

弹性浮冰影响下波浪对浮式平台作用的 OpenFOAM 数值模拟¹

张崇伟^{2,*}, 庄乾泽², HUANG Luofeng³, 宁德志²

² 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024

³ Dept. of Mechanical Engineering, University College London, London WC1E 7JE

摘要: 本文基于开源软件 OpenFOAM 建立二维数值冰浪水池, 采用迭代算法实现了弹性浮冰与波浪的双向耦合作用。在数值冰浪水池中设置浮式平台简化模型, 研究了弹性浮冰的分布方式与刚度系数对平台所受波浪水动力的影响。着重对比了 7 种工况下, 平台所受水平和垂直方向波浪动压力的特性。研究发现, 在本文所考虑参数范围内, 迎浪侧浮冰的存在会显著减小平台所受波浪力, 并导致波浪力非主频成分比重明显增大, 使波浪力历时曲线呈现包络现象, 但浮冰弹性对平台受力的影响较小。

关键词: 浮式平台, OpenFOAM, 流固耦合, 水弹性, 海冰

1 引言

北极海域蕴藏着大量尚未开发的油气资源^[1]。近几十年来, 随着全球变暖和极地冰川融化, 在北极海域进行油气开采正在成为可能。与开敞水域不同, 极区海况中浮式平台的设计必须充分考虑浮冰环境的影响。前期研究表明弹性浮冰的存在可对波浪作用特性产生复杂的影响^[2-5], 这可能导致传统平台设计经验无法直接应用于极区浮式平台的设计。因此, 明确弹性浮冰影响下波浪对浮式平台的作用特性, 是开展极区油气平台设计的重要基础工作。

浮冰环境中波浪与结构物的相互作用问题是当前国内外的研究热点。在理论解析方面, Li 等^[6]基于线性势流理论和弹性板模型, 求解了冰间湖中波浪与三维结构物的相互作用问题; Ren 等^[7]关注了两块半无限长弹性冰板之间的水域, 基于二维线性势流理论研究了浮体在冰间水域的波激运动。在物理模型实验方面, Zong 等^[8]采用聚丙烯材料作为浮冰模型, 开展船舶拖曳实验, 研究了浮冰密集度、形状与尺寸等参数对船舶阻力与船速的影响。在数值模拟方面, Lemström 等^[9]采用 FEM-DEM 方法研究了浅水环境中结构物与碎冰堆的相互作用; Huang 等^[10]利用 Star-CCM+ 模拟了船舶在北极航道中的航行, 分析了船舶阻力与航道宽度、冰板厚度等参数的关系。

本文研究弹性浮冰影响下波浪对浮式平台的水动力作用, 基于开源软件 OpenFOAM 建立二维数值冰浪水池, 采用迭代算法实现弹性浮冰与波浪的双向耦合作用, 进一步在数值冰浪水池中设置浮式平台简化模型, 分析弹性浮冰的分布方式与浮冰刚度对浮式平台所受水动力的影响特点。

2 数学模型

本文所采用的模型将计算域分为流体域和固体域两部分。流体域采用不可压缩层流模型, 控制方程为 Navier-Stokes 方程组

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

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \nu \rho \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

其中, \mathbf{v} 是流体质点速度, P 是流体压力, ρ 是流体密度, ν 是流体运动粘性系数。固体域将浮式平台和浮冰分别作为刚体和弹性体处理。浮冰弹性变形由线性动量守恒定律描述, 数学模型表示为拉格朗日形式^[11]:

¹ 资助项目: 国家自然科学基金 (51709038 和 51739010)、中国博士后科学基金(2018M630289 和 2019T120209)、中央高校基本科研业务费专项资金 (DUT19RC(4)027)

