验证数值计算模型的有效性，同时考虑网格尺度对于波浪模拟结果的影响，选取孙一艳[9]试验中同一谱峰频率 $f_p=0.83$ Hz 和谱宽 $\Delta f=0.66$ Hz，不同聚焦波波幅 $A$ 为 0.03，−0.03，0.06 和−0.08 m 的 4 个组次进行数值模拟。

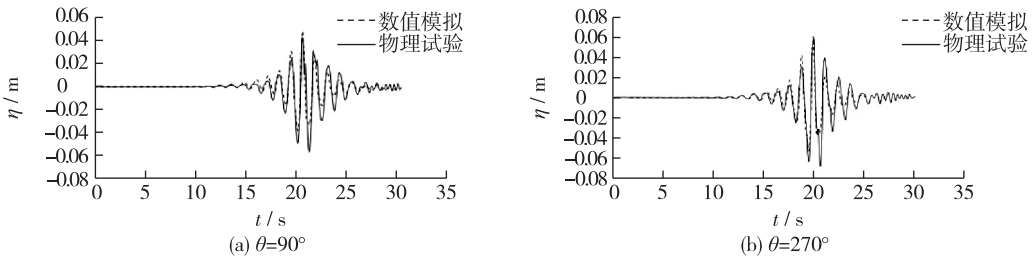
图 5 给出了波浪参数为 $A=0.06$ m，$f_p=0.83$ Hz，$\Delta f=0.66$ Hz 时聚焦波浪在 $x=3.07$ 和 11.4 m（聚焦点）处的波面时间过程数值结果与试验结果的比较，图 6 给出了圆柱周围的波面时间过程的数值结果与试验结果的比较。从图 5 和 6 中可以看出，聚焦波与圆柱作用后，聚焦点波幅增加，波浪有较大爬高。而在圆柱两侧（90° 和 270°）附近，波浪峰值变化不明显，模拟结果波谷比物理试验结果要小。受试验测量误差的影响，物理试验结果显示，90° 和 270° 附近波浪峰值有一定差异，数值结果显示圆柱左右涌高波面基本对称。




(a) $x$=3.07 m　　(b) $x$=11.4 m(聚焦点)

图 5　聚焦波浪的波面时间过程线（$A=0.06$ m，$f_p=0.83$ Hz，$\Delta f=0.66$ Hz）

Fig. 5　Wave time series of focusing wave（$A=0.06$ m，$f_p=0.83$ Hz，$\Delta f=0.66$ Hz）




(a) $\theta$=90°　　(b) $\theta$=270°

图 6　圆柱周围波面时间过程线

Fig. 6　Wave time series around a cylinder

### 3.2　圆柱周围压力模拟结果

数值模拟与物理试验选取的压力点相同，试验测量了 $\theta=0°$（迎浪方向），$\theta=90°$（侧壁），$\theta=180°$（背浪方向）3 个位置，9 个测点的压力时间过程，1#，4#和 7#位于静水面，2#，5#和 8#位于水面下 0.1 m 处，3#，6#和 9#位于水面下 0.2 m 处，用来测量不同水深的点压力分布，如图 7 所示。图 8 为数值模拟迎浪面 3 个测点（1#，2#，3#），侧壁 3 个测点（4#，5#，6#）和背浪 3 个测点（7#，8#，

