

# 规则波下圆柱波浪爬升特性的数值研究

刘正浩, 万德成\*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

\*通信作者: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn)

**摘要:** 海洋平台服役时不仅长期遭受波浪载荷的作用, 而且会出现波浪爬升等非线性现象。恶劣海况下波浪爬升可能会导致水体对平台下甲板形成巨大的砰击压力, 破坏平台结构, 因此准确预报波浪爬升效应在平台设计及结构安全性方面具有重要的意义。本文以一固定直立圆柱为研究对象, 基于自主研发的船舶与海洋工程 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对其波浪爬升和波浪载荷进行了数值模拟。首先通过空场情况下波浪的数值模拟, 与理论结果比较, 验证了求解器波浪生成的准确性。其次, 选用不同的波浪参数, 分析波浪周期、波陡参数对直立圆柱周围的波浪爬升、波浪载荷的影响, 计算得到的最大波浪爬升值与实验结果进行了比较。探讨了波浪爬升过程中的自由面演化过程以及二次波峰现象。计算结果验证了 naoe-FOAM-SJTU 求解器可以很好地模拟波浪爬升问题, 预报结构物的水动力性能。

**关键词:** 波浪爬升; 波浪载荷; 数值波浪水池; naoe-FOAM-SJTU 求解器

## 1 引言

随着海上资源的开发从近海海域逐渐转向深海海域, 浮式海洋平台得到广泛应用, 这些浮式海洋平台通常采用立柱式结构, 在极端海况条件下, 这些海洋平台的波浪爬升尤为明显, 甚至会上升至平台下甲板, 产生砰击压力, 破坏平台的结构和稳定性。为避免波浪爬升对平台产生破坏, 在设计时, 应该准确预估波浪爬升。因此, 研究立柱式平台的波浪爬升对于工程应用具有重要意义。

针对平台波浪爬升问题, 国内外学者主要是通过模型实验、理论分析以及 CFD 方法进行研究。Galvin 和 Hallermeier<sup>[1]</sup>对直立圆柱的波浪爬升进行了模型试验研究, 他们发现对于大波陡的波浪, 其爬升效应主要受衍射效应和圆柱尾流区域的粘性耗散效应的影响。Niedzwecki 和 Duggal<sup>[2]</sup>则通过模型实验研究了规则波和随机波浪中圆柱波浪爬升问题, 发现除波幅很小工况外, 线性绕射理论明显低估圆柱波浪爬升的水平。Chaplin 等<sup>[3]</sup>针对圆柱在极端波浪作用下的波浪力进行了研究, 发现实验中的波浪力比 Morison 公式的估计值要大, 他们还发现大波幅工况下“二次峰值”的幅值主要与波陡参数有关。Morris-Thomas 等<sup>[4]</sup>

通过模型试验研究了波陡和散射参数对波浪爬升的影响。国内单铁兵等人<sup>[5-6]</sup>通过模型试验的方法研究了波浪入射角度和水流对立柱周围波面扰动特性的影响。沈玉稿等<sup>[7]</sup>通过模型研究了极端波浪对风机桩柱的砰击波浪力，发现砰击波浪力与最大波浪爬升高度成正比。

理论分析从最初的线性散射理论，发展成二阶散射理论，再到完全非线性理论，可以对波浪爬升的各阶谐频成份进行分析 Trulsen 等<sup>[8]</sup>采用完全非线性的方法预报了单根直立柱周围的波浪爬升。Kwon 等<sup>[9]</sup>在 2005 年对极端波浪及其引起的砰击波浪力进行连续小波变换，结果显示极端波浪时历和波浪力时历中含有高频的成分。耿宝磊<sup>[10]</sup>通过高阶边界元法建立了波浪对结构物作用的时域计算程序并利用 Morison 公式计算极端波浪绕射场作用下细小杆件的波浪载荷。刘珍等<sup>[11]</sup>采用高阶边界元法建立波流与任意形状结构物相互作用的时域数学模型，通过波流与直立圆柱相互作用的数值计算研究了一阶激振力和二阶慢漂力随波数的变化关系以及圆柱周围波幅的分布曲线。

