

波流联合作用下风机单桩基础复杂流场的数值模拟

彭耀, 万德成*, 夏可

(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)

邹彩云, 斯锋

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 新能源工程设计院 江苏 310014)

*通信作者, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 固定式风机为了保持正常的工作性能, 需要有配套的支承基础使得风机拥有保持位置的能力。本文所研究的某型 3MW 海上风机拥有单桩固定式的风机支承基础。该支承基础在海洋中受到波浪和流的联合作用, 这些环境载荷对风机本身的运行效率以及安全性都有至关重要的影响, 研究风机基础在环境载荷作用下的各项力学性能对保证风机平稳安全运行有重大意义。本文基于江苏滨海某型 3MW 风机项目, 从数值模拟角度, 结合典型的试验数据, 获取该固定式单桩风机基础在不同水深、不同载荷作用下的承载特性, 并与典型的试验结果进行对比, 为后续的详细设计和结构改良提供一些有意义的参考数据。本文所用的求解器为上海交大万德成课题组基于开源平台 OpenFOAM 自主开发而来的 naoe-FOAM-SJTU 求解器。该求解器基于有限体积法 (FVM), 针对三维非常量不可压两相流 RANS 方程进行离散求解, 可以处理任意形状多面体网格; 采用流体体积函数 (VOF) 捕捉自由液面; 使用 PISO 算法求解压力-速度耦合项。本次数值分析的重点集中在总载荷力、压力分布、流场分布以及单桩基础危险截面力矩。

关键词: 固定式风机, 单桩基础, 波流联合作用, naoe-FOAM-SJTU 求解器

Numerical Simulation of a 3-MW Fixed Offshore Wind Turbine in Jiangsu under Wave-Current Action

Yao Peng, Decheng Wan, Ke Xia

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

Caiyun Huan, Feng Si

(Huadong Engineering Corporation, Jiangsu 310014, China)

Abstract: It is necessary to set up a corresponding foundation for an offshore wind turbine in order to keep it at its position and working smoothly. In this paper, a series of numerical simulation is conducted by the help of a viscous flow solver named naoe-FOAM-SJTU, which is based on the open source toolbox OpenFOAM, for the foundation of a 3MW wind turbine. The wave loads and combined wave-current loads on the mono-pile foundation in time

domain is calculated. The different dynamic response of the mono-pile foundation under wave loads and combined wave-current loads is compared. A typical result in this research is chosen to compare with the relative experimental result in order to validate our simulation. Results in this paper may provide practical information for the designers of mono-pile foundation.

Key Words : Offshore wind turbines; CFD; mono-pile foundation; combined wave-current loads; naoe-FOAM-SJTU solver

1. 引言

新世纪以来,陆上风电场的大规模发展带动了近海风电场的发展。世界上第一个离岸风电场于 1991 年建造于丹麦 Vindeby,直到 2008 年末,丹麦、英国、荷兰、爱尔兰和瑞典等国家已经建立了总容量为 1200MW 的海上风电场。风能可以认为是一种清洁的能源,经济、合理和有效地开发海上风能不仅进一步缓解新世纪能源紧张的问题,还能促进我国建立环境友好型能源网络。我国海上风电场建设起步较晚,2006 年才形成第一个招标项目,目前我国海上风电场发展可以认为处于初步阶段,以近海岸风机为主要研究对象。近海固定式风机考虑成本、实用性等多方面因素,以固定式风机为主。固定式风机为了保持正常的工作性能,需要有配套的支承基础使得风机拥有保持位置的能力。本文针对浙江滨海 300 兆瓦风电场中功率为 3MW 的某型号固定式风机,对其单桩基础在环境载荷下的受力特性进行了研究,单桩基础受到的环境载荷主要包括波浪和海流作用,单桩基础的受力特性对其所支承的固定式风机的运行效率及安全性都有至关重要的影响,研究风机基础在环境载荷作用下的各项力学性能对保证风机平稳安全运行有重大意义。

近年来,我国在相关领域进行了广泛的研究。王海龙等人采用非线性波浪时域耦合数值模型计算圆柱物体上的非线性波浪压力和流场波面的升高,并进行了圆柱波浪压力的物理模型试验以及验证了计算结果。祁德庆等人对不规则波作用下风机单桩基础机构响应进行了数值模拟,他们运用商业软件 Matlab 和 Ansys,对单桩基础在不规则波浪载荷作用下的响应进行了分析。杨锋等人对近海风机基础的结构型式进行了研究,他们认为除了单桩式基础外,三桩柱式和四桩柱式基础比较适合我国设备的施工能力及东部近海的地质情况。