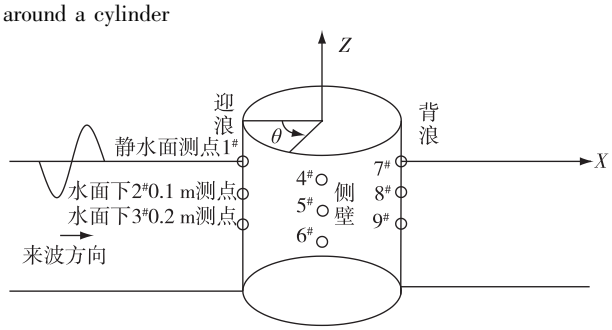
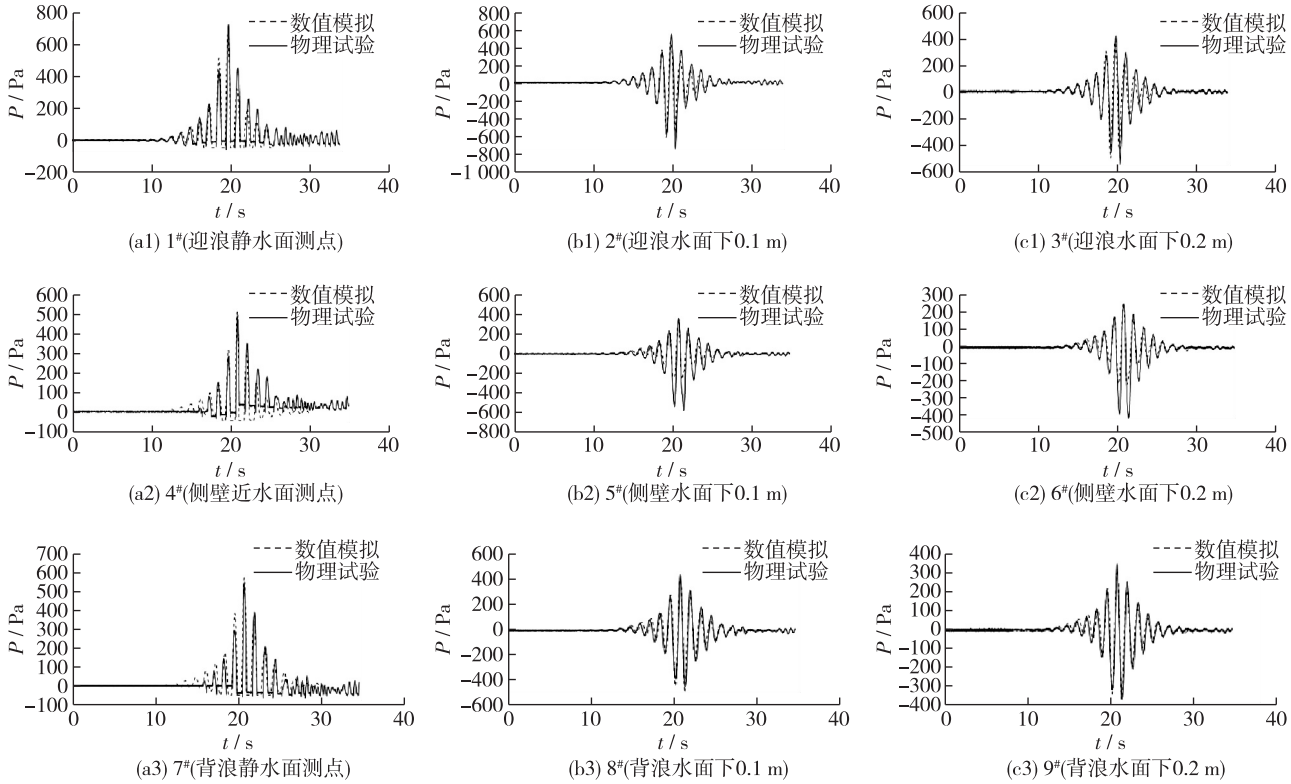



图 7　圆柱周围压力测点布置

Fig. 7　Pressure point arrangement around a cylinder

9#)的压力时间过程与试验结果比较,从图中可以看出在 3 个方向的静水面压力测点的模拟结果都与物理试验结果基本吻合,迎浪面和侧壁面水面下 0.1 和 0.2 m 的测点波谷小于试验结果,但波峰跟试验结果相符,而背浪方向测点的模拟效果较好,基本与试验一致。




(a1) 1#(迎浪静水面测点) (b1) 2#(迎浪水面下0.1 m) (c1) 3#(迎浪水面下0.2 m)

(a2) 4#(侧壁近水面测点) (b2) 5#(侧壁水面下0.1 m) (c2) 6#(侧壁水面下0.2 m)

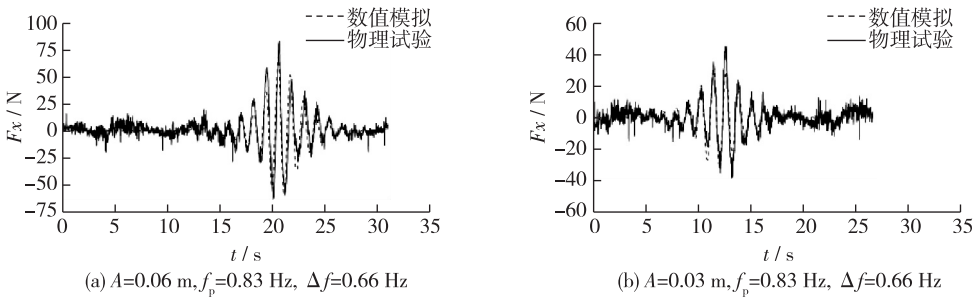
(a3) 7#(背浪静水面测点) (b3) 8#(背浪水面下0.1 m) (c3) 9#(背浪水面下0.2 m)