近年来，随着计算机技术的迅速发展，基于三维数值水池的 CFD 方法逐渐用于研究波浪爬升问题。Danmeier 等<sup>[12]</sup>利用粘性流软件 ComFLOW 模拟了重力式平台在规则波条件下的波浪爬升效应。Gerald 等<sup>[13]</sup>采用 OpenFOAM 求解器研究了非线性波与圆柱的相互作用，并讨论了网格大小、离散格式、时间步等对计算结果的影响。Chella 等人<sup>[14-16]</sup>用 CFD 求解器 REEF3D 数值模拟了浅水中波浪破碎问题，并分析了波浪破碎对圆柱所受波浪力大小的影响。Sung-Hwan Yoon 等人<sup>[17]</sup>用 CFD 求解器 CFDSHIP-IOWA 研究了规则波中单柱/多柱的波浪爬升问题。Paulsen 等<sup>[18]</sup>通过模型实验和 OpenFOAM 数值模拟研究了极端波浪及其作用下垂直圆柱波浪力的时域和频率结果，发现波浪力高阶频域数值结果与实验结果相差较大。国内唐鹏等<sup>[19]</sup>采用 OpenFOAM 求解器对波浪与直立圆柱爬升问题进行了数值研究。查晶晶<sup>[20]</sup>采用动网格技术模拟推板和摇板造波，研究了波浪绕方柱爬升的三维数值模拟。曹洪建等<sup>[21-22]</sup>基于 OpenFOAM 求解器开发了三维数值水池，并通过一系列标模计算，验证了 OpenFOAM 求解器在处理波、流与结构物相互作用中的有效性。彭耀等<sup>[23]</sup>基于自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器，研究了固定式海上风机基础在波流联合作用下的波浪力，并与模型实验进行了比较，研究发现，在波流同向和波流存在夹角的情况下，数值模拟的结果都与实验值吻合的很好。

本文基于自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器，利用三维数值水池模块，对规则波下直立圆柱的波浪爬升、波浪载荷进行数值模拟，分析了波浪参数对波浪爬升、波浪载荷的影响。

## 2 数值方法

### 2.1 流体控制方程

naoe-FOAM-SJTU 求解器是基于开源平台 OpenFOAM 自主开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器<sup>[24-26]</sup>，该求解器包含数值造波与消波模块、六自由度运动模块、湍流模型模块、重叠网格模块以及锚链模块等，可以对船舶及海洋结构物水动力性能进行有效的预报。对于非定常、不可压的黏性流体，naoe-FOAM-SJTU 求解器采用连续方程和 N-S 方程可表示为：

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho (\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma + f_s \quad (2)$$

式中  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{U}_g$  分别为流场速度和网格节点速度,  $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$  表示流场动压力,  $p$  是总压力,  $\rho$  是流体密度,  $\mu_{eff} = \rho(\nu - \nu_t)$  是动力黏性系数,  $f_\sigma$  为表面张力, 只在界面处起作用, 在非界面处为零,  $f_s$  是数值造波中消波区的源项, 仅对消波区有效。

## 2.2 自由面捕捉

naoe-FOAM-SJTU 求解器中自由面的捕捉采用了 OpenFOAM 中自带的 VOF (volume of fluid) 法, VOF 法是目前常用的捕捉自由面的方法, 通过求解体积分函数来捕捉自由面。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{U}_r (1 - \alpha) \alpha] = 0 \quad (3)$$

其中体积分数  $\alpha$  用来表示网格内流体占有体积与整个网格体积的比重。  $\alpha=0$  表示该网格内没有流体,  $0 < \alpha < 1$  表示自由面,  $\alpha=1$  表示该网格单元被流体充满。

## 2.3 数值波浪水池

naoe-FOAM-SJTU 求解器的数值波浪水池包含了数值造波、数值消波以及浪高仪等模块。可以实现推板造波、摇板造波、速度入口边界造波, 用于处理不同的水动力问题, 本文采用速度入口边界造斯托克斯一阶规则波, 入口边界条件设置如下:

$$\eta = a \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t + \delta) \quad (4)$$

$$u = U_0 + a \omega e^{kz} \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t + \delta) \quad (5)$$

$$v = a \omega e^{kz} \cos \beta \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t + \delta) \quad (6)$$

$$w = a \omega e^{kz} \sin \beta \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t + \delta) \quad (7)$$

其中,  $a$ ,  $\omega$  和  $\mathbf{k}$  分别是波幅、波频和波数。  $\beta$  是入射波的方向。为了避免波浪反射对计算精度的影响, 需要在出口边界前设置海绵层阻尼消波区, 通过在动量方程中增加一个源项  $f_s = -\rho \mu_s (U - U_{corr})$ , 使在特定区域内的自由波面逐渐消弱至水平面, 从而避免在出口边界处形成反射。本文采用的消波阻尼源项为:

$$f_s(x) = \alpha_s [(x - x_0) / L_s] \quad x > x_0 \quad (8)$$

其中  $x_0$  表示消波区的起始位置,  $L_s$  表示消波区长度,  $\alpha_s$  为人工粘性系数,  $U_{corr}$  为修正系数, 主要作用是进行质量修正, 保证计算过程中的质量守恒。

# 3 计算模型

## 3.1 模型及计算网格

本文选取一直立圆柱作为研究对象来研究规则波下圆柱的波浪爬升和波浪载荷, 实验数据来源于韩国船舶与海洋工程研究所<sup>[27]</sup>。圆柱的直径为 16 m, 吃水为 24 m。圆柱周围设置了 10 个浪高仪, 如图 1 所示。表 1 给出了各浪高仪的位置。