本文所用的求解器为上海交大万德成课题组基于开源平台 OpenFOAM 自主开发而来的 naoe-FOAM-SJTU 求解器。该求解器基于有限体积法 (FVM),针对三维非定常不可压两相流 RANS 方程进行离散求解,可以处理任意形状多面体网格;采用流体体积函数 (VOF) 捕捉自由液面;使用 PISO 算法求解压力-速度耦合项。本次数值分析的重点集中在总载荷力、压力分布、流场分布以及单桩基础危险截面力矩。

2. 数学模型

2.1 控制方程

对于不可压、黏性流体, naoe-FOAM-SJTU 求解器的控制方程为不可压 RANS 方程:

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

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

式中: \mathbf{U} 表示速度场; \mathbf{U}_g 表示网格节点的速度; $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ 表示动压力场,由总压力减去静水压力得到。 ρ 表示空气和水两项流体的混合密度; \mathbf{g} 表示重力加速度; $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$ 表示有效动力粘性系数,其中 ν 表示运动粘性系数, ν_t 表示涡粘系数; f_σ 是两相流模型中的表面张力项,; f_s 是源项,用于消波。控制方程采用 PISO 算法处理速度与压力的耦合。

2.2 自由面捕捉方法

本文采用边界可压缩的 VOF 方法来追踪和捕捉自由液面的变化。这种处理方式的好处是能有效的控制数值扩散，以较高的精度捕捉自由面。

VOF 输运方程定义为：

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

其中， α 是体积分数，是网格单元中流体所占的体积比，其值介于 0 和 1 之间：

$$\begin{cases} \alpha = 0, & \text{air} \\ \alpha = 1, & \text{water} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{free surface} \end{cases} \quad (4)$$

同时，密度 ρ 和动力粘性系数 μ 也可以由 α 来表征：

$$\begin{cases} \rho = \alpha\rho_l + (1 - \alpha)\rho_g \\ \mu = \alpha\mu_l + (1 - \alpha)\mu_g \end{cases} \quad (5)$$

下标 l、g 分别表示流体和气体。

2.3 湍流模型

在本文中采用的是标准 $k - \omega$ 湍流模型，标准 $k - \omega$ 模型是基于 Wilcox $k - \omega$ 模型，为考虑低雷诺数、可压缩性和剪切流传播而修改的。Wilcox $k - \omega$ 模型预测了自由剪切流传播速率，像尾流、混合流动、平板绕流、圆柱绕流和放射状喷射，因而可以应用于墙壁束缚流动和自由剪切流动。

2.4 速度压力耦合方程的求解

本文通过 PISO (pressure-implicit-split-operator) 算法来求解 N-S 方程和连续性方程。PISO 意为压力的隐式算子分割法，由 Issa 于 1986 年提出，起初是针对非稳态可压流动的无迭代计算所建立的一种压力速度计算程序，后来在稳态问题的迭代计算中也广泛使用。

2.5 离散方法

RANS 方程(式 1 和式 2)和 VOF 输运方程(式 3)都采用有限体积法来进行离散，计算域离散成一系列小单元，计算流场信息存储在网格单元中心，再根据单元中心的值插值即可得单元面的值。最后根据 Gauss 理论，把单元表面的值相加转化就可以得到单元体的体积积分。对不同的项采用不同的插值方法，方程 (2) 中的对流项采用二阶 TVD 有限线性法，扩散项采用二阶中心差分法，VOF 方程采用 Van Leer 离散方法，时间项采用二阶向后插值方法。

3. 计算模型

本次研究计算所采用的单桩基础模型主要由四部分组成：主桩体、支撑钢管系统、圈梁系统和电缆管。单桩基础的三维建模示意图如图 1 所示。



图 1 单桩基础的三维模型

为了与物理模型试验保持一致，我们对单桩风机基础进行了缩尺比为 $\lambda=1:30$ 的模型变换。同时，在处理海洋结构物在水中的动力模型相似律问题时，我们保持实体与模型之间的傅汝德数和斯托哈数相等，即：

$$\frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{V_s}{\sqrt{gL_s}} \quad \text{且} \quad \frac{V_m T_m}{L_m} = \frac{V_s T_s}{L_s} \quad (6)$$

由此，确定了模型尺度下的各个主尺度参数，见表 1。

表 1 模型主尺度参数表

参数	实尺度		模型尺度	
	单位	数据	单位	数据
高度	m	29	m	0.967
上表面外径	m	4.3	m	0.143
下表面外径	m	6	m	0.2
设计高潮位水深	m	20.3	m	0.677
极端高潮位水深	m	21.4	m	0.713

