

文章编号:1005-9865(2018)03-0010-08

岛礁附近浮式平台运动响应特性数值分析

夏 可^{1, 2, 3}, 万德成^{1, 2, 3}

(1. 海洋工程国家重点实验室(上海交通大学), 上海 200240; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 3. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘 要:利用基于开源平台 OpenFOAM 自主开发的船舶与海洋工程水动力性能求解器 naoe-FOAM-SJTU, 数值模拟了近岛礁环境下规则波的演化特性以及带有系泊系统的浮式平台在相应波浪作用下的水动力性能。对于平台的水动力性能的研究发现, 仿真结果与试验结果在平台自由衰减运动固有周期及 RAO(response amplitude operator) 方面吻合良好。对于波浪在近岛礁地形下的演化现象的研究, 分析了波浪演化不对称性特性的成因, 并分别给出了不同参数下波浪在地形上爬升时演化的具体特性, 对于波高变化及波浪演化的频率成分进行量化的探究。研究发现, 波浪周期越大, 波高变化越明显, 演化的非线性现象越明显, 且波浪随着传播距离的增大演化出的阶数也在增大。

关键词:近岛礁地形; 浮式平台; 波浪演化; naoe-FOAM-SJTU 求解器

中图分类号: P751 文献标志码: A DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2018.03.002

Numerical investigation of motion response of floating platform near submerged terrain

XIA Ke^{1, 2, 3}, WAN Decheng^{1, 2, 3}

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. The School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In the present study, our in-house 3D viscous flow solver naoe-FOAM-SJTU is employed to simulate the wave evolution characteristics and hydrodynamic properties of floating platform in the corresponding wave environment in shallow water with submerged terrain near island. The validation work was done by comparing the period of free decay motion in three degrees of motion with the experimental data. Subsequently, the RAO (Response Amplitude Operator) of the platform in regular waves of the numerical simulation was compared with experimental data and the comparison showed a great correlation. The properties of the wave evolution and the breaking characteristic over the submerged terrain were clearly depicted and analyzed.

Keywords: submerged terrain; floating platform; wave evolution; naoe-FOAM-SJTU solver

随着海洋资源的快速开发, 越来越多的注意力被海洋中的岛礁所吸引。海洋岛礁周围往往环绕着数百米至数千米的珊瑚礁盘, 这些礁盘一般分布在岛礁周围较浅位置, 而在离开岛礁数百米左右后, 水深会骤然增大到数十米甚至上百米, 接近深海水深^[1], 这种地形使得岛礁附近大规模建设难以展开。礁盘的存在也

收稿日期: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(51490675, 11432009, 51579145, 51379125); 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); 工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目资助(2016-23/09)

作者简介: 夏 可, 男, 江苏人, 硕士研究生, 主要从事浮式平台水动力性能数值分析研究。

通信作者: 万德成。E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

使得近岛礁附近海况复杂,礁盘上的浅水海况也使得大规模的岛礁补给更为困难^[2]。为了更好地保障资源开发与岛礁建设,在岛礁附近建立一个浮式平台作为综合保障基地是一个极佳的选择。

与深水浮式结构物相比,浅水情况下的浮式结构物水动力性能的研究起步较晚也相对较少。Tajali 和 Shafieefar^[3]分析了柔性或刚性连接的多体浮式码头在入射波浪下的水动力性能及六自由度运动响应。刘远传和万德成^[2]基于 OpenFOAM 完成了系泊系统程序的自主开发,数值模拟了某浮式码头在带有系泊系统情况下的六自由度运动响应,其结果表明,浮式结构物周围出现了显著的波浪爬高、破碎等强非线性现象。田超等^[4]基于模型试验与势流方法对浅水近岛礁浮式平台的水动力性能和波浪场演化问题进行了分析,试验结果显示,波浪在礁坪上演化剧烈,出现了波陡过大以及破碎的现象。彭耀等^[5]分别运用模型试验手段与数值模拟方法详细分析了某浅海风机单桩基础平台在规则波以及潮流联合作用下的平台载荷响应。Zhang 等^[6]运用 CFD 的方法分析了浅水单桩基础在规则波作用下的水动力响应以及平台受到的载荷响应特性,并基于 u-p 模型数值仿真了规则波及桩柱作用下海底地形的变形情况。