网格的划分是利用 OpenFOAM 自带的 snappyHexMesh 工具实现的，首先运用 blockMesh 软件绘制背景网格，再利用 snappyHexMesh 工具划分圆柱表面的网格。计算域大小为： $-2L < x < 3L$ ,  $-L < y < L$ ,  $-L < z < 0.5L$ ，其中  $L$  是波长，计算域如图 2 所示。数值水池左侧为波浪入口边界，右侧选取长度为  $L$  的消波区，用来抵消出口处的波浪反射，圆柱表面采用无滑移固壁条件。划分网格时对自由液面以及圆柱表面部分进行局部细化，以便精确捕捉自由液面和处理基础表面边界层内速度等物理量的剧烈变化。一个波高范围内的网格数量大于 20 个，一个波长范围内的网格数约为 70 个，模型表面  $y^+$  控制在 50 左右，整个网格量大约为 170 万。图 3 为计算网格。

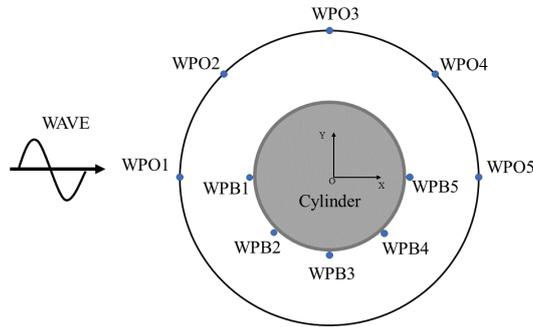


图 1 圆柱周围浪高仪的布置图

表 1 各浪高仪的位置

Inner circle	$x$ (m)	$y$ (m)	Outer circle	$x$ (m)	$y$ (m)
WPB1	-8.2063	0.0000	WPO1	-16.0000	0.0000
WPB2	-5.8027	-5.8027	WPO2	-11.3137	-11.3137
WPB3	0.0000	-8.2063	WPO3	0.0000	16.0000
WPB4	5.8027	-5.8027	WPO4	11.3137	11.3137
WPB5	8.2063	0.0000	WPO5	16.0000	0.0000

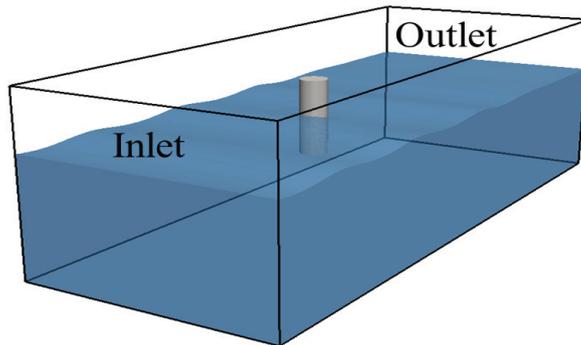


图 2 计算域大小

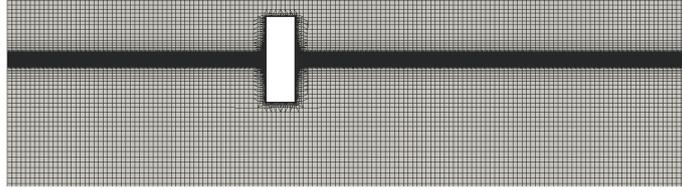


图3 网格划分图

### 3.2 计算工况

本文对直立圆柱在规则波下的波浪爬升进行了数值模拟，计算工况为 7s 和 15s 两种波浪周期。每个周期包含  $H/L = 1/30$ ,  $1/16$  和  $1/10$  三个波陡参数，工况具体参数如表 2 所示。

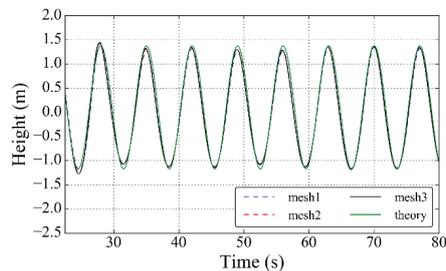
表 2 计算工况

		$T = 7\text{ s}$		$T = 15\text{ s}$		
$H/L$	$L(\text{m})$	$D/L$	$H(\text{m})$	$L(\text{m})$	$D/L$	$H(\text{m})$
1/30			2.548			11.700
1/16	76.44	0.21	4.777	351.00	0.046	21.938
1/10			7.644			35.100

## 4 结果分析

### 4.1 数值造波验证

为验证数值模拟的正确性，本文首先针对空场造波进行了网格收敛性验证，并与理论解进行了对比。对于  $T=7\text{s}$ ,  $H/L=1/30$  工况，采用三套网格进行了数值模拟，网格数分别为 33 万、96 万和 271 万，时间步长均为  $0.005\text{s}$ 。图 4 所示为  $T=7\text{s}$ ,  $H/L=1/30$  工况下，采用三套网格计算得到的  $x=0$  处自由面时历曲线与理论结果的对比。可以发现，三套网格测得的结果几乎完全一致，波形稳定，并且与理论结果吻合得很好。这表明本文所采用的方法具有很好的网格收敛性，综合波陡较大的工况以及计算效率，本文采用 96 万的网格量作为空场造波的网格。