第一/通讯作者简介: 张崇伟* (1987-), 男, 博士, 副教授, 主要从事海洋工程水动力方面的研究。E-mail: chongweizhang@dlut.edu.cn

$$\rho_0 \int_{V_0} \frac{\partial}{\partial t} (\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}) dV - \oint_{S_0} \mathbf{n} \cdot (2\mu + \lambda) \nabla \mathbf{u} dS = \oint_{S_0} \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} dS + \rho_0 \int_{V_0} \mathbf{g} dV \quad (3)$$

其中，下标 0 表示固体未发生变形时的物理量， \mathbf{u} 是位移矢量， μ 和 λ 是拉梅常数， \mathbf{q} 是由非线性项与位移分量项的耦合项组成的张量。

定义网格内液相所占体积分数标量场（纯气相网格内 $\alpha=0$ ，纯液相网格内 $\alpha=1$ ，气液交界面处 $0 < \alpha < 1$ ），采用 VOF 方法动态追踪气、液交界面。利用开源波浪工具箱 waves2Foam，通过设置速度入口实现造波，并在水池两端设置松弛区以避免波浪在水池两端发生二次反射。在松弛区内借助空间加权因子 ω_R ，来调节预设速度与计算速度之间的比重，如计算域速度场 ϕ 可表示为

$$\phi = (1 - \omega_R) \phi_{target} + \omega_R \phi_{computed} \quad (4)$$

采用 waveFsiFoam 求解器进行双向流固耦合。在每一个时间步内，依据有限体积法构造流体域和固体域的代数方程并分别求解，然后在流固交界面上针对位移进行迭代运算，直至误差小于设定值，由此实现两计算域内物理信息的双向传递。该求解流程如图 1 所示。

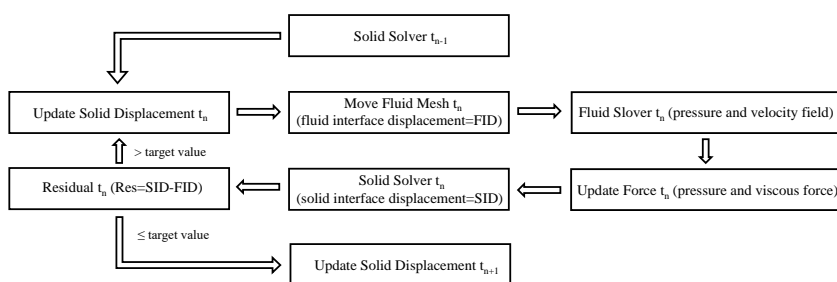


图 1 双向流固耦合运算流程

3 数值模型

建立直角坐标系 Oxy ， O 位于水池左下角， x 轴水平向右， y 轴垂直向上，建立二维数值冰浪水池。水池长 14m，高 0.7m，水深 $h=0.45\text{m}$ ，造波区长 $Z_l=3\text{m}$ ，消波区长 $Z_r=3\text{m}$ 。将浮式平台简化为箱型结构，平台长为 D_h ，高为 D_v ，本文设置 $D_h=D_v=0.4\text{m}$ 。浮冰长度为 d ，厚度为 m ，浮冰与平台间距为 L ，并分别用下标 l 和 r 区分平台迎浪侧和背浪侧的浮冰参数。边界条件如下设置：水池左边界为速度入口，顶部为大气边界，底部为固壁边界；将浮冰背浪侧设置为固壁边界，以避免浮冰发生水平漂移运动，其余浮冰边界为自由边界。