本次研究的浅海波浪环境较为复杂,特殊的海底边界会对波浪传播造成严重影响,波浪向浅水区域传播的过程中会出现十分明显的演化现象,波形由线性波演化为明显的坦谷波形态,此外,随着波浪演化过程中波高和波陡的增大,波浪更易产生波浪翻卷和破碎等强非线性演化现象^[3],而在非线性波作用下,结构物更易受到波浪的强非线性抨击。由于势流理论对于黏性、漩涡的影响无法完全考虑,而浅海地形下的波浪演化问题属于典型的强非线性问题,其导致的波浪翻卷、破碎、抨击、爬高等现象又恰恰是由黏性以及有旋流动所导致的气液两相相互耦合的强非线性现象^[7],因此势流理论不再适用。将采用 CFD 数值模拟手段对于近岛礁浮式结构物以及波浪问题进行仿真,主要计算平台的自由衰减运动及对应工况下规则波中平台的 RAO,并与田超等^[4]试验结果进行对比,并针对规则波在浅海地形中的演化特性进行了详细的波浪参数化研究。

1 数值方法

1.1 控制方程

基于不可压、黏性流体进行数值模拟,其控制方程为:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla(\rho(U - U_g)U) = -\nabla p_d - gx \nabla \rho + \nabla(\mu \nabla U) + f_\sigma \quad (2)$$

式中: U 和 U_g 分别表示流场速度和网格节点速度; $p_d = p - \rho gx$ 为流场动压力; g 、 ρ 和 μ 分别为重力加速度、流体的密度和动力黏性系数, f_σ 为方程源项。采用有限体积法(FVM)对控制方程进行离散,采用流体体积法(VOF)进行自由面的捕捉。

1.2 造波理论及方法

波浪对结构物来说是至关重要的环境因素之一,在数值计算中,准确的波浪结果是数值模拟的关键要素,采用基于 OpenFOAM 开发的开源代码包 Waves2foam^[8]进行造波。波浪为 Stokes 二阶波,其波面高程公式如下:

$$\begin{cases} \eta = \eta_1 + \eta_2 \\ \eta_1 = \frac{H}{2} \cos \omega t \\ \eta_2 = \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh kd}{\sinh^3 kd} (2 + \cosh 2kd) \cos 2\omega t \end{cases} \quad (3)$$

其中, η 是波面高程, H 为波高, k 为波数, d 为水深。在该造波模块中,松弛区的概念被提出并应用在求解器中。松弛区的控制方程如式(4)所示,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所示。松弛因子 α_R 的变化将直接影响 ϕ 的值, ϕ 为自由面速度 u 或者流体相参数 γ 。从图1可以看出,在 inlet 松弛区中,波浪强度会从零增大并趋于稳定,而在 outlet 松弛区中波浪强度会从小变大并趋于零,松弛区具有数值水池的造波功能以及消波功能。

$$\begin{cases} \alpha_R(\chi_R) = 1 - \frac{\exp(\chi_R^{3.5}) - 1}{\exp(1) - 1}, \quad \chi_R \in [0, 1] \\ \phi = \alpha_R \phi_{\text{computed}} + (1 - \alpha_R) \phi_{\text{target}} \end{cases} \quad (4)$$

1.3 系泊系统求解方法

为了分析系泊系统与浮体耦合问题,基于 OpenFOAM 开源平台开发了系泊系统求解模块。数值模拟中对系泊系统求解采用的是分段外推法(PEM),该方法可以考虑系泊变形以及流场作用力。系泊线被分为数段,其分段的受力如图 2 所示,水平和垂向上的受力平衡方程:

$$\begin{cases} T_{xi+1} = T_{xi} + F_i \text{dscos}\varphi_{i+1} + D_i \text{dssin}\varphi_{i+1} \\ T_{zi+1} + D_i \text{dscos}\varphi_{i+1} = T_{zi} + F_i \text{dssin}\varphi_{i+1} + w_i \text{dl} \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_x 、 T_z 及 φ 表示分段张力的水平分量、垂向分量以及张力和水平分量间夹角,dl 和 ds 分别表示分段原长及变形后长度, w_i 为分段线密度, D 和 F 为分段法向及切向受力。系泊系统的数值实现是通过将上一时刻系泊力添加到六自由度运动方程中,实现下一时刻的浮体速度和位移的求解^[9]。

