

DOI:10.3969/j.issn.1673-4807.2017.05.008

波流夹角对浅水导管架平台载荷影响的计算分析

夏 可^{1,2}, 万德成^{1,2*}

(1. 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, 上海 200240)

(2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要: 应用船舶与海洋工程 CFD 求解器—naoe-FOAM-SJTU, 对一浅海风机基础的导管架平台在复杂波流环境中所受的波流载荷进行了仿真分析. 计算了极限海况下该导管架平台的总体受力, 并对一些结构上较为危险点的抨击压力进行了监测, 将仿真结果与课题组在上海交通大学海洋工程国家重点实验室开展的模型试验结果进行对比验证. 改变流场中波浪与海流的传播方向夹角, 分析不同的波流夹角情况对导管架平台的整体载荷、危险点的抨击压力以及波流场演化的影响. 计算过程中可以给出波浪爬高、流场形态以及平台周边的涡脱落现象等详细信息, 从而为平台局部强度、桩基冲蚀等问题提供指导.

关键词: 浅水; 导管架平台; 波流夹角; naoe-FOAM-SJTU 求解器

中图分类号: O35

文献标志码: A

文章编号: 1673-4807(2017)05-0597-08

Effect of the angle of wave and current on hydrodynamic loads of jacket platforms in shallow water

XIA Ke^{1,2}, WAN Decheng^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: In this paper, numerical simulation of the jacket platform is conducted to research the loads that induced by waves and currents in shallow water. The problems are solved by the CFD solver, naoe-FOAM-SJTU, which is developed based on the open source tool libraries of OpenFOAM. Firstly, the forces of the platform and the slamming pressure of some dangerous joint of the jacket platform are calculated, and the results were verified by comparing them with the experimental results that conducted by the State Key Laboratory of Ocean Engineering of Shanghai Jiao Tong University. Subsequently, different angles that between the directions of wave and current were considered to investigate the influence of the flow field and loads on the platform. Wave run up, parameter of flow field and distribution of vortex can be obtained in the research and all the results can be instructive to practical engineering problems.

Key words: shallow water, jacket platform, angle of current and wave, naoe-FOAM-SJTU solver

随着国家经济的发展, 能源问题日益凸显, 因此对于风能等可再生能源发展的需求也随之增长.

收稿日期: 2017-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379125, 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); 上海市船舶工程重点实验室基金(K2015-11); 工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)

作者简介: 夏可(1993-), 男, 硕士研究生

* 通信作者: 万德成(1967-), 男, 教授, 研究方向为船舶水动力学. E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

引文格式: 夏可, 万德成. 波流夹角对浅水导管架平台载荷影响的计算分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(5): 597-604.
DOI:10.3969/j.issn.1673-4807.2017.05.008.

很多国家建立了较为完善的风电场来进行风电的开发,我国除了逐步建立陆上的完备风电场之外,也开始进行海上风电场的建设,以避免用地矛盾并追求更多更稳定的风能^[1]. 进行海上风电的开发与陆上风电开发最大的区别就在于海上风机需要平台作为其基础,根据水深情况,可分别采用浮式与固定式平台,文中主要针对东海某近海风机的导管架平台基础在波流联合作用下的载荷情况进行研究. 导管架平台在整个风力发电系统中起着极为重要的作用,一方面可以为上部风机提供稳定的基础,另一方面可以将整个风力发电机系统所受的载荷传递到桩基周围的海底环境中^[2].

文中研究的浅海波浪环境较为复杂,除了有较为明显的潮流之外,由于浅水海底边界对于波浪的影响,波浪在向浅水传播的过程中会出现一系列的演化,波浪的波高会变大,且波峰升高,波谷也升高,呈现明显的尖峰坦谷的坦谷波形态^[3]. 对于这种非线性的波浪,其对于结构物的冲击力较之线性波更强,波浪更容易发生翻卷和破碎^[4]. 此外,在浅水情况下,由于底部边界条件对流体的阻塞作用,会形成明显的波生流现象,因此在浅海结构物处的流场更为剧烈复杂,其研究和模拟的难度很大,传统的势流方法难以较好地实现该强非线性系统的仿真. 目前关于平台在波流联合作用下性能的研究很多,文献[5]分析波流联合作用下张力腿涡激非线性振动情况,建立了数学模型,既考虑了平方流体阻尼项,也计及中心激振情况;文献[6]进行波流联合作用下导管架平台装机冲刷的试验研究,给出了导管架平台桩基冲刷在粘土条件下最大深度非线性回归公式;文献[7]运用 CFD 的方法对一近海重力式平台在不同波高、周期波浪作用下的载荷性能进行分析,并结合有限元软件进行了波浪中底部桩基冲刷情况的研究. 目前这些研究大多聚焦于深水海况,对于浅水情况下平台载荷问题研究较少,且大部分研究基于势流理论,对于浅水海况中强非线性的波流问题、结构物表面波浪破碎造成的冲击力等问题无法精确描述,因此文中选择了一种更直接的考虑各种非线性成分影响的 CFD 方法来开展研究.