本文采用的海况参数以当地实际海况统计参数为准，根据实际要求，已经简化成规则波，见表 2。换算成模型尺度参数见表 3。

表 2 实尺度海况参数表

海况编号	规则波编号	波高(m)	周期(s)	海流流速(m/s)	海况
1	规则波 1	7.78	10.95	1.73	50 年一遇
2	规则波 2	8.70	11.50		100 年一遇

表 3 模型尺度海况参数表

海况编号	规则波编号	波高(m)	周期(s)	海流流速(m/s)	海况
1	规则波 1	0.259	2	0.3159	50 年一遇
2	规则波 2	0.290	2.1		100 年一遇

本文采用的计算域在长、宽、高三个维度上的范围分别是 $\text{Length}[-5\text{m}, 20\text{m}] \times \text{Width}[-7.5\text{m}, 7.5\text{m}] \times \text{Height}[-h, 5\text{m}]$ ，其中 h 为对应工况的模型尺度水深，计算域与浪流方向布局如图 2 所示，其中 L 表示模型尺度的波长值，文中取为 5 米。模型的局部网格和整体网格如下图 3。

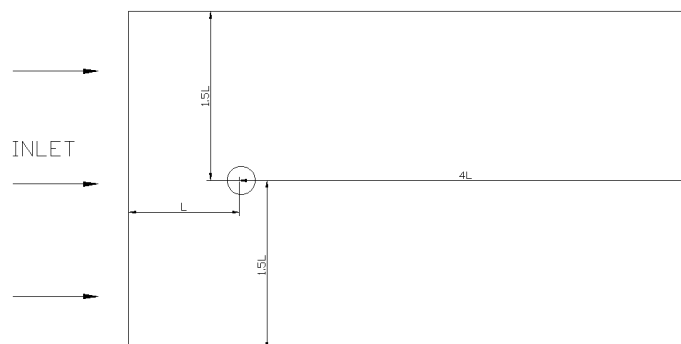


图 2 计算域俯视图与波流方向示意图

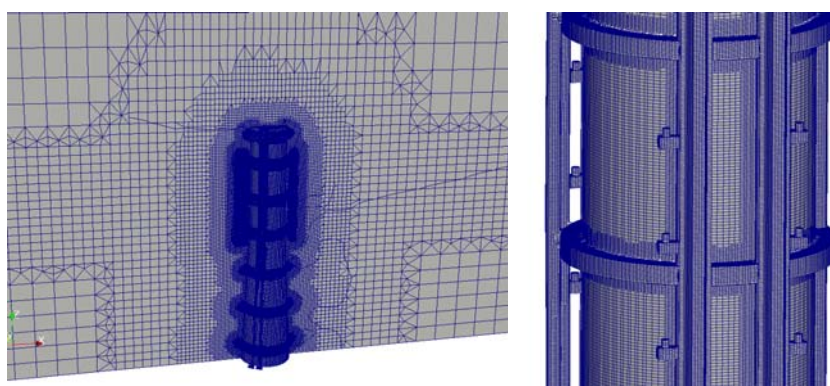


图 3 单桩基础整体网格与局部网格示意图

4. 数值模拟结果

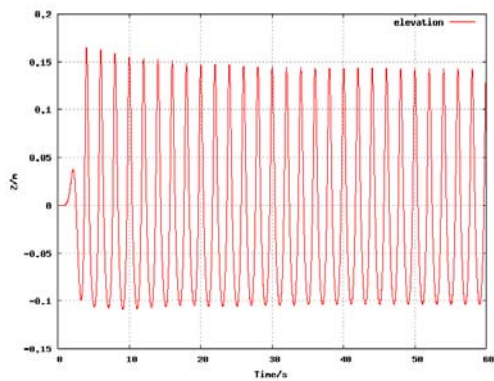
在本次数值模拟中，数值造波工作是后续计算的基础，数值造波的良好与否直接影响到后续计算结果的准确性。本章先对数值造波的结果进行了验证，然后分析了典型纯波浪工况下数值模拟的结果，接着分析和对比了单桩基础在纯波作用下与在波流结合作用下的受力差异，最后选取极端高潮位波流联合作用工况数值模拟结果与物理实验的结果进行分析对比。