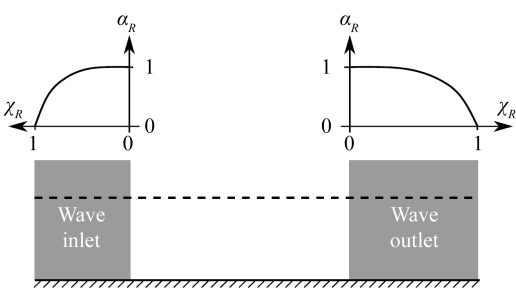


图 1 松弛因子在入口及出口松弛区中分布

Fig. 1 The variation of χ_R for inlet and outlet relaxation zones

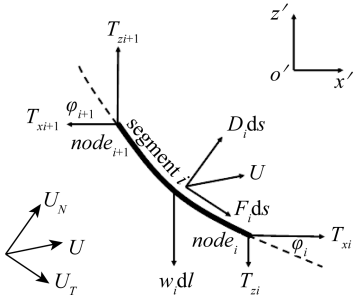


图 2 系泊线分段受力示意

Fig. 2 Force analysis of a mooring line segment for PEM

2 计算模型

文中第一部分工作主要研究了近岛礁半潜式平台在相应波浪工况中的水动力性能,平台的计算模型主要参考田超等^[10]所做的试验。平台的试验模型以及计算模型如图 3 所示,平台的系泊系统布置如图 4 及图 5 所示。由图 5 可知,由于近岛礁的斜底地形的影响,锚链的布置呈现不对称性:深水区域锚链长度较长,浅水区域长度较小。平台的主要参数如表 1 所示,系泊系统参数如表 2 所示。

表 1 半潜式平台主要参数

Tab. 1 Gross parameters of semi-submersible platform

主要参数	单位	数值	主要参数	单位	数值
型长	m	50	型宽	m	25
型深	m	9.7	吃水	m	5
排水体积	m ³	2 970	重心相对于水线高度	m	1.01
横摇惯性矩	kg · m ²	7.67×10 ⁸	纵摇惯性矩	kg · m ²	2.29×10 ⁸
首摇惯性矩	kg · m ²	8.73×10 ⁸			

表 2 系泊系统主要参数

Tab. 2 Primary parameters of mooring system

主要参数	单位	数值	主要参数	单位	数值
锚链数量		8	每组锚链间角度	(°)	150.1/14.9
锚泊点位置水深	m	10	系泊点位置水深	m	5
等效质量	kg/m	97.08	锚链直径	m	0.095
杨氏模量	N/m ²	1.2×10 ¹¹			