由于在实际的近海海况中,波浪与潮流通常传播方向有一个夹角,而不同的波流夹角会形成不同的波流场,从而对作用在结构物上载荷产生不同的影响. 因此基于开源平台 OpenFOAM 开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器——naoe-FOAM-SJTU^[8]对某近海风机导管架基础在波流联合作用下的载

荷情况进行计算,主要针对不同的波流夹角进行讨论,分析波流夹角对于导管架平台受力、抨击压力、流场特征等的影响,从而为工程提供指导意见.

1 数值计算方法

1.1 控制方程

考虑不可压缩粘性流体假定,则液体运动的控制方程为:

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

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho (\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) \quad (2)$$

式中: \mathbf{U} 和 \mathbf{U}_g 分别为流场速度和网格节点速度; $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ 为流场动压力,等于总压力减去静水压力; \mathbf{g} 、 ρ 和 μ 分别为重力加速度、流体的密度和动力粘性系数.

计算中,采用有限体积法对控制方程进行离散;利用 PISO 算法对速度压力方程进行解耦求解;采用 $k-\omega$ SST 湍流模型对分离涡进行仿真,采用壁面函数对近壁面进行计算;对自由面的捕捉,采用流体体积法;同时,为了求解物体运动,计算中使用动网格技术.

1.2 造波方法

文中基于 OpenFOAM 开发的开源代码包 wave2foam^[9]进行造波的求解. 由于水深影响,波浪在传播到浅水过程中已经发生一系列演化,因此波浪已呈现明显的非线性,若按照传统的线性波理论进行造波,波浪难以正常传播,可能出现翻卷破碎等情况,因此根据既定海况的色散关系,此处造波运用斯托克斯五阶波理论,波面高程如下:

$$\eta = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^5 \lambda_n \cos[n(kx - \omega t)]$$

$$\lambda_1 = \lambda$$

$$\lambda_2 = \lambda^2 B_{22} + \lambda^4 B_{24}$$

$$\lambda_3 = \lambda^3 B_{33} + \lambda^5 B_{35}$$

$$\lambda_4 = \lambda^4 B_{44}$$

$$\lambda_5 = \lambda^5 B_{55} \quad (3)$$

式中: ω 、 d 、 k 分别为圆频率、水深和波数,其他系数可参考文献[10].

造波方式为通过改变速度入口边界条件,从而产生波浪. 同时在该求解器中特殊地给出了松弛区的概念. 松弛区的控制方程如式(4),式中 α_R 为松弛因子,其值随距离参数 χ_R 而变化,具体的变化趋势如图1. 松弛因子 α_R 的变化直接体现

在式(5)中,其变化将直接影响 ϕ 的值, ϕ 在求解器中主要为自由面速度 u 或者流体相参数 γ . 从图 1 可以看出,波浪在松弛区的控制下,波浪强度会从零增大,并在入口松弛区内趋于稳定,而波浪传播到出口松弛区后,波浪强度会从小变大并趋于零. 实际上该松弛区实际就成为了数值水池的造波区和消波区.

$$\alpha_R(\chi_R) = 1 - \frac{\exp(\chi_R^{3.5}) - 1}{\exp(1) - 1} \quad \text{for } \chi_R \in [0, 1] \quad (4)$$

$$\phi = \alpha_R \phi_{\text{computed}} + (1 - \alpha_R) \phi_{\text{target}} \quad (5)$$

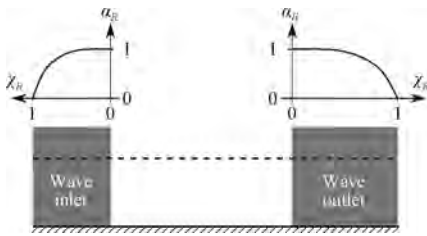


图 1 变量 α_R 在入口和出口松弛区中分布情况
Fig. 1 Distribution of variable α_R in both inlet and outlet boundary area