4.1 数值造波

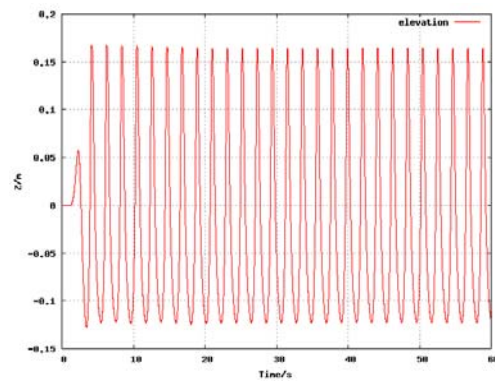
本文根据波浪参数之间的关系（波浪色散关系），确定所模拟的规则波属于斯托克斯高阶波范围。并且考虑到本次研究所有的计算工况全部为浅水工况，本文选取斯托克斯五阶波作为数值计算的波浪模型。值得指出的是，根据斯托克斯波理论，斯托克斯波不同于一般小振幅波浪，它的剖面不是简谐曲线，且关于横轴不是对称的，通过质心的平面高于对应的静止水面，波峰较为尖锐，波谷较为平坦。

本文进行波浪模拟测试是在空场的情况下进行，即在整个计算域中，刚开始并不放入模型，而在模型本来应该在的位置设置测波点，测量该处波高随时间的变化情况。图 4 给出 4

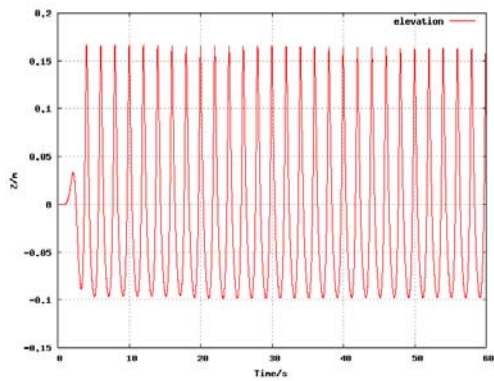
个典型的波浪模拟结果。图 5 给出水深 0.713 米，波浪周期为 2s 的极端高潮位工况波浪情况与试验造波的对比，图中可以看出，本次数值造波的结果与试验造波基本一致，本次数值造波所采用的波浪模型能有效的模拟现实中的波浪浅水效应，波高的平均误差在 1% 以内。