图4  $x=0$  处自由面时历曲线与理论解对比图

#### 4.2 波浪爬高验证

为研究不同波浪参数下的波浪爬升和波浪载荷特性，本文首先将不同工况下计算得到的无因次参数 RAO 结果与实验结果进行了对比。图 5 和图 6 分别为  $T=7s$  工况下圆柱附近测波点 (WPB1、WPB4 和 WPB5) 以及远离圆柱的测波点 (WPO1、WPO4 和 WPO5) 的 RAO 值与实验结果的对比，可以看出，本文数值模拟的结果与实验结果吻合的较好，说明本文的数值模拟具有较好的精度。对于圆柱前方的测波点 WPB1 和 WPO1，RAO 值随着波陡的增大而增大，这与实验结果是一致的，说明波陡越大，圆柱前方的波浪爬升现象越明显。在 WPO1 处， $H/L=1/10$  工况下，数值计算的 RAO 值与实验结果相差较大。在 WPB4 和 WPO4 处的 RAO 值随波陡增加反而减小，这也与实验趋势是一致的。而在圆柱后方 WPB5 和 WPO5 处的实验 RAO 值约为 1，数值模拟结果比实验值偏小。

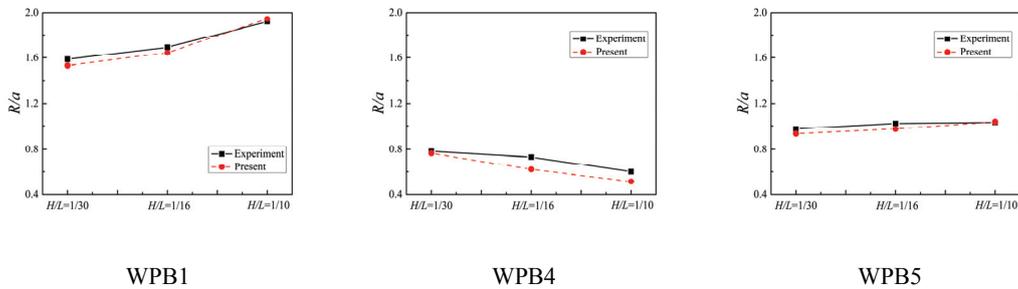


图 5 圆柱附近测波点自由面的 RAO 值

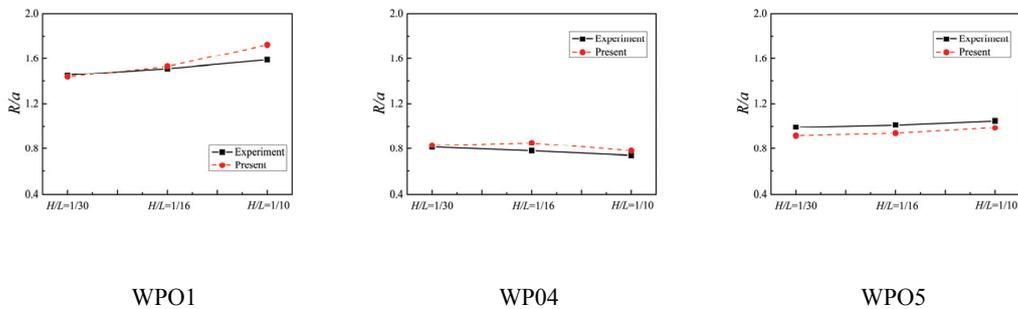


图 6 远离圆柱测波点自由面的 RAO 值

#### 4.3 自由面时历曲线 ( $T=7s$ )

图 7 和图 8 所示分别为  $T=7s$  时，三种波陡下圆柱附近的自由面时历曲线图以及傅立叶变换后频率谱图，三个测波点分别为 WPB1，WPB4 和 WPB5。可以看出，随着波陡的增大，波高时历曲线呈现明显的非线性特征，在  $T=7s$ ， $H/L=1/10$  工况下，WPB4 处出现了明显的二次波峰，且 WPB4 处的波高小于其他测波点处，表明 WPB4 处具有强非线性特征。这是由于波浪绕过圆柱后方相互作用，一部分会向上游回流并与入射波相互叠加，从而形成的二次波峰。通过傅立叶变换可知，在波陡较大的情况下，波高的二阶幅值也比较大，