文中主要分析波流夹角,其方法是将 x 负方向及 y 负方向边界设置为入口边界条件,将 x 正方向及 y 正方向边界设置为出口边界条件,从而实现不同方向波流生成. 浅水波浪环境较为复杂,波浪受海底条件影响,会呈现坦谷波的状态,而非正常的对称线性波,因此,需要对造波模块以及数值造波的准确性进行验证. 如图 2,为缩尺比 1 : 30,模型尺度水深 0. 713 m,波高 0. 259 m 情况下,空场平台位置处数值造波与实验造波波形对比,从图中可以看到二者波形较为吻合.

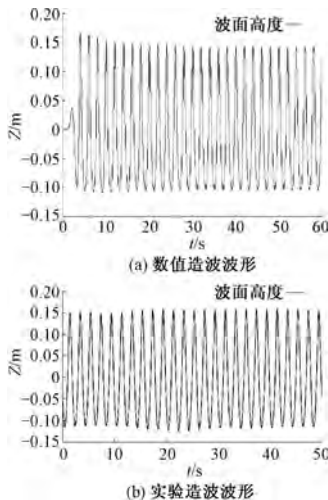


图 2 数值造波波形与实验造波波形对比
Fig. 2 Comparison of free surface configurations between experimental results and numerical results

2 计算及实验模型设计

2.1 计算模型及实验模型

导管架平台的数值模型及其试验模型如图 3,实际平台高 33 m,顶部平台长宽均为 40 m. 计算模型以及实验模型均为模型尺度,缩尺比为 1 : 30,计算中所有参数均按照该缩尺比进行设置.

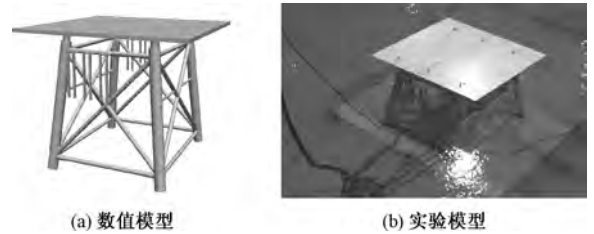


图 3 导管架平台计算模型及实验模型
Fig. 3 Calculated model and experimental model

2.2 计算网格及计算域设置

仿真所用的网格利用 OpenFOAM 的网格求解器 snappyHexMesh^[11]通过背景网格加密并提取结构物表面网格模型从而生成,网格量 200 万左右,计算步长为 0. 001 s,平台网格以及局部网格如图 4. 从图中可以看到,网格在物面处较为精细,可以清楚地捕捉平台上各种尺度的构建. 此外,网格也保证了一个波高范围内有 20 个网格. 由于计算中有流动存在,雷诺数较大,因此需采用壁面函数来对边界层进行处理,计算中采用 $k - \omega$ SST 湍流模型,雷诺数为 25 000 左右,边界层第一层网格厚度约为 0. 002 9 m, $y +$ 约为 50.

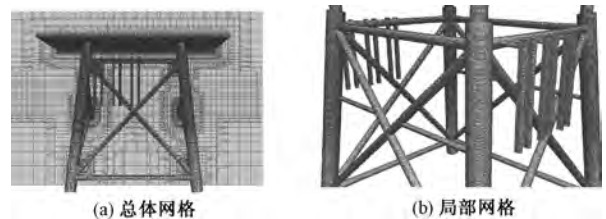


图 4 导管架平台总体网格以及局部网格
Fig. 4 Grid of the jacket platform in the research

图 5 为计算域示意图,平台中心布置在 x 与 y 方向零点位置,此计算域网格保证了平台前部有一个波长的长度,后面有两到三个波长的长度,从而保证了波浪可以充分演化,计算域 x 与 y 负方向为入口边界条件,正方向为出口边界条件. 此外还给出了计算域的坐标系设置以及波流传播方向示意图,图中可以看到,波浪与流的传播方向有一夹角,文中通过固定波浪方向改变潮流方向来实现波流夹角,该设置与模型试验完全一致.