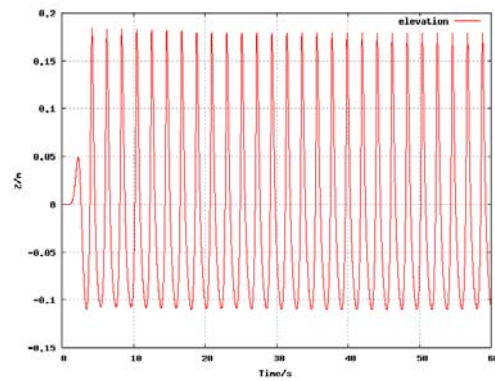
(a)水深 0.713 米，波浪周期 2s 模型位置波高时历图



(b)水深 0.713 米，波浪周期 2.1s 模型位置波高时历图

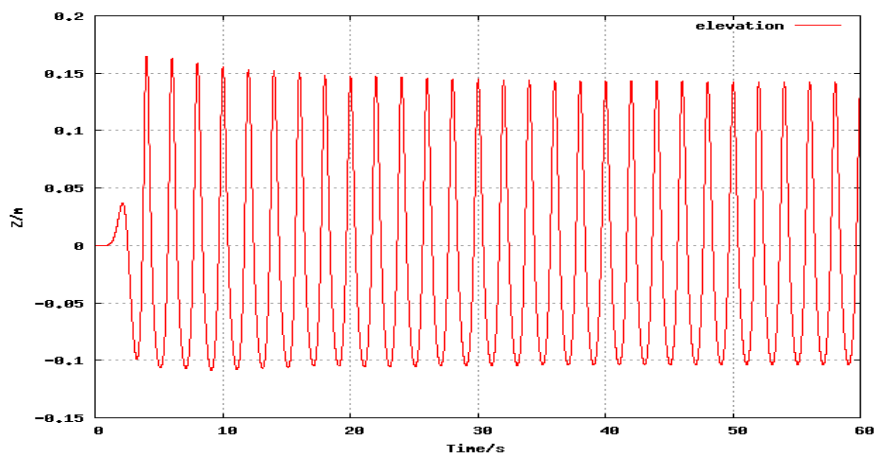


(c)水深 0.677 米，波浪周期 2s 模型位置波高时历图

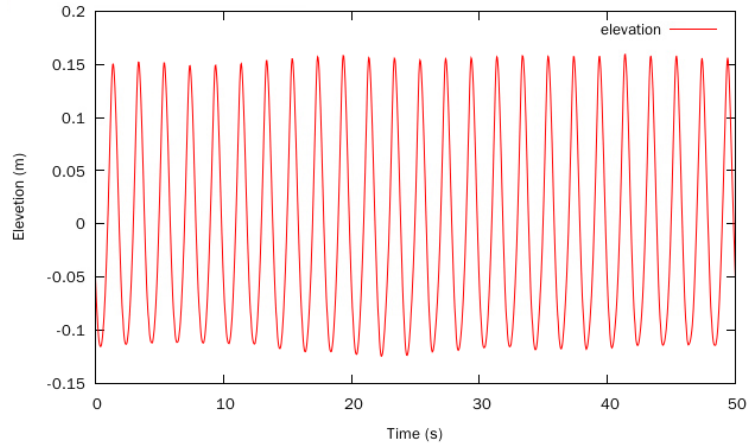


(d)水深 0.677 米，波浪周期 2.1s 模型位置波高时历图

图 4 数值造波结果示意图



(a)水深 0.713 米，波浪周期 2s 模型位置波高时历图(数值结果)

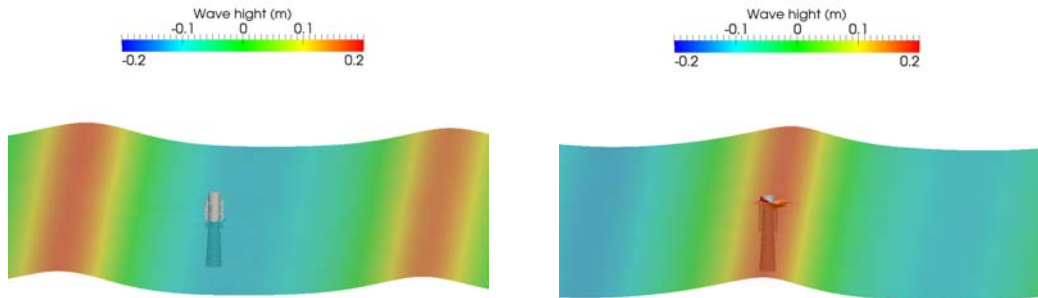


(b)水深 0.713 米，波浪周期 2s 模型位置波高时历图(实验结果)

图 5 数值造波结果与实验造波结果

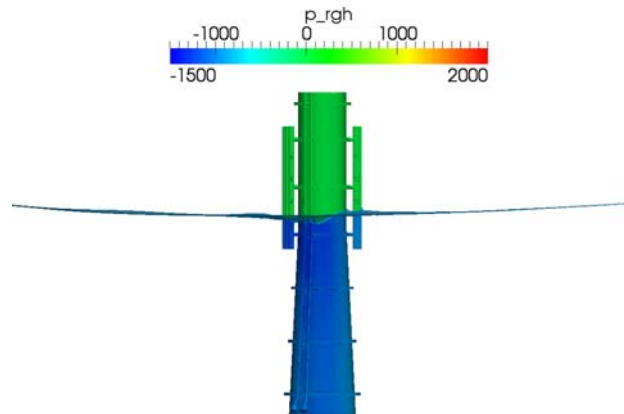
4.2 极端高潮位（模型水深 0.713m）下的数值模拟结果

图 6 给出了单桩基础在极端高潮位、入射波浪为百年一遇的规则波（规则波 2）纯波浪工况下的各项数值模拟结果。从图中可以看到，波浪爬高基本达到平台上沿；在单桩基础处于波峰附近时，单桩基础迎浪面动压力增加明显；在单桩基础处于波谷附近时，单桩基础在水中的部分产生负压（即相对于初始时刻这里的压力减小）。单桩基础整体在沿波浪方向的迁移力变化如图 7 所示。