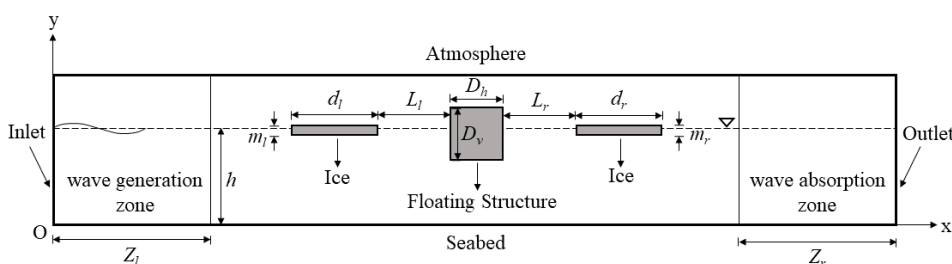


图 2 数值冰浪水池计算域示意图

网格划分方式如图 3 和图 4 所示，其中，图 3 和图 4 分别显示了浮冰和平台附近的网格划分形式。为保证计算效率和收敛性，将数值冰浪水池内所有网格的水平长度设为 0.01m；在垂直方向上，流体网格在液面附件最密（网格高 0.002m），固体域浮冰网格在高度范围均匀分布（网格高 0.008m）。网格收敛性验证参见 Huang 等^[12]。

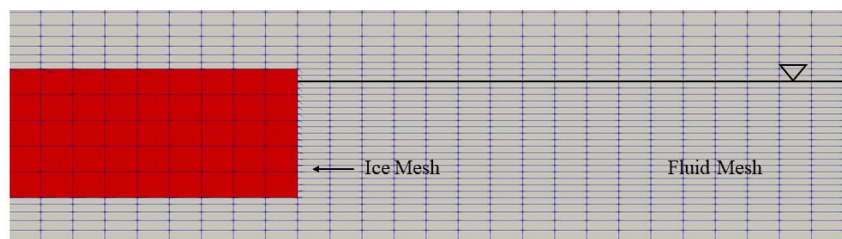


图 3 浮冰附近网格布置示意图

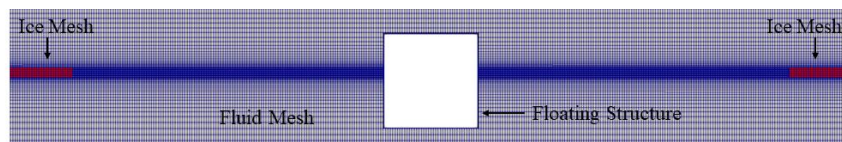


图 4 平台附近网格布置示意图

4 结果分析

本文围绕浮冰分布方式与浮冰刚度对平台所受水动力的影响开展研究，如表 1 所示设置七个工况。表中， E 为浮冰的杨氏模量， μ 为浮冰的泊松比，浮冰刚度参数依据实验数据^[13-15]确定。本文所考虑的各个工况中，入射波周期 T 均为 1s，入射波高 H 均为 0.03m。平台位于水池中央，工况 1~4 考虑两块浮冰关于平台对称分布的情况；工况 5 和 6 则分别考虑只在平台迎浪和背浪侧存在一块浮冰的情况；工况 7 考虑只有平台的情况。本节主要分析不同工况下，平台所受的水平波浪力 F_x 和 F_y 。

表 1 工况参数表

Case	L_l/s	L_r/m	m_l/m	m_r/m	E/GPa	d_l/m	d_r/m	μ
1	1.3	1.3	0.04	0.04	0.87	1	1	0.4
2	1.3	1.3	0.04	0.04	1.6	1	1	0.4
3	1.3	1.3	0.04	0.04	4.0	1	1	0.4
4	1.3	1.3	0.04	0.04	∞	1	1	0.4
5	1.3	/	0.04	/	1.6	1	/	0.4
6	/	1.3	/	0.04	1.6	/	1	0.4
7	/	/	/	/	/	/	/	/

4.1 浮冰分布方式对平台水动力的影响

图 5 给出了不同浮冰分布方式下平台所受水平波浪力与垂向动压力的历时曲线。图中 ρ 为水的密度， g 为重力加速度， A 为入射波波幅， a 为 1/2 平台长度。该波况条件下，平台所受的水平波浪力要大于垂向动压力。进一步对比工况 2、5、6 和 7 的水动力曲线可以发现：没有浮冰影响时（工况 7），浮式平台所受的水平波浪力与垂向动压力可以很快趋于稳态；只存在背浪侧浮冰时（工况 6），浮冰对平台所受垂向力的影响很小，但可少量减弱平台所受水平波浪力；平台迎浪侧存在浮冰时（工况 5 和 2），平台在水平和垂直方向上所受的波浪动压力大幅减小，同时浮冰对平台所受水动力历时曲线的趋势也产生显著影响，历时曲线呈现包络现象。