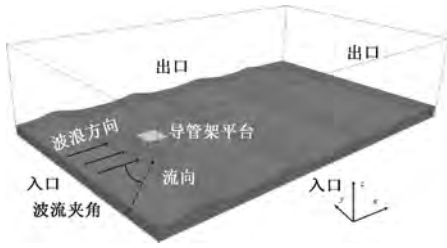


图5 计算域示意图及计算设置

Fig.5 Principle dimensions and arrangement of the domain

2.3 主要分析工况

文中涉及的计算工况如表1,计算在极端高水位情况下,遭遇较大波高即8.7 m波高以及1.73 m/s流速的海流时导管架平台所受的载荷,并与实验结果相对比进行验证.其后,选取波高较小的波浪,并进行不同波流夹角的计算,从而考察不同波流夹角对于平台所受载荷的影响.表格数据中,括号内均为模型尺度参数,而非括号内则是对应的实尺度的工况参数.

表1 导管架平台计算工况(括号内为模型尺度参数)

Table 1 Analyzed working condition in both model test and simulation

波流夹角	水深/m	波高/m	周期/s	流速/ ($m \cdot s^{-1}$)
波流同向		8.7 (0.29)	11.5 (2.1)	1.73 (0.316)
波流同向				
波流垂直	22.5			
波流夹角 22.5°	(0.75)	5.63 (0.187)	9.8 (1.79)	1.73 (0.316)
波流夹角 45°				

2.4 主要计算参数及测压点布置

在针对导管架平台的分析计算中,主要分析平台的波浪传播方向的受力 F_x ,同时对于导管架结构上的危险点位置的表面压力进行提取.平台表面的压力点布置如图6,对导管架导管接头处等位置设置了15组压力点,压力点的选取与模型试验完全一致.

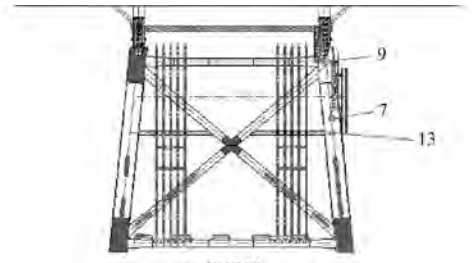
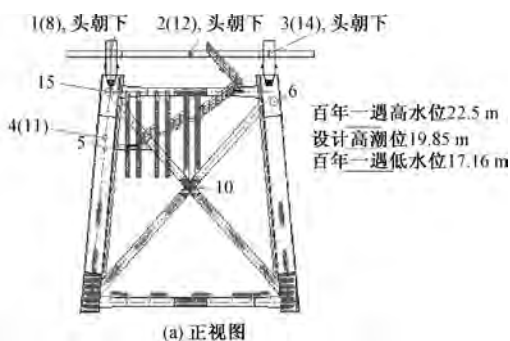


图6 导管架平台测压点布置正视图与侧视图
Fig.6 Arrangement of pressure detecting points

2.5 主要边界条件设置

数值计算的边界条件是数值计算过程中最重要的影响因素,直接影响计算结果的正确性和可靠性,文中计算模拟设置的边界条件如下:

(1) 在入口边界处,因为涉及到造波,所以速度条件采用波浪入口,压力条件则采用则是 Neumann 边界条件,压力梯度为零.由于有波流夹角情况,因此计算中 x 负方向及 y 负方向边界均为入口边界.

(2) 在出口边界处速度条件采用第三类混合边界条件,压力条件设定的 Dirichlet 边界条件,由于文中有波流夹角情况,因此计算中 x 正方向及 y 正方向边界均为出口边界.

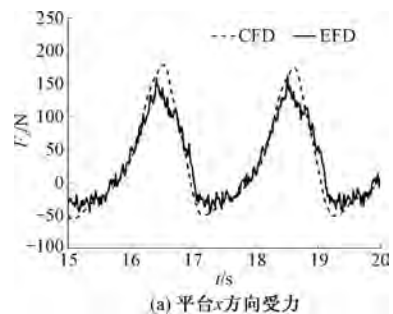
(3) 在计算域的上下边界处,上边界压力与速度条件采用第一类边界条件,下边界采用固壁面边界条件,可以模拟海底地形对波流场的干扰.

(4) 模型物面处,采用固壁面的边界条件.

3 结果分析

3.1 波流同向下平台数值计算结果验证

对于该导管架平台,选择极限高潮位作为主要分析工况,水深22.5 m,选取分析的实际海况波高8.7 m,波浪周期11.5 s,流速为1.73 m/s.利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对于模型尺度实验进行仿真,并与模型试验结果进行对比,如图7.