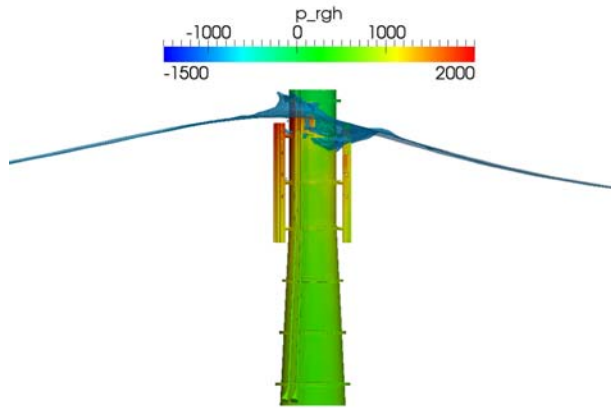


(a) 单桩基础处于波谷时自由液面情况

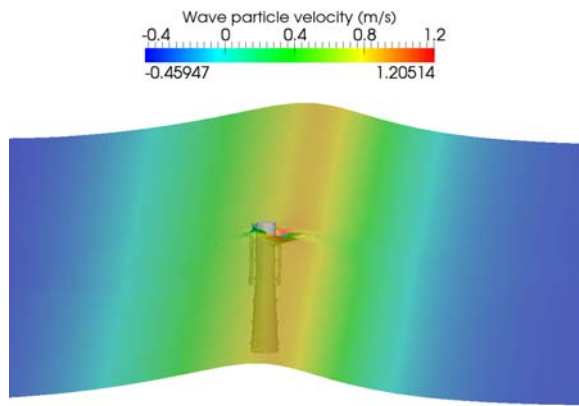
(b) 单桩基础处于波峰时自由液面情况



(c) 单桩基础处于波谷时物体表面动压力场分布情况



(d) 单桩基础处于波峰时物体表面动压力场分布情况



(e) 单桩基础处于波峰时自由液面速度场分布情况

图 6 单桩基础典型时刻数值模拟结果

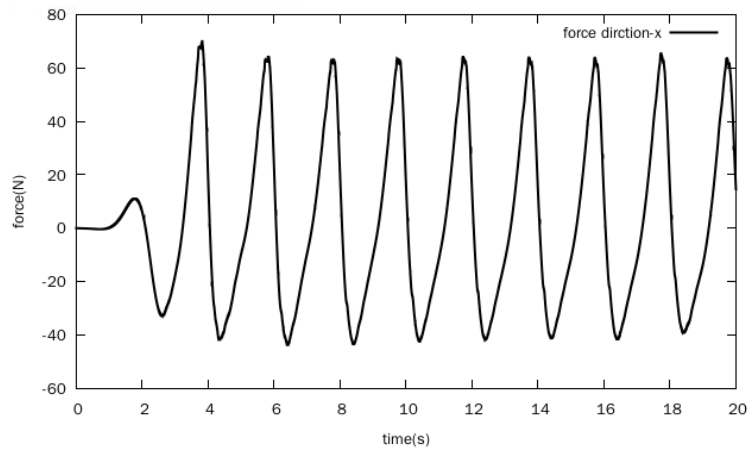


图 7 单桩基础波浪方向整体受力的时间历程曲线

4.3 纯波浪作用与波流联合作用的对比

为了分析流的加入对单桩基础载荷的影响，本文选取 2 种不同水深，不同波浪的工况进行纯波浪载荷与波流联合作用载荷的对比：其一，在设计高潮位（模型水深 0.677 米）下，

模型受到“规则波 1”的单独作用和波流联合作用，模型在波浪方向整体牵引力对比如图 8 所示；其二，在极端高潮位（模型水深 0.713 米）下，模型受到“规则波 2”的单独作用和波流联合作用，模型在波浪方向整体牵引力对比如图 9 所示。从 2 图中我们可以看出，在波流联合作用的情况下，相比于单纯的波浪载荷，模型在沿波流方向的整体牵引力有一个整体的偏移，流的作用使得单桩基础受到的最大载荷增加。