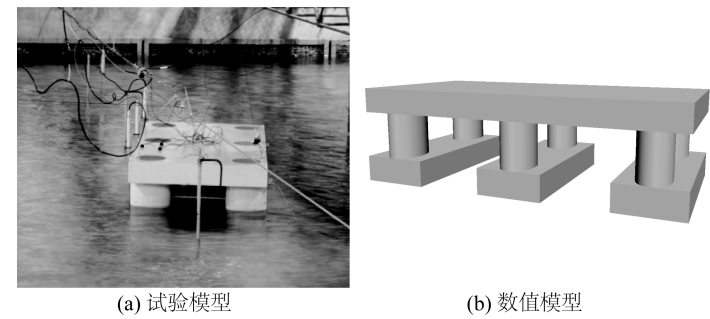


图 3 平台实验模型及平台数值模型

Fig. 3 Overview of experimental and numerical models

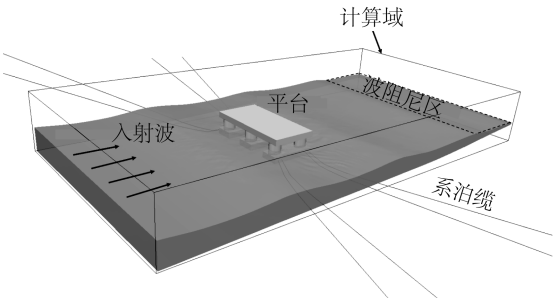


图 5 计算域布置示意

Fig. 5 Computational domain with all key factors

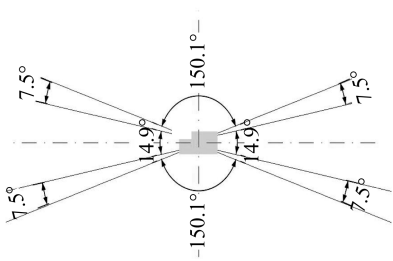


图 4 系泊系统布置示意

Fig. 4 Configuration of the mooring system

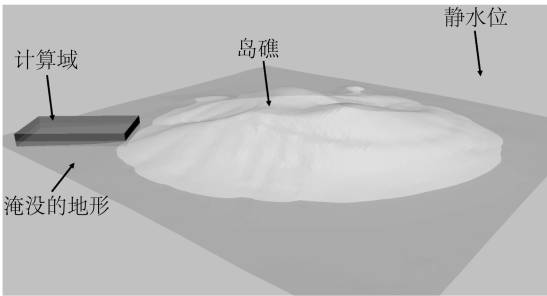


图 6 计算域及地形相对位置示意

Fig. 6 Sketch of computational domain and submerged terrain

文中第二部分工作为研究近岛礁环境下的波浪演化特征,因此对于近岛礁地形的模拟显得尤为重要。选取了与试验地形相近的近岛礁斜底地形,地形坡度约为两度,平台所在位置水深约为十米,计算域和地形相对位置如图 6 所示,将计算域覆盖的一部分地形提取出来作为计算域的底部边界条件来模拟海底。计算域布置包括系泊系统、平台位置、消波区、波浪来向等,如图 5 所示。

计算网格如图 7 所示,图 7(a)为一斜底边界条件下的计算域,从地形模型中提取出的底部边界条件如图 7(b)所示,地形的纵向形状可从计算域侧面图 7(c) 观察,图 7(d) 则给出了平台附近的网格情况。网格基于 OpenFOAM 自带的 snappyHexMesh^[11] 工具生成,通过对背景网格加密捕捉计算所需的物面边界条件。计算网格约为 160 万,计算的时间步长为 0.005 s。

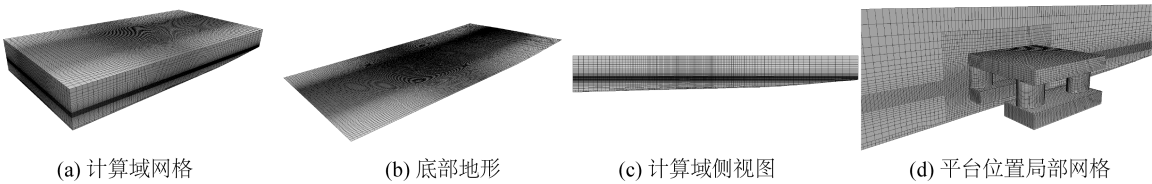


图 7 计算网格

Fig. 7 Computational mesh of the domain

表 3 计算主要波浪工况

Tab. 3 Wave condition implemented in this RAO calculation

工况	波高/m	周期/s	工况	波高/m	周期/s
case1	2.0	4.38	case5	2.0	12.00
case2	2.0	5.66	case6	2.0	14.00
case3	2.0	8.00	case7	3.2	10.53
case4	2.0	10.53			

波浪的参数直接关系到平台六自由度运动响应,为了更好地与试验结果对比,文中 case1~6 中的波浪参数的选取参考田超等^[4]的文章中的试验设定工况(如表 3 所示)。