在 WPB4 和 WPB5 处甚至出现了三阶幅值。

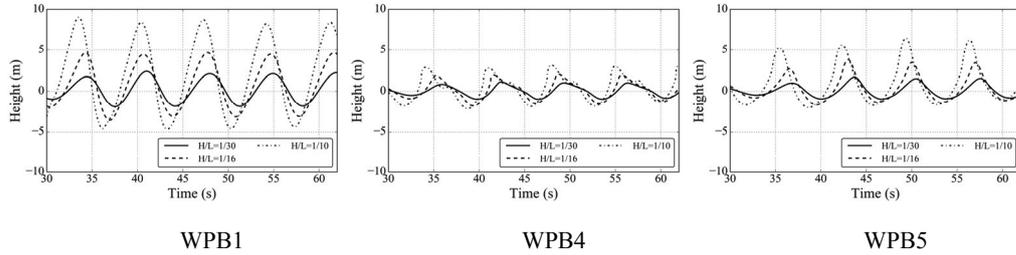


图7 不同波陡下圆柱附近测波点自由面时历曲线

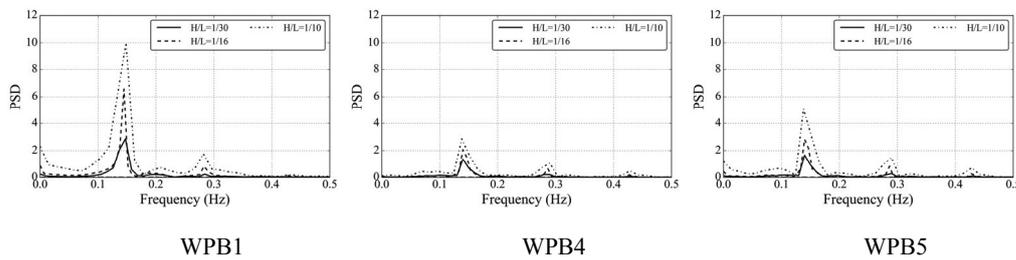


图8 不同波陡下圆柱附近测波点频率谱

图 9 和图 10 所示为  $T=7s$  时, 三种波陡下远离圆柱的三个测波点 WPO1, WPO4 和 WPO5 处自由面时历曲线图以及傅立叶变换后频率谱图。可以看出, 远离圆柱处的自由面变化趋势与圆柱附近类似, 但是非线性现象不如圆柱附近明显, 测波点的各阶幅值均小于圆柱附近的测波点。

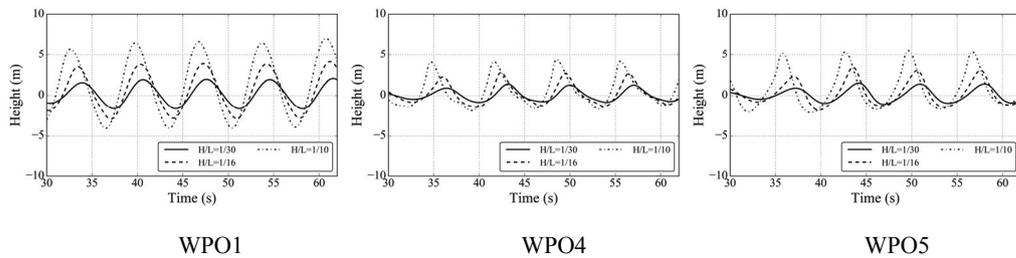


图9 不同波陡下远离圆柱测波点自由面时历曲线

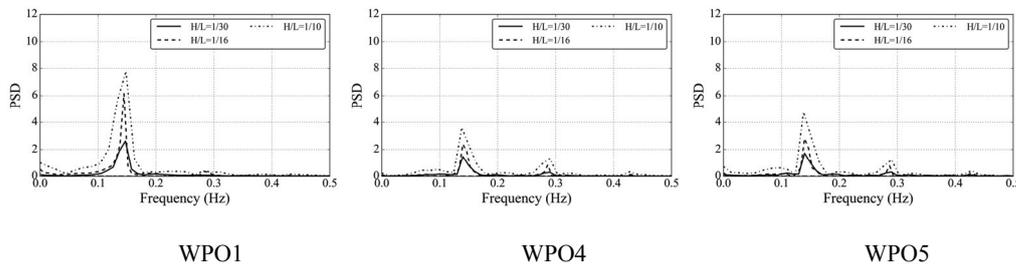


图10 不同波陡下圆柱附近测波点频率谱

#### 4.4 波浪力分析

图11和图12所示为 $T=7s$ 和 $T=15s$ 工况下的水平波浪力时历曲线和傅立叶变换后的频率谱。从图中可以看出， $T=7s$ 时，波浪力的非线性不如圆柱周围自由面时历，水平波浪力的二阶幅值远小于一阶幅值，这可能是因为计算波浪力时波浪与圆柱相互作用产生的局部效应被忽略了。而对于 $T=15s$ 时，大波陡情况下，波浪力的高阶成分对于波浪力影响很大，可以看到，在 $H/L=1/10$ 时，出现四阶水平力。