图 8 各压力测点的压力时间过程线

Fig. 8 Pressure time series

### 3.3 圆柱正向总力与聚焦点速度模拟结果

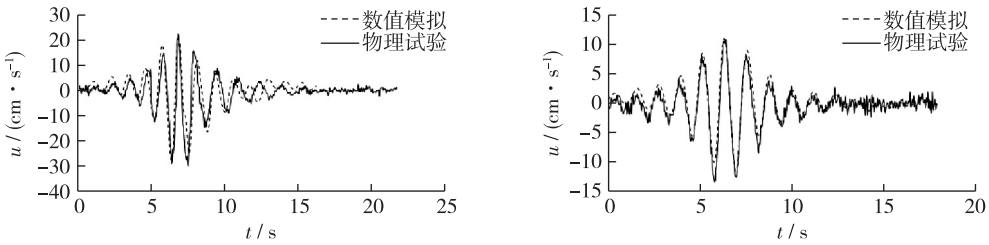
图 9 和 10 分别给出了波浪参数 $A=0.06$ m, $f_p=0.83$ Hz, $\Delta f=0.66$ Hz 和 $A=0.03$ m, $f_p=0.83$ Hz, $\Delta f=0.66$ Hz 的聚焦波浪与圆柱作用时的圆柱正向总力时间过程和聚焦点水面下 0.15 m 处水质点的水平速度时间过程数值模拟结果与试验结果的对比。可以看出,正向总力的模拟结果与试验结果基本吻合,同时正向总力与聚焦波波面相关性很好。物理试验中速度测量使用 ADV 流速仪,将流速仪放置在距离圆柱 0.01 m 紧贴圆柱的位置,放置圆柱后聚焦点处水质点速度的数值结果与试验结果总体来讲基本一致。聚焦波浪可以认为是一个大波群形成的极限波浪,波峰很大,波谷左右对称。




(a) $A$=0.06 m, $f_p$=0.83 Hz, $\Delta f$=0.66 Hz (b) $A$=0.03 m, $f_p$=0.83 Hz, $\Delta f$=0.66 Hz

图 9 圆柱正向总力时间过程线

Fig. 9 Total force time series of a cylinder




(a) $A$=0.06 m, $f_p$=0.83 Hz, $\Delta f$=0.66 Hz　　(b) $A$=0.03 m, $f_p$=0.83 Hz, $\Delta f$=0.66 Hz

图 10　聚焦点水面下 0.15 m 处水质点水平速度时间过程线

Fig. 10　Water partical's horizontal velocity time series under a focus point of 0.15 m

从图 9 可见，圆柱受到的正向总力与聚集波波面具有很好的相关性，圆柱在聚焦波浪作用时，正向总力最大值也变大，之后会减小。从图 10 可见，聚焦点处水质点的水平速度过程也与波面过程线相关，速度峰值很大，左右谷值对称。

### 3.4　数值计算结果与物理试验结果的误差分析

波面特征值可用波浪的最大波幅表示，为了定量分析数值模拟结果与试验结果的差别，波面误差定义为：

$$e_h = \left| \frac{A_{\mathrm{n,max}} - A_{\mathrm{e,max}}}{A_{\mathrm{e,max}}} \right| \tag{8}$$

式中：$A_{\mathrm{e,max}}$ 为物理试验最大波幅值；$A_{\mathrm{n,max}}$ 为数值计算最大波幅值。

压力特征值用正向压力值和负向压力值的误差表示，定义为：

$$e_{P\max} = \left| \frac{P_{\mathrm{n,max}} - P_{\mathrm{e,max}}}{P_{\mathrm{e,max}}} \right| \tag{9}$$

$$e_{P\min} = \left| \frac{P_{\mathrm{n,min}} - P_{\mathrm{e,min}}}{P_{\mathrm{e,min}}} \right| \tag{10}$$

式中：$P_{\mathrm{e,max}}$ 为物理试验正向最大点压力值；$P_{\mathrm{e,min}}$ 为物理试验负向最大点压力值；$P_{\mathrm{n,max}}$ 为数值计算正向最大点压力值；$P_{\mathrm{n,min}}$ 为数值计算负向最大点压力值。