3 波浪演化及平台水动力性能计算

3.1 平台水动力性能计算与验证

平台的固有周期是水动力性能研究中的重要内容,首先对近岛礁半潜式平台的固有周期进行了研究,对于波浪问题中所关注的平台纵荡、升沉以及纵摇自由衰减运动进行了计算,计算结果时间历程如图 8 所示。将数值模拟得到的垂荡及纵摇的固有周期结果与试验结果以及理论值进行了对比,结果如表 4 所示,其中 T_{φ} 为固有周期。

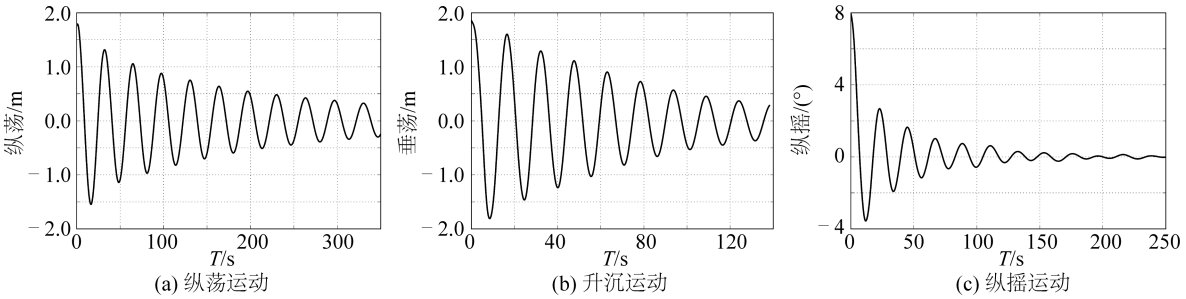


图 8 三个自由度平台自由衰减结果
Fig. 8 Free decay motion of platform

表 4 固有周期计算结果对比

自由度	固有周期 T_{φ} /s		
	模型试验值 ^[4]	理论预报值/相对误差 ^[4]	数值计算值/相对误差 (naoe-FOAM-SJTU)
纵荡	—	—	33/—
垂荡	16.1	16.5/2.48%	16/0.62%
纵摇	20.1	19.5/2.99%	20.8/3.48%

注:相对误差为相对试验误差。

由表 4 中结果可知,以试验结果为标准计算的相对误差中,基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器数值模拟得到的垂荡固有周期相对误差为 0.62%,纵摇相对误差为 3.48%,计算结果与试验结果吻合良好,垂荡结果相较于理论预报结果更接近真实值,验证了求解器的准确性,并为后文分析奠定基础。

平台在波浪中的运动响应评估中,RAO (response amplitude operator)是十分关键的参数。针对波浪工况 case1~7 进行数值计算,图 9 给出了工况 case7 的计算波面图。

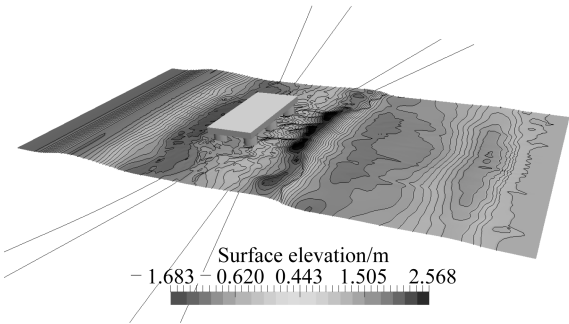


图 9 case7 仿真波面图
Fig. 9 Simulation results of the free surface of case 7

计算后得到相应的 RAO 响应,并与试验结果进行对比。对平台的 RAO 计算均在波浪的幅值和周期稳定后进行,根据 ITTC 规定^[12],进行规则波试验需要有十个以上的稳定周期,因此,计算时常均为 400~600 s,确保了计算结果的相对稳定。取时历相对稳定的后半段运动结果进行分析,通过对该段时间历程的运动幅值统计,求出运动幅值平均值,该幅值平均值与波幅平均值的比值即为对应平台工况的 RAO。将仿真结果与试验结果以及田超等^[4]利用 AQWA 的计算结果进行了对比,对比结果如图 10 所示。