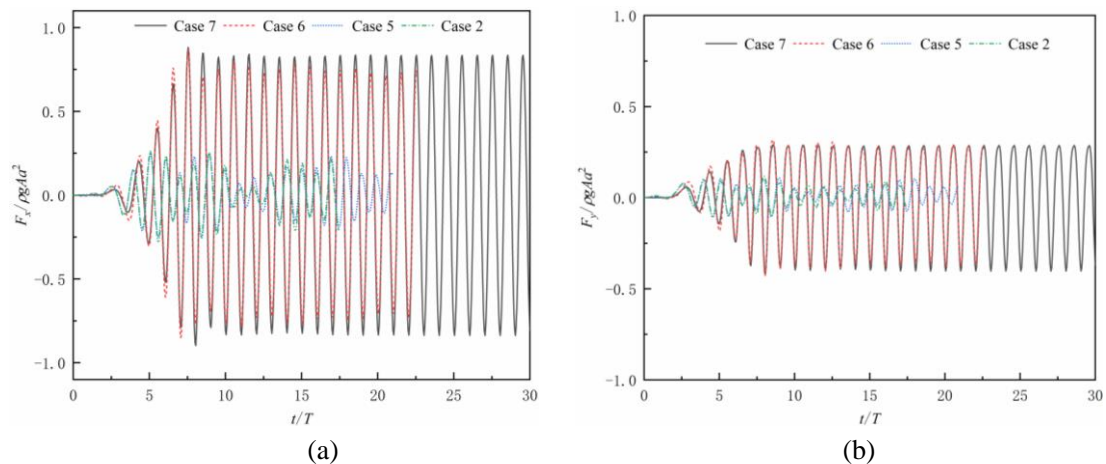


图 5 不同浮冰分布方式下浮式平台所受(a)水平合力与(b)垂向动压力的历时曲线

图 6 进一步对图 5 所示的水动力历时曲线进行傅里叶分析。由图可见，当浮冰的分布方式改变时，平台在水平和垂直方向上所受波浪动压力的频率成分基本一致，主频成分对应入射波频率；浮冰影响较大时，垂向动压力的倍频成分减弱，这与波浪力幅值的大幅减少有关；迎浪侧存在浮冰时，频谱图中除主频成分以外，0.8Hz 和 1.15Hz 频率成分所占的比重明显增大，该成分的存在导致了图 5 历时曲线的包络现象。