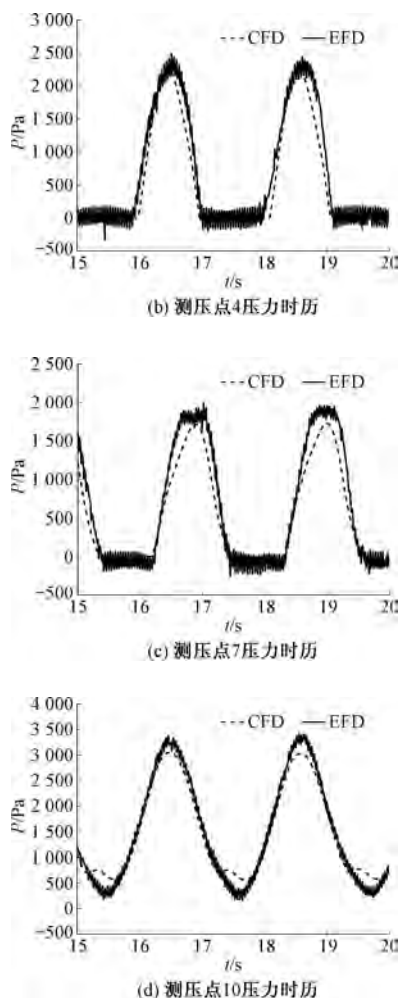


图 7 导管架平台 x 方向受力与测压点受力计算与实验对比
 Fig.7 Comparison of results between simulation and model test

波流同向部分计算结果如图 7,虚线为 CFD 计算结果,实线为实验的记录结果,从上述的平台总体受力以及局部测压点所受压力可见,计算结果与实验结果吻合较好,关于载荷最大值以及载荷周期性变化的捕捉与试验相比较为精确,从而验证计算结果的可靠性以及计算程序的准确性.此外,CFD 计算可以清晰地记录一些试验中难以记录的细节,如波浪爬高、涡流场演化以及流场变化等情况,对实际工程的强度、桩基冲刷等问题提供参考.

图 8 为平台计算以及实验过程中 3 个典型时刻的波面对比图,3 个典型时刻分别为波浪波峰传播到平台前缘位置(图 8(a)),波峰传播到平台中部位置(图 8(b))以及波峰要离开平台的位置(图 8(c)).从图中可以看到,计算结果与实验结果吻合较好,且均可以观察到过程中的抨击及波浪爬高等现象.

通过计算数据以及后处理结果的对比可以发现,文中应用的粘流求解器 naoe-FOAM-SJTU 对浅水负责波流场的仿真结果较好,与实验结果较为一致,可以应用于进一步的分析计算.

3.2 波流夹角对载荷特性影响分析

在实际的工作海况中,由于近海的复杂海况,通常情况下会出现不同的波向与流向,从而形成不同的波流夹角,而不同的波流夹角也会使得二者之间出现不同的耦合、叠加,形成不同的波流场,文中针对 4 种不同的波流夹角(0° 、 22.5° 、 45° 以及 90°),研究在不同波流夹角情况下,平台的总体载

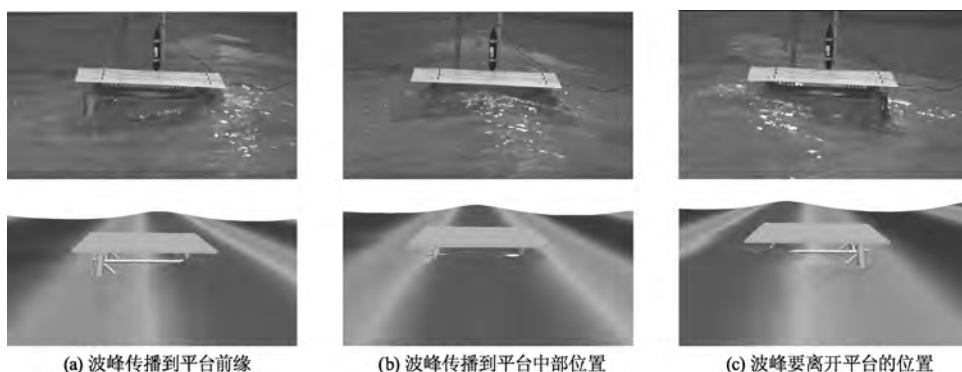


图 8 3 个典型时刻计算结果与实验结果波面对比
 Fig.8 Comparison of waveform of free surface between simulation and model in typical moments

荷情况以及流场情况.关于波浪和流的实际方向,计算中与实验中设置一致,即固定波浪方向不动,而改变流的方向,从而形成波流夹角.此外关于波流夹角的考察,选取了较小波高的波浪进行分析,减少抨击爬高等的影响,从而可以明显分析不同方向的流动对于波浪演化的影响.