表 3 给出了聚焦波浪与圆柱作用的数值计算与物理试验的波面和压力特征值的误差统计结果。从表 3 中可见，聚集点处和圆柱 $\theta = 270^\circ$ 的位置波面误差很小，一般小于 5%，而在圆柱 $\theta = 90^\circ$ 的位置波面误差较大，误差可达 14%。而从表 3 压力特征值的误差统计结果可见，$\theta = 90^\circ$ 处正向最大压力误差较小，一般小于 7%，而 $\theta = 90^\circ$ 和 $180^\circ$ 处的误差较大，但模拟误差一般在 15%以内，而负向最大压力误差值，在 $\theta = 90^\circ$ 即圆柱侧壁位置，误差值较大。原因可能是侧壁位置是波浪作用的分界处，且本文圆柱尺度介于大尺度与小尺度之间，在物理试验过程中可能产生了尾涡，并受到了尾涡形成-脱离的影响，所以物理试验结果中的侧壁面负向最大点压力值较大；而数值计算中，对于涡的模拟需要极为精细的网格尺度，而本文的网格尺度并不能达到涡的模拟要求，所以并没有涡的产生，在侧壁上的负向压力也没有表现出物理试验中的特点。孙一艳在试验中也没对涡的产生进行相关的观测，所以侧壁处压力不稳定问题的机理仍需要进一步研究。总之，本文重点分析了数值计算与物理试验宏观结果的对比，关于聚焦波浪对于不同尺度圆柱作用的机理，还应再做进一步研究。

**表 3　波面和压力特征值误差**

Tab. 3　Error of wave and pressure eigenvalues

| 特征值 | 位置 | 0° | 90° | 180° |
|---|---|---|---|---|
| $e_h$ | 波面 | 0.034 6 | 0.144 6 | 0.041 7 |
| $e_{P\max}$ | $z/h=0$ | 0.079 6 | 0.059 2 | 0.060 0 |
| | $z/h=-0.2$ | 0.156 5 | 0.003 4 | 0.088 9 |
| | $z/h=-0.4$ | 0.121 8 | 0.067 2 | 0.137 9 |
| $e_{P\min}$ | $z/h=0$ | 0.045 6 | 0.370 9 | 0.094 5 |
| | $z/h=-0.2$ | 0.180 4 | 0.510 4 | 0.088 9 |
| | $z/h=-0.4$ | 0.091 4 | 0.474 9 | 0.003 2 |

## 4 结 语

本文基于 Fluent 软件,采用 VOF 方法捕捉自由面,使用推板造波、阻尼消波的方法建立了数值计算模型。通过规则波浪的模拟验证了造波与消波方法的正确性,并分析了 $L/\Delta x$ 对于模拟波浪结果的影响,建议 $L/\Delta x$ 的值宜取为 20~50。

在不放圆柱的数值水池中利用数值计算模型,针对 4 个组次的聚焦波传播进行了模拟,聚焦波面和聚焦点水面下 0.15 m 处的水质点速度时间过程模拟结果皆与物理试验结果基本吻合,模拟的聚焦波波幅值略小于物理试验结果,并且由于非线性的影响,模拟的目标聚焦波波幅越大越明显。

针对聚焦波浪与圆柱的作用进行了模拟研究,综合比较了数值模拟和物理模拟所得波面的时间过程、聚焦点水面下 0.15 m 处速度时间过程、圆柱周围波浪爬高过程、圆柱周围压力、圆柱所受波浪总的水平力等宏观结果。同时对聚焦波波面和圆柱点压力特征值进行了误差分析,并分析了误差产生原因。总体来讲,数值模拟结果与物理试验结果基本一致。

综上,本文基于 Fluent 软件所建立的数值计算模型,可以较好地模拟聚焦波浪的传播过程及其与圆柱的作用,并可应用于聚焦波浪与海洋工程建筑物的模拟研究中。

**参 考 文 献:**

[1] GRILLI S T, VOGELMANN S, WATTS P. Development of a 3D numerical wave tank for modeling tsunami generation by underwater landslides[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2002, 26(4): 301-313.

[2] HAN T, ZHANG Q H, PANG H L, et al. Generation and properties of freak waves in a numerical wave tank[J]. China Ocean Engineering, 2004, 18(2): 281-290.

[3] 黄金刚. 二维聚焦极限波浪的模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004. (HUANG Jin-gang. Simulation study of 2-D focusing wave[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004. (in Chinese))

[4] 柳淑学, 洪起庸. 三维极限波的产生方法及特性[J]. 海洋学报, 2004, 26(6): 133-142. (LIU Shu-xue, HONG Qi-yong. The generation method of three-dimensional focusing wave and its properties[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(6): 133-142. (in Chinese))

[5] LI Jin-xuan, LIU Shu-xue, HONG Qi-yong. Numerical study of two-dimensional focusing waves[J]. China Ocean Engineering, 2008, 22(2): 253-266.