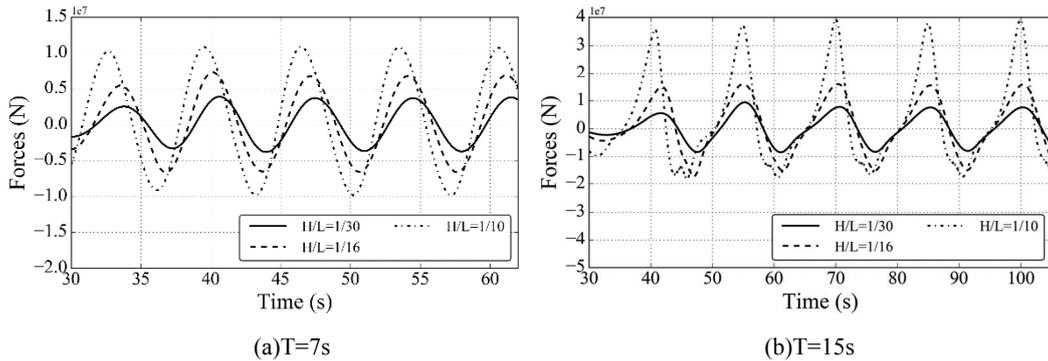


图 11 不同波陡下圆柱水平波浪力时历曲线

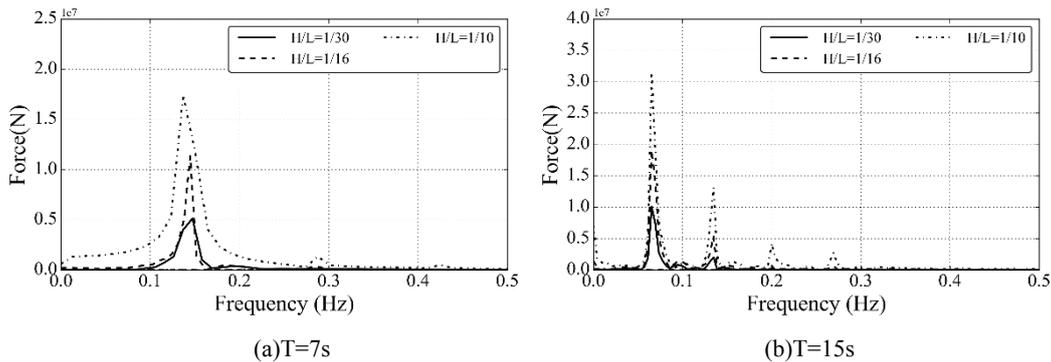
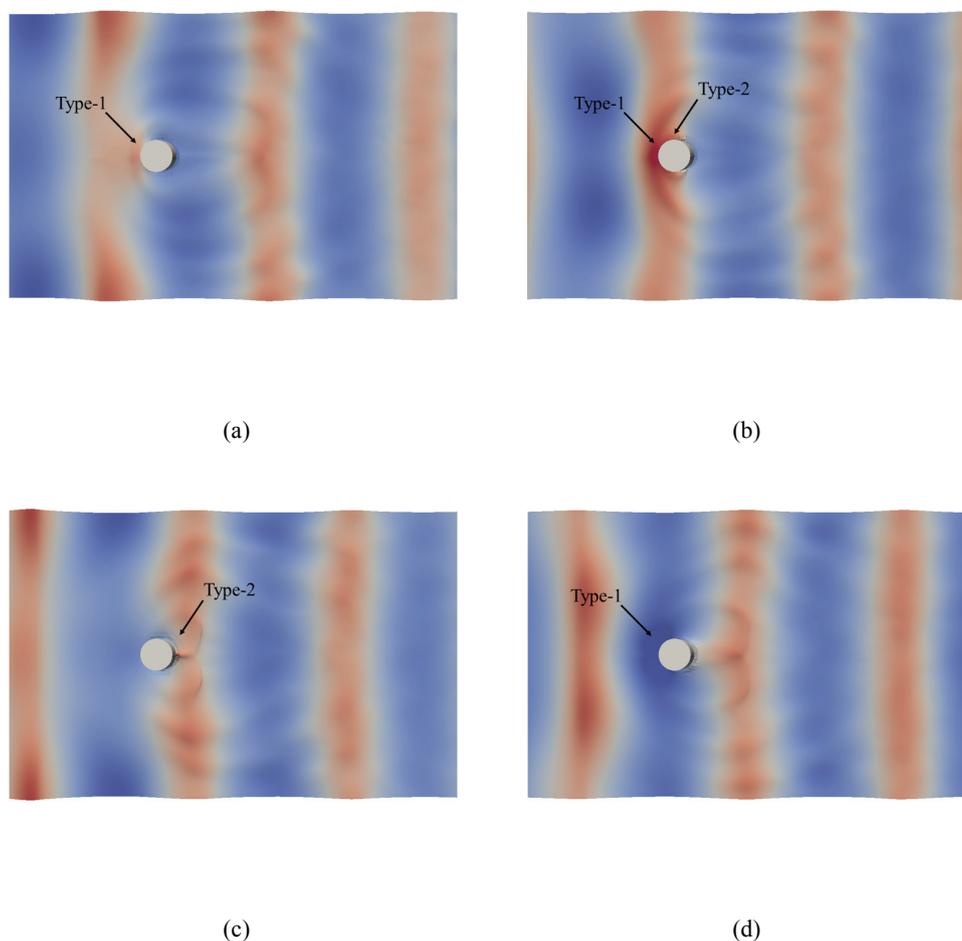