图 9 为 4 种不同波流夹角情况下平台 x 方向受力以及 xy 方向受力合力的对比图.由于 x 方向受力为平台的主要受力,同时也直接关系到平台在环境载荷作用下关于桩基的力矩,因此,在实际的工程中对该方向受力比较关注.从图 9(a)中可以清晰地看到,随着波流夹角逐渐变大, x 方向的受

力会略微增大再明显减小. 当波流夹角 22.5° 时, F_x 最大, 而当波流垂向的时候, F_x 最小. 实际上波流不同夹角对应的 F_x 的振荡幅值基本一致, 这是由于力的振荡主要由波浪引起, 流力更趋向于一个稳定的值, 因为波流夹角为改流向不改浪向, 从而导致了这一现象. 此外, 为了更全面地研究波流夹角对平台水平方向受力的影响, 文中将 x 方向与 y 方向的受力求取了合力, 如图 9(b), 可以明显看出, 随着波流夹角越大, 合力最大值先稍微增大再逐渐减小, 在夹角为 22.5° 时得到最大值. 合力最大值也恰恰是工程中最关注的一个参数. 而在合力的第二个峰值点上, 合力峰值则随着波流夹角的增大而增大, 这个现象主要与受力方向的定义有关.

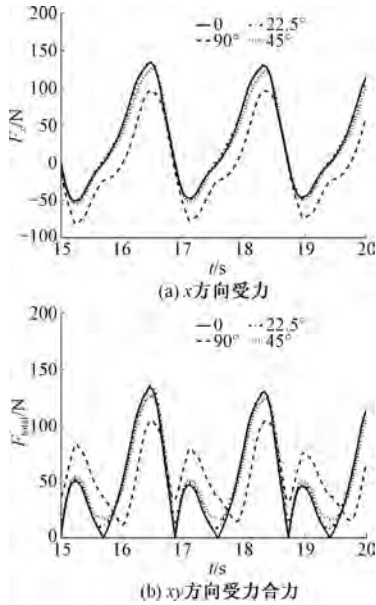


图 9 不同波流夹角下平台受力对比
Fig. 9 Wave force of platform with different angle of wave and current

图 10、11 为测压点 4 及测压点 7 在不同的波流夹角中的检测压强的对比图, 从图中发现, 不同的波流夹角对于一些导管节点冲击压力明显不同, 而具体监测点压力随波流夹角的变化则需更深入地针对其所处位置进行分析.

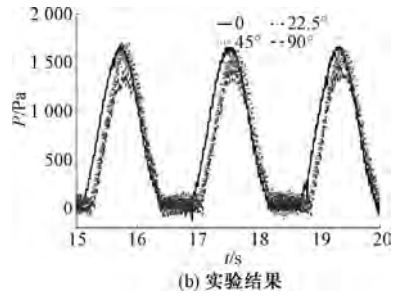
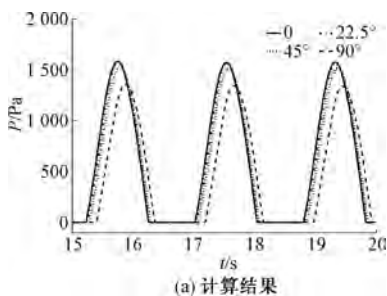


图 10 不同波流夹角下平台测压点 4 压力对比
Fig. 10 Pressure of point 4 with different angle of wave and current

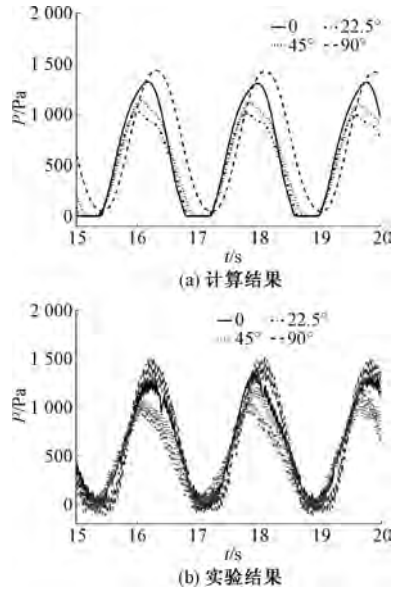


图 11 不同波流夹角下平台测压点 7 压力对比
Fig. 11 Pressure of point 7 with different angle of wave and current