从 RAO 对比结果可知,对于浅水近岛礁浮式平台的运动性能问题,数值模拟结果与试验结果吻合良好,特别在纵摇低频峰值及垂荡运动在波浪周期 15 s 处的波谷处,数值模拟结果与试验结果误差较小。

对于 RAO 的准确预报进一步验证了求解器的准确性以及结果的可靠性。CFD 方法在对于近岛礁波浪工况中浮式结构物的预报中相较于势流软件计算结果更为准确,通过分析可知,CFD 可以完全考虑黏性以及漩涡的影响,因此对于强非线性的波浪抨击、破碎以及爬高等现象模拟较为准确,与试验更为接近。

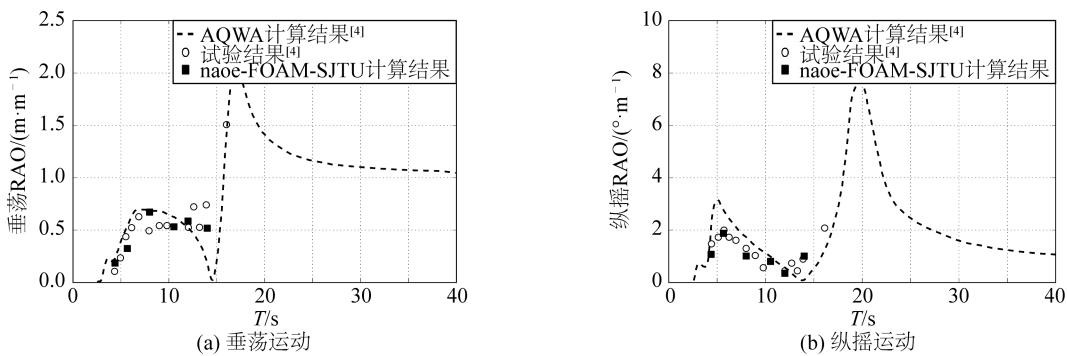


图 10 CFD 计算 RAO 结果与试验及其他数值计算结果对比

Fig. 10 Comparison of RAO results in heave and pitch between present work, experimental test and AQWA results

3.2 波浪演化特性分析

这里进行了空场(无结构物)测波试验,分析了斜坡地形下波浪的演化特性。测波点在计算域中布置如图 11 所示,在计算域中轴线位置处布置了 20 个测波点,测波点沿波浪传播方向从 1 到 20 进行编号。数值模拟波浪工况为 case1~7,分析相同入射波高下不同波陡与周期的波浪在浅水的斜底地形的演化特性。

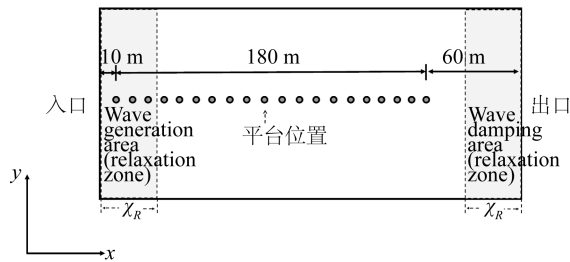


图 11 测波点在计算域中布置示意

Fig. 11 Arrangement of the wave gauges in the computational domain

如图 12 为 case6、case7 两个不同波浪工况在对应的四个测波点处波面高程的时间历程。从图中可以看到波浪演化现象:1)随着波浪的传播,波浪的波形逐渐发展为典型的坦谷波波形。2)波浪的横向不对称性及垂向不对称性随着波浪的传播越发明显,波浪在经过一段时间的演化过后,波形在横向上偏向波浪前缘,在垂向上波浪波峰到水平面距离明显大于波谷到水平面距离。3)case7 的计算中,当波浪经过一段时间演化后,波高增大,波长变小,波浪不对称性极为明显,波陡到达临界波陡后,波浪发生了破碎,破碎发生在测波点 15 和 20 之间,破碎后由于波浪翻卷等对能量的急剧消耗,测波点 20 处的波高陡然减小。