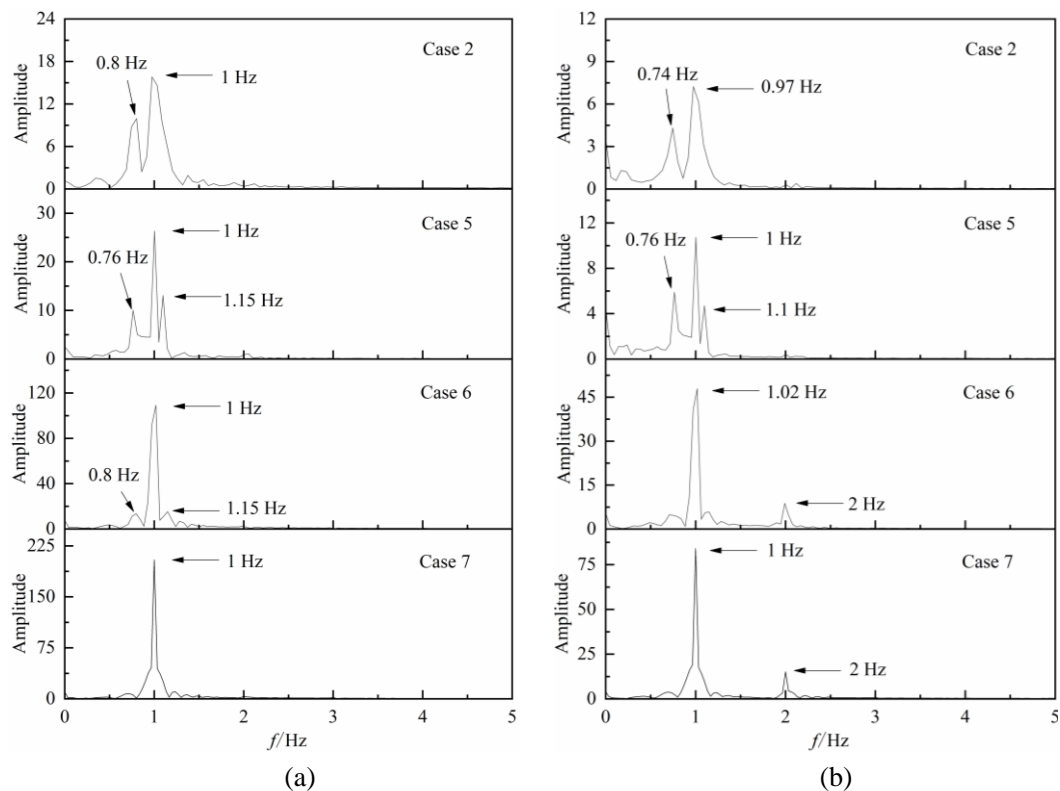


图 6 不同浮冰分布方式下浮式平台所受(a)水平力与(b)垂向动压力历时曲线的频域分析图

4.2 浮冰刚度对平台水动力的影响

图 7 给出了四种浮冰刚度参数下平台所受波浪动压力的历时曲线，图 8 为对应历时曲线的频谱。由图可见，对于本文所考虑的浮冰刚度范围，浮冰刚度特性对平台所受水平和垂向水动力的影响有限，总体上没有出现显著差异；特别注意到，即便将浮冰作为刚性考虑时，平台所受水动力的历时曲线依然有波群的包络特征，这意味着图 6 所观察到的非波频成分，并非由冰板的水弹性引起，可能是由浮冰与平台间近似封闭水域内的波浪振荡导致。