在不同的波流夹角下, 计算结果与实验结果从整体趋势以及峰值点上体现了较为良好的一致性. 在测压点 4 处, 由于其位置处在迎浪面, 因此其最大值随着波流夹角的增大而减小, 并且随着波流夹角的增大, 流在 x 方向的分量越来越小, 导致正对着 x 负方向的压力点 4 最大值的减小. 观察测压点 7 可以发现, 由于其位置处在非迎浪面, 而是在侧面, 因此当波流夹角为 90° 时, 其最大值最大. 随着波流夹角的增大, 测压点 7 处的压强呈先减小, 后增大的趋势, 并在 22.5° 时得到最小值. 两处的计算压力变化规律均与实验规律一致. 此外 4 种波流夹角的两个高度上的涡量等值线分布如图 12, 可以看到, 随着波流夹角的增大, 涡脱落的方向从 x 轴正方向逐渐偏移向 y 轴正方向, 且随着波浪的运动, 由于浅水波生流的影响, 导管架的涡脱落会随着波浪出现沿着 x 轴的前后摆动现象.

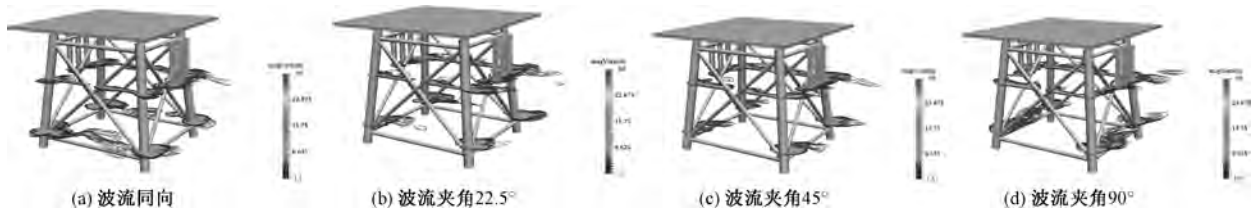


图 12 不同波流夹角下导管架平台涡量分布情况
Fig. 12 Distribution of vorticity with different angle of wave and current

文中进一步分析不同波流夹角对于波流叠加的实际影响,如图 13(a),在平台中心沿 x 轴前后各 1.5 m 水平面位置布置 200 个测压点,其布置范围如图中细长杆件所示范围,测压点纵贯了图 13(b)的数组防撞挡板. 计算中记录了该 200 个测压点的动压力数据,并将 17.7 s 时刻的压力记录数据如图 14.



图 13 平台附近自由面处压力监测点布置示意图
Fig. 13 Arrangement of pressure detecting points on the free surface

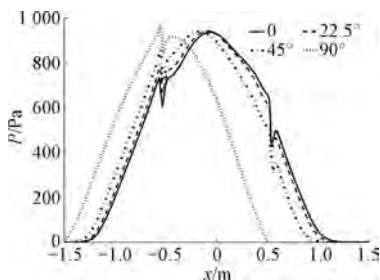


图 14 17.7 s 时刻时不同波流夹角动压力监测对比
Fig. 14 Comparison of pressure distribution between different angle of wave and current at 17.7 s

从图 14 中,同一时刻不同波流夹角的动压力记录对比可以发现,不同的波流夹角对应的波浪在同一时刻处在不同的位置,随着波流夹角的减小,波浪的波峰越向 x 正方向移动,这也就意味着,随着波流夹角的减小,在波流耦合的作用下,波流会增大波浪的波速,从而呈现不同波峰位置. 此外还可以发现,随着波流夹角的增大,忽略压力振荡点,动压力的峰值会略微增大,后减小,这说明波流夹角会影响波流场的形态. 这也是浅水波浪实验的一大特征,即潮流的存在会影响波浪的波峰高度. 通过图中曲线还可以发现,在平台前后各 0.5 m 左右各出现一个压力振荡点,这是由于该位置为平台前

后的防撞挡板夹缝,波浪在此处存在明显的爬高和破碎. 最后,通过波形的观察可以发现,在平台附近,对于同一个波浪,前方波浪的动压力明显小于平台后方的波浪动压力,即波浪未打到平台的部分的动压力比已经通过平台的部分的动压力大,动压力曲线形状明显呈现左高右低的形态.