图 12 不同波陡下圆柱水平波浪力频率谱

#### 4.5 圆柱周围流场分析

图13为 $T=7s$ ,  $H/L=1/10$ 工况下圆柱周围波浪衍射图，本文的数值模拟方法可以清晰地捕捉到圆柱周围的波浪衍射。从图中可以看出，当波峰接近圆柱前方时，圆柱前方的水体被圆柱阻隔，形成了与圆柱同心的波浪衍射场（Type-1），这与Swan和Sheikh<sup>[28]</sup>的模型实验结果是一致的。当波浪继续向前从圆柱两侧绕过圆柱后，在圆柱后方相遇，一部分会向上游回流并与入射波相互作用，在圆柱的肩部产生一种不与圆柱同心的衍射场（Type-2），这表明波浪在圆柱肩部会发生强烈的非线性现象。当波谷传播到圆柱时，又会产生Type-1的衍射场。

图 13  $T=7s$ ,  $H/L=1/10$  工况下圆柱周围波浪衍射图

## 5 结论

本文基于自主开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU，数值模拟了一座固定式圆柱在规则波作用下波浪爬升特性。本文首先针对  $T=7s$ ,  $H/L=1/30$  工况进行了网格收敛性验证，数值模拟结果与理论结果吻合得很好，说明本文采用的网格具有很好的收敛性。本文将不同工况下计算得到的无因次参数 RAO 结果与实验结果进行了对比，发现本文数值模拟的结果与实验结果吻合的较好，对于圆柱前方的测波点的 RAO 值随着波陡的增大而增大，这与实验结果是一致的，说明波陡越大，圆柱前方的波浪爬升现象越明显，而在圆柱肩部的 RAO 值随波陡增加反而减小。对不同波浪参数

下的测波点进行傅立叶变换可知,在圆柱肩部附近的测波点出现了三阶幅值,而在  $T=7s$  时,波浪力的非线性不如圆柱周围波高的非线性。通过对圆柱周围流场的分析,发现本文的数值模拟可以捕捉到与前人实验吻合的两种波浪衍射现象。本文计算结果展示了 naoe-FOAM-SJTU 求解器可以很好地模拟规则波作用下圆柱的波浪爬升现象,为平台标高的确定提供参考依据。

### 致谢

本研究工作获得国家自然科学基金项目(51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099),上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022),上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300),以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)资助。在此一并表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Galvin C J, Hallermeier R J. Wave run-up on vertical cylinders. In Proc. 13th Int. Conf. Coastal Eng., Vancouver, Canada, 1972, 1955-1974.
- 2 Niedzwecki J M, Duggal S D. Wave run-up and forces on cylinders in regular and random waves. J. Waterw. Port C-ASCE, 1992, 118(6): 615-634.
- 3 Chaplin J R, Rainey R C R, Yemm R W. Ringing of a vertical cylinder in waves. J. Fluid Mech., 1997, 250: 119-147.
- 4 Morris-Thomas M T, Thiagarajan K P. The run-up on a cylinder in progressive surface gravity waves: harmonic components. Appl. Ocean Res., 2004, 26(3-4):98-113.
- 5 单铁兵, 杨建民, 李欣, 肖龙飞. 波浪入射角度对立柱周围波面扰动特性的影响研究. 船舶力学, 2016, 20(10): 1234-1243.
- 6 单铁兵, 杨建民, 李欣, 肖龙飞. 水流对立柱周围波浪爬升特性的影响. 上海交通大学学报, 2014, 48(1): 116-124.
- 7 沈玉稿, 杨建民, 李欣, 等. 风机基础所受波浪抨击力的数值模拟和实验研究. 船舶力学, 2013, 17(9): 1009-1020.
- 8 Trulsen K, Teigen P. Wave scattering around a vertical cylinder: fully nonlinear potential flow calculations compared with low order perturbation results and experiments. In Proc. 21st Int. Conf. Offshore Mech. and Artic Eng., Oslo, Norway, 2002, OMAE2002-28173.
- 9 Kwon S, Lee H, Kim C. Wavelet transform based coherence analysis of freak wave and its impact. Ocean Eng., 2005, 32(13): 1572-1589.
- 10 耿宝磊. 波浪对深海海洋平台作用的时域模拟. 大连: 大连理工大学, 2010.