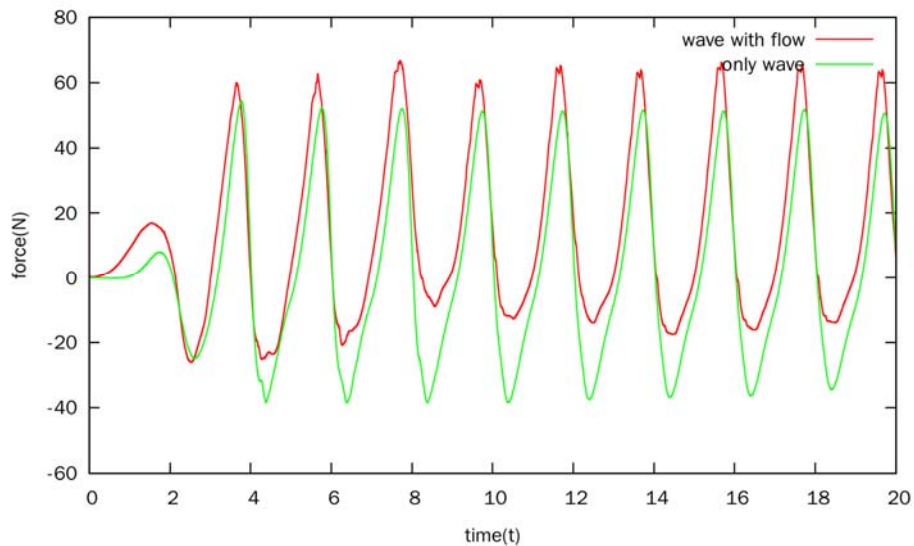


图 8 设计高潮位下，纯波浪（规则波 1）作用与波流联合作用下模型受力对比

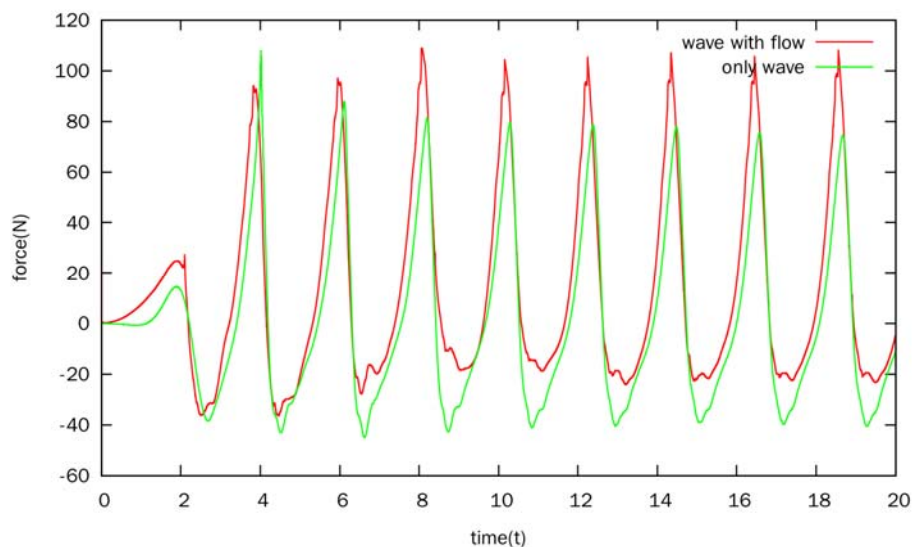


图 9 极端高潮位下，纯波浪（规则波 2）作用与波流联合作用下模型受力对比

4.4 极端高潮位波流联合作用下数值模拟与实验对比

图 10 给出极端高潮位下，单桩基础受到“规则波 2”波流联合作用下，单桩基础模型在波流运动方向上的整体牵引力随时间的变化曲线。从图中可以看出，整个载荷曲线的变化周期和趋势是一致的，在峰值方面，由于试验仪器本身对流场的作用、数值的误差和测量误差等因素，数值结果和试验结果有一定的误差，但整体来看可以认为符合的比较好。图 11 给出在该工况下，单桩基础受到对于桩腿处（危险截面）力矩随时间变化的曲线，可以看出，整个单桩基础模型危险截面受到的力矩载荷在 -5kgm 到 10kgm 之间，数值模拟与试验结果基