4 结论

文中利用本课题组自主开发的船舶与海洋工程求解器 naoe-FOAM-SJTU 对一浅海导管架风机平台在波流联合作用下的载荷状况进行了研究. 首先对较大波高的工况进行计算和分析,并将计算结果与实验结果进行对比. 通过对比可以发现,利用该求解器所计算的结果与实验结果较为吻合,在平台的总体受力及局部压力的计算上,与实验结果较为接近. 其次,针对较小波高不同的波流夹角情况下平台的载荷状况进行分析,通过平台受力以及压力点的监测对比可以看出,平台所受载荷随着波流夹角的增大而呈现先略增后减小的趋势,这主要因为不同的波流夹角会形成不同的波流耦合,并叠加成不同形态的波流场. 而布置在不同位置的压力监测点监测的结果则表明,波流夹角也会显著地影响各点处的抨击压力,具体变化规律需根据测压点所处位置决定. 为了进一步分析不同的波流夹角对于平台周围波流场的影响,在平台周围的自由面处设置了一系列的测压点,并对记录的测压点处数据进行分析,得到了一系列波流夹角对波流叠加影响的结论. 文中分析波流夹角对于结构物的耦合作用,得到了一些规律性结果,为工程实际应用提供一些指导. 此外,由于计算均采用高阶规则波,而实际海况下平台的工作环境均为不规则波,因此在后续的研究中,可以进一步分析不规则波作用下,平台的受力和载荷情况.

参考文献 (References)

- [1] HU Yaqi, HE Erming, ZHANG Yang. Optimization design of TMD for vibration suppression of offshore

- floating wind turbine[J]. *International Journal of Plant Engineering and Management*, 2015, 20(1): 13 - 27.
- [2] BLENKINSOPP CE, CHAPLIN JR. The effect of relative crest submergence on wave breaking over submerged slopes [J]. *Coastal Engineering*, 2008, 55(12): 967 - 974. DOI:10.1016/j.oceaneng.2008.03.004.
- [3] 田超,丁军,杨鹏. 岛礁波浪环境下浮式结构物的动响应预报[J]. *船舶力学*, 2014, 18(11): 1284 - 1291.
TIAN Chao, DING Jun, YANG Peng. Prediction of dynamic response of floating structures under wave environment near islands and reefs [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2014, 18(11): 1284 - 1291. (in Chinese)
- [4] 丁军,田超,王志东,等. 近岛礁波浪传播变形模型试验研究[J]. *水动力学研究与进展, A辑*, 2015, 30(2): 194 - 200. DOI:10.16076/j.cnki.cjhd.2015.02.011.
DING Jun, TIAN Chao, WANG Zhidong, et al. Experimental research on wave deformation near the typical island [J]. *Journal of Hydrodynamics, A*, 2015, 30(2): 194 - 200. DOI:10.16076/j.cnki.cjhd.2015.02.011. (in Chinese)
- [5] 董艳. 波、流联合作用下海洋平台张力腿的涡激非线性振动[J]. *海洋学报(中文版)*, 1994, 16(3): 121 - 129.
- [6] 姜绍云,李志刚,段梦兰,等. 波流作用下导管架平台桩基冲刷试验研究[J]. *石油机械*, 2012, 40(9): 57 - 61.
JIANG Shaoyun, LI Zhigang, DUAN Menglan, et al. Experimental study of the pile foundation scouring of jacket platform under the effect of wave and current [J]. *China Petroleum Machinery*, 2012, 40(9): 57 - 61. (in Chinese)
- [7] CHANG K T, JENG D S. Numerical study for wave - induced seabed response around offshore wind turbine foundation in Donghai offshore wind farm, Shanghai, China [J]. *Ocean Engineering*, 2014, 85: 32 - 43. DOI:10.1016/j.oceaneng.2014.04.020.
- [8] SHEN Z R, WAN D C. Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe - FOAM - SJTU. " Technical Report for Solver Manual, Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [9] JACOBSEN N G, FUHRMAN D R, FREDSE J. A wave generation toolbox for the open - source CFD library: OpenFoam[®] [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2012, 70(9): 1073 - 1088.

(责任编辑:曹 莉)