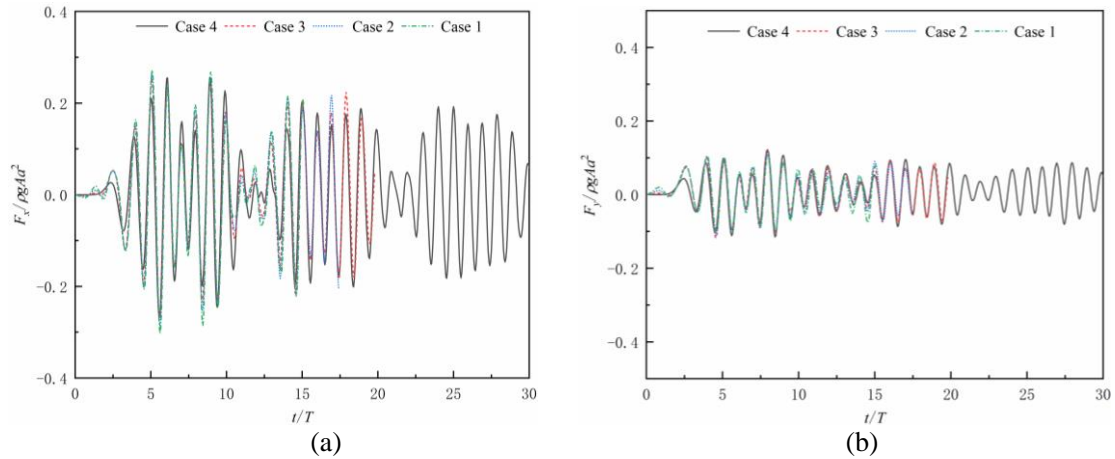


图 7 不同浮冰刚度下浮式平台所受(a)水平波浪力与(b)垂向动压力的历时曲线

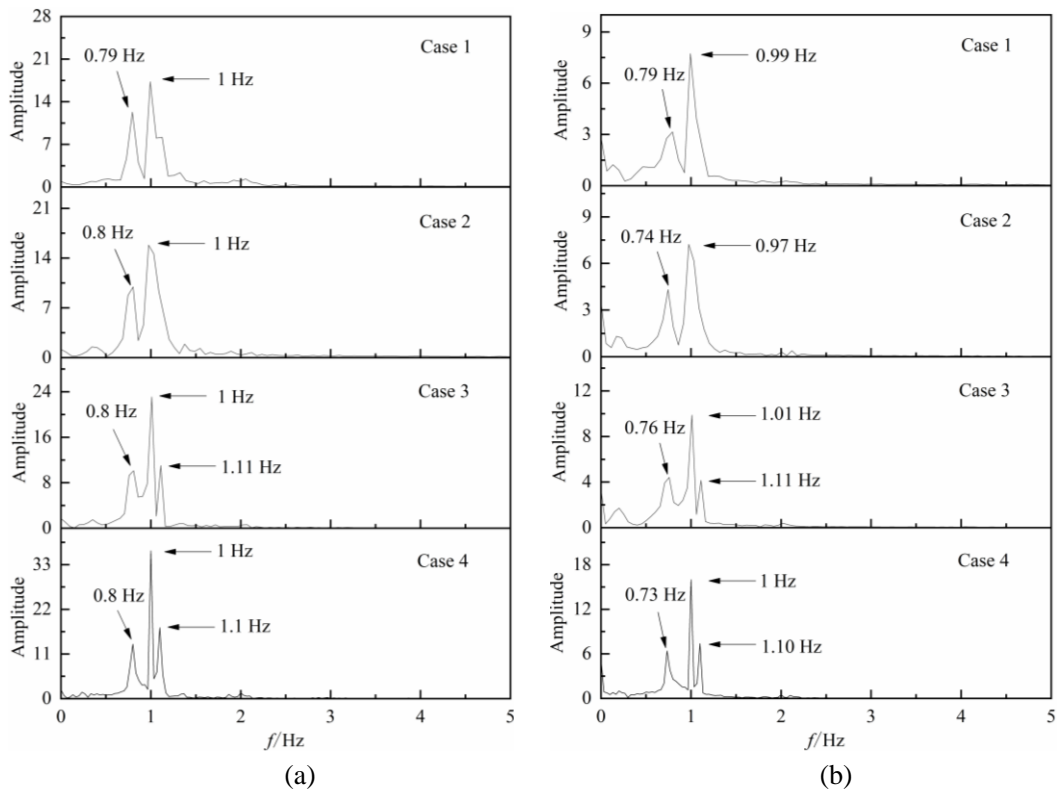


图 8 不同浮冰刚度下浮式平台所受(a)水平波浪力与(b)垂向动压力历时曲线的频域分析图

5 结论

本文基于开源软件 OpenFOAM 建立了二维数值冰浪水池，利用 waves2Foam 工具箱实现造波与消波功能，采用 VOF 方法动态追踪气液交界面，并在水池两端设置松弛区以避免波浪在水池两端发生二次反射，采用迭代算法实现弹性浮冰与波浪的双向耦合作用。在数值冰浪水池中设置了浮式平台简化模型，研究了弹性浮冰的分布方式与浮冰刚度对浮式平台所受波浪水动力的影响。本文着重对比了 7 种工况下，平台所受水平和垂直方向波浪动压力的特性。研究发现，在本文考虑的参数范围内，迎浪侧浮冰的存在会显著减小平台所受波浪力，并导致波浪力非主频成分比重的明显增大，使波浪力历时曲线呈现包络现象，但浮冰弹性对平台受力的影响较小。