[6] 李金宣, 柳淑学, 孙一艳, 等. 方向分布对三维聚焦波浪波面特性影响研究[J]. 海洋工程, 2008, 26(2): 26-33. (LI Jin-xuan, LIU Shu-xue, SUN Yi-yan, et al. Study on effect of directionality on 3D focusing wave characteristics[J]. The Ocean Engineering, 2008, 26(2): 26-33. (in Chinese))

[7] 柳淑学, 李金宣, HONG Key-yong. 多向聚焦破碎波的实验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(3): 293-304. (LIU Shu-xue, LI Jin-xuan, HONG Key-yong. Expeimental study on multi-directional focused wave breaking in wave basin[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(3): 293-304. (in Chinese))

[8] 孙一艳, 柳淑学, 臧军, 等. 聚焦波浪对直立圆柱作用的试验研究[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(1): 5-9. (SUN Yi-yan, LIU Shu-xue, ZANG Jun, et al. Experimental study of focused wave on a verticalcircular cylinder[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2008, 34(1): 5-9. (in Chinese))

[9] 孙一艳. 二维聚焦波浪及其与直立圆柱作用的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010. (SUN Yi-yan. Studies of 2-D focusing wave and interactions with a vertical cylinder[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese))

[10] 宁德志, 卓晓玲, 滕斌, 等. 水流对聚焦波特性影响的数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(5): 555-561. (NING De-zhi, ZHUO Xiao-ling, TENG Bin, et al. Numerical investigation of the current influence on the characteristics of focused waves[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(5): 555-561. (in Chinese))

[11] 卓晓玲. 聚焦波与水流及结构物作用的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. (ZHUO Xiao-ling. Numerical invesigation on the interaction of focused waves with uniform current and structures[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))

[12] 罗洵, 马玉祥. 聚焦波浪在潜堤上传播变形的数值模拟[J]. 工程力学, 2013(4): 466-471. (LUO Xun, MA Yu-xiang.

Numerical model for focused wave transformation over a submerged bar[J]. Engineering Mechanics, 2013(4): 466-471. (in Chinese))

[13] 夏维达，马玉祥，董国海. 随机波浪中畸形波的数值模拟[J]. 中国水运，2014，14(7)：117-120. (XIA Wei-da, MA Yu-xiang, DONG Guo-hai. Numerical simulation of freak wave in the random waves[J]. China Water Transport, 2014, 14(7): 117-120. (in Chinese))

[14] 杨波，石爱国，吴明. 基于抗数值衰减的短波数值模拟[J]. 水运工程，2011(12)：30-35. (YANG Bo, SHI Ai-guo, WU Ming. Numerical simulation of short wave based on anti-numerical-attenuation[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(12): 30-35. (in Chinese))

# Numerical simulation of interactions of focusing wave with a vertical cylinder

WU Xin-zhu[1,2], LIU Shu-xue[1], LI Jin-xuan[1]

(1. *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering*, *Dalian University of Technology*, *Dalian* 116024, *China*; 2. *Baicheng Weapon Test Center*, *Baicheng* 137001, *China*)

**Abstract**: A numerical model used to simulate wave propagation was developed based on the Fluent software. Through simulating regular waves with different wave parameters, the relationships between the grid scale $L/\Delta x$ and the quality of the simulated waves were analyzed. The grid scale for the numerical model was proposed according to the compared results, and the effectiveness of the damping absorber and the piston type wave making method were verified. On the basis of the numerical model, the focusing wave propagation was simulated by simulating wave spectrum. The simulated focusing wave time series and the water particle's velocity under a focus point for 0.15 m were compared with the experimental results at different positions, and the effectiveness of the numerical model with the method for simulating wave spectrum was verified. Furthermore, the interaction between the focusing wave with a vertical cylinder was simulated. The numerical results including the focusing wave time series and water particle's velocity time series under a focusing point for 0.15 m, the wave fluctuation time series around the cylinder, the point pressure time series on the cylinder and the cylinder's positive total pressure time series were compared with the associated experimental results. The numerical simulation results were in good agreement with the experimental results. The comparison between the numerical and experimental results verified the effectiveness of the numerical model. At the end of this paper, in order to accumulate experience and lay a solid foundation for further research for interactions between the focusing wave and other forms of marine structures with the Fluent software's platform, the error of the eigenvalues of the focusing wave height and the point pressure around the cylinder were calculated and causes of the error analyzed.

**Key words**: fluent; focusing wave; vertical cylinder; numerical simulation