- 11 刘珍, 滕斌, 宁德志, 孙亮. 波流与结构物相互作用的数值模拟. 计算力学学报, 2010, 27(1): 82-87.
- 12 Danmeier D G, Seah R K M, Finnigan T, Roddier D. Validation of wave run-up calculation methods for a gravity based structure. In Proc. 27th Int. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Eng., Estoril, Portugal, 2008, OMAE2008-57625.
- 13 Gerald C, Morgan J, Zang J. Using the RasInterFoam CFD model for non-linear wave interaction with a cylinder. In Proc. 20th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., International Society of Offshore and Polar Engineers, Beijing, China, 2010, ISOPE-I-10-099.
- 14 Chella M A, Bihs H, Myrhaug D, Muskulus M. Breaking characteristics and geometric properties of spilling breakers over slopes. Coastal Eng., 2015, 95: 4-19.
- 15 Chella M A, Bihs H, Myrhaug D, Aggarwal A, Arntsen A. Hydrodynamic characteristics and geometric properties of plunging and spilling breakers over impermeable slopes. Ocean Model., 2016, 103: 53-72.
- 16 Chella M A, Bihs H, Myrhaug D, Muskulus M. Breaking solitary waves and breaking wave forces on a vertically mounted slender cylinder over an impermeable sloping seabed. J. Ocean Eng. Marine Energy, 2017, 3(1): 1-19.
- 17 Yoon S H, Kim D H, Sadat-Hosseini H, Yang J, Stern F. High-fidelity CFD simulation of wave run-up for single/multiple surface-piercing cylinders in regular head waves. Appl. Ocean Res., 2016, 59: 687-708.
- 18 Paulsen B, Bredmose H, Bingham H. Focused wave impact on a vertical cylinder: experiment, numerical reproduction and a note on higher harmonics. IWWF28, 2013.
- 19 唐鹏, 于定勇, 田艳. 海洋工程中直立圆柱波浪爬升问题的数值研究. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2016, (10): 116-122.
- 20 查晶晶, 万德成. 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波. 海洋工程, 2011, 29(3): 1-12.
- 21 Cao H J, Wan D C. RANS-VOF solver for solitary wave run-up on a circular cylinder. China Ocean Eng., 2015, 29(2): 183-196.
- 22 Cao H J, Wan D C. Benchmark computations of wave run-up on single cylinder and four cylinders by naoe-FOAM-SJTU solver. Appl. Ocean Res., 2017, 65: 327-337.
- 23 彭耀, 张笑通, 万德成, 郇彩云. 海上固定式风机基础的波流载荷数值计算分析. 水动力学研究与进展, 2017, 32(1): 1-10.
- 24 Shen Z R, Wan D C, Carrica P M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering. Ocean Eng., 108, 287-306.
- 25 Shen Z R, Wan D C. An irregular wave generating approach based on naoe-FOAM-SJTU solver. China Ocean Eng., 30, 177-192.
- 26 Wang J H, Wan D C. Numerical simulation of pure yaw motion using dynamic overset grid technology. Chinese J. Hydrodyn., 31, 567-574.
- 27 Sun L, Zang J, Chen L, Taylor R E, Taylor P H. Regular waves onto a truncated circular column: A comparison of experiments and simulations. Appl. Ocean Res., 2016, 59: 650-662.
- 28 Swan C, Sheikh R. The interaction between steep waves and a surface-piercing column. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A., 373, 20140114.

## **Numerical simulation of regular wave run-up on a circular cylinder**

LIU Zheng-hao, WAN De-cheng

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai, 200240, Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

**Abstract:** When the offshore platform is in service, it not only suffers the long-term wave load, but also encounters strong nonlinear phenomena such as wave run-up. Under severe sea conditions, wave run-up may cause a huge slamming pressure on the deck of the platform and destroy the platform structure. Thus, accurate prediction of the wave run-up effect is of great significance for the design of offshore platform design. In this work, the wave interactions with a circular cylinder are investigated using the in-house CFD solver naoe-FOAM-SJTU. The wave run-up and wave loads on the cylinder are discussed. To validate the accuracy of wave generation, the numerical simulation results of wave generation are firstly compared with the theoretical results. Secondly, different wave parameters are selected to analyze the influence of wave period and wave steepness parameters on the wave run-up effect. The calculated response amplitude operates (RAOs) of surface elevation are compared with the experimental results. The evolution process of the free surface and the secondary crest phenomenon during the wave run-up process are discussed. The numerical results indicate that the naoe-FOAM-SJTU solver can simulate the wave run-up problem accurately and predict the hydrodynamic performance of the offshore structures.

**Key words:** Wave run-up; Wave force; Numerical wave tank; naoe-FOAM-SJTU solver.