本吻合。

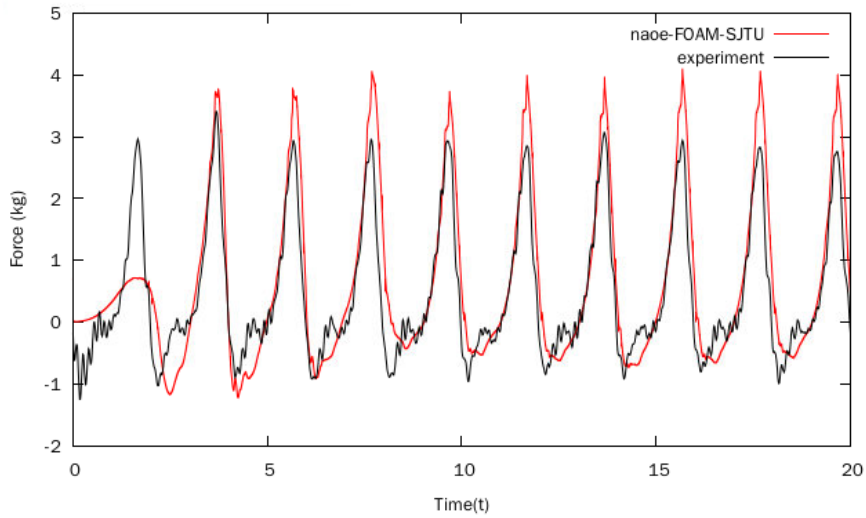


图 10 单桩基础模型沿波浪方向整体受力数值与实验结果对比

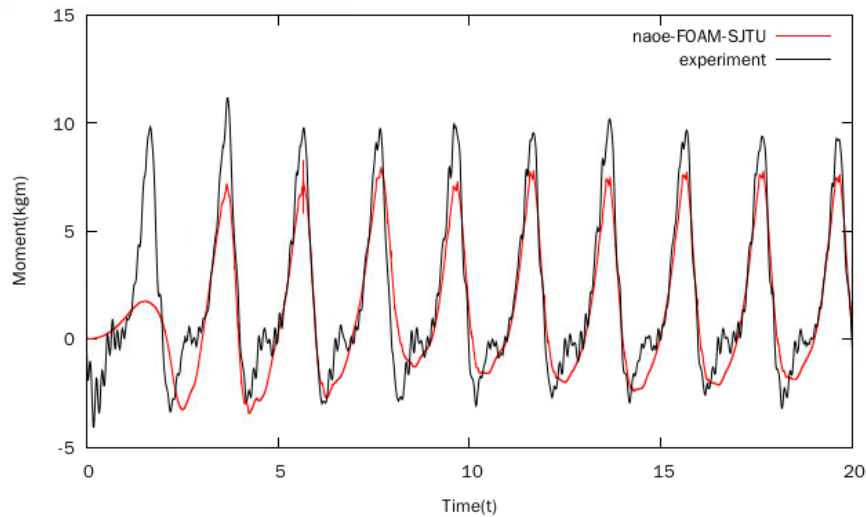


图 11 单桩基础模型低端危险截面力矩数值与实验结果对比

5. 结论

本文所采用的斯托克斯五阶波模型能够较好的抓住高阶规则波特性和浅水波特性,数值造波结果与试验造波结果吻合,说明本研究所采用的波浪有较好的可信度和精确度。通过将典型工况的数值模拟结果与实验结果进行比较,可以看出本次数值模拟采用的naoe-FOAM-SJTU求解器能有效的模拟单桩基础在波流作用下的载荷情况,该求解器在处理结构的波流载荷问题上有较高的可靠性。对于本文所研究的单桩基础结构而言,当它受到波流联合作用时,相比于单纯受到波浪作用的时候,它在波流方向的整体受力有所沿着流的方向偏移,最大载荷增加。

6. 致谢

本文得到国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 1143200, 51579145, 11272120)、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)、工信部

数值水池创新专项(2016-23/09)资助, 在此表示衷心感谢!

参考文献

- [1] 张秀芝, 徐经纬. 中国近海的风能资源 [J]. 风能产业, 2013.07: 16-21
- [2] 周荣卫, 何晓风等. 中国近海风能开发潜力数值模拟 [J]. 资源科学, 2010.31(8): 1434-1443
- [3] 杨锋, 邢占清等. 近海风机基础结构型式研究 [J]. 水利水电技术, 2009.40(9): 35-38
- [4] 祁德庆 崩兴峰. 不规则波作用下风机单桩基础结构响应分析 [J]. 力学季刊, 2012.33(4): 657-664
- [5] 王海龙, 邹志利等. 波浪对圆柱作用的三维耦合计算模型 [J]. 中国海洋平台, 2010.25(5): 38-48
- [6] 查晶晶, 万德成. 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波 [J]. 海洋工程, 2011.29(3): 1-12
- [7] Cao, H, Wan, DC. Numerical Study of Motion Response of Floating Body in Extreme Wave[C]. Proceedings of the Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference, Busan, Korea, 2014: 599-606
- [8] Cao, H., Wan, DC. Development of Multidirectional Nonlinear Numerical Wave Tank by naoe-FOAM-SJTU Solver [J]. International Journal of Ocean System Engineering. 2014, 4(1): 52-59.
- [9] Cao H., Wang X., Liu Y., Wan DC. Numerical Prediction of Wave Loading on a Floating Platform Coupled with a Mooring System. [C] In The Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference. Anchorage, Alaska, USA. 2013: 582-589.
- [10] Cao H, Wan D. RANS-VOF Solver for Solitary Wave Run-up on a Circular Cylinder. [J] China Ocean Engineering. 2015, 29(2):183-196.
- [11] Shen Z, Wan, DC. An Irregular Wave Generating Approach Based on naoe-FOAM-SJTU Solver[J]. China Ocean Engineering, 2016, 30(2): 177-192
- [12] Shen Z, Cao H, Wan DC. Manual of CFD solver naoe-FOAM-SJTU[R]. Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, 2012.
- [13] 曹洪建, 万德成, 杨驰. 三维溃坝波绕方柱剧烈流动的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2013, 28(4): 414-422