参考文献

- [1] 张大勇, 于东玮, 王国军, 等. 半潜式海洋平台抗冰性能分析[J]. 船舶力学, 2020, 24(02): 208–220.
- [2] Bennetts L G, Biggs N R T, Porter D. A multi-mode approximation to wave scattering by ice sheets of varying thickness[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 579: 413–443.
- [3] Wang C, Song M, Guo C, et al. Experimental Study of Sea Ice Motion in Waves[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2020, 34(2): 04020010.
- [4] Nelli F, Bennetts L G, Skene D M, et al. Reflection and transmission of regular water waves by a thin, floating plate[J]. Wave Motion, 2017, 70: 209–221.
- [5] Bennetts L G, Peter M A, Squire V A, et al. A three-dimensional model of wave attenuation in the marginal ice zone[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(C12): C12043.
- [6] Li Z F, Shi Y Y, Wu G X. A hybrid method for linearized wave radiation and diffraction problem by a three dimensional floating structure in a polynya[J]. Journal of Computational Physics, 2020, 412: 109445.
- [7] Ren K, Wu G X, Thomas G A. Wave excited motion of a body floating on water confined between two semi-infinite ice sheets[J]. Physics of Fluids, 2016, 28(12): 127101.
- [8] Zong Z, Yang B Y, Sun Z, et al. Experimental study of ship resistance in artificial ice floes[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 176: 103102.
- [9] Lemström I, Polojärvi A, Tuhkuri J. Numerical experiments on ice-structure interaction in shallow water[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 176: 103088.
- [10] Huang L, Li M, Romu T, et al. Simulation of a ship operating in an open-water ice channel[J]. Ships and Offshore Structures, 2020: 1–10.
- [11] Tuković Ž, Karač A, Cardiff P, et al. OpenFOAM Finite Volume Solver for Fluid-Solid Interaction[J]. Transactions of FAMENA, 2018, 42(3): 1–31.
- [12] Huang L, Ren K, Li M, et al. Fluid-structure interaction of a large ice sheet in waves[J]. Ocean Engineering, 2019, 182: 102–111.
- [13] Sree D K K, Law A W-K, Shen H H. An experimental study of gravity waves through segmented floating viscoelastic covers[J]. Applied Ocean Research, 2020, 101: 102233.
- [14] Dolatshah A, Nelli F, Bennetts L G, et al. Hydroelastic interactions between water waves and floating freshwater ice[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(9): 091702.
- [15] Skene D M, Bennetts L G, Meylan M H, et al. Modelling water wave overwash of a thin floating plate[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 777: R3.

NUMERICAL STUDY OF WAVE INTERACTION WITH FLOATING PLATFORM INFLUENCED BY ELASTIC ICE FLOES USING OPENFOAM

ZHANG Chongwei ^{2,*}, ZHUANG Qianze ², HUANG Luofeng ³, NING Dezhi ²

² State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

³ Dept. of Mechanical Engineering, University College London, London WC1E 7JE;

* Email: chongweizhang@dlut.edu.cn

Abstract: In this paper, a two-dimensional numerical ice wave tank is established based on the open source software OpenFOAM. An iterative algorithm is used to achieve the two-way coupling between elastic ice floes and water waves. A simplified model of floating platform is set up in the numerical ice wave tank. Effects of the distribution and stiffness coefficient of elastic ice floes on the wave hydrodynamic force acting the platform are studied. Characteristics of horizontal and vertical dynamic wave loads on the platform are compared under seven working conditions. It is found that within the considered range of parameters, the presence of ice floes on head-wave side of the platform can significantly reduce the wave loads acting on the structure. Also, ice floes can cause the rise-up of non-dominant frequency components of the wave force, leading to an envelope of wave force history. However, the elasticity of ice floes shows little effect on wave loads acting on the platform.

Key words: floating platform, OpenFOAM, FSI, hydroelasticity, sea ice