为了总结波浪波高的演化规律,将各工况波浪在不同测波点处测得的波浪时间历程进行统计,得到各工况波浪演化的波高变化过程,结果如图 13 所示。由图可知:1)波浪发生了明显的演化现象,波浪的波高都有不同程度的变化。2)波浪的周期越大,波浪的演化现象越显著,该规律与丁军等^[1]在试验中观察到的结果一致。在该波高情况下,当波浪周期较小时,波浪的波高呈减小趋势,虽有非线性的演化现象,但由于水质

点的轨圆运动幅度小,演化不明显,波浪处于衰减的过程;当波浪周期较大时,波浪波高出现明显变化,case5 波浪波高随着水深的变浅,传播到计算域尽头时已经产生了波高的增大,由于计算域限制,还没有充分演化,case6 的波浪则出现了明显的先增大后减小的趋势。3)同周期下波浪波高较大时,其波浪演化现象明显,对比 case4 和 case7 两个波浪工况,其波浪周期相同,而后者波高较大,因此后者出现了极为明显的波高变化,波高先增大后减小,特别是发生了波浪破碎后,波高大幅衰减。如图 14 所示,case7 的波浪因为剧烈演化而产生破碎。

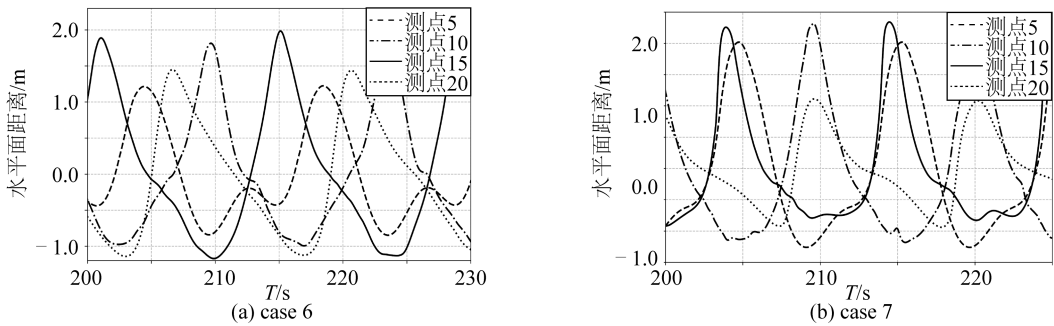


图 12 波浪在不同四个测波点处波浪时历对比

Fig. 12 Waveform measured by different wave gauges

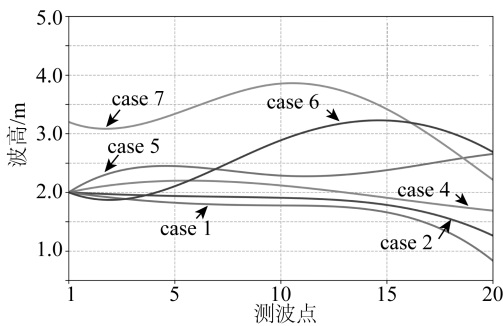


图 13 不同工况波浪波高沿传播方向变化情况

Fig. 13 Variation of wave height along the spread direction

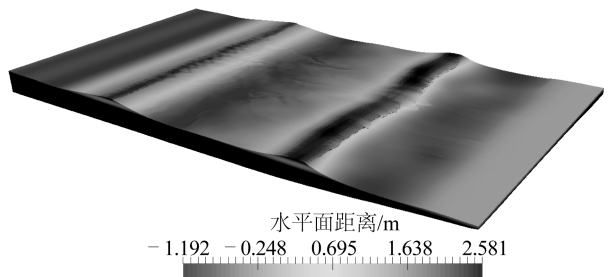


图 14 case7 波浪演化计算中波浪破碎现象

Fig. 14 Wave breaking phenomenon captured in case 7

由于波浪的波高并不能完全体现出波浪的演化特性,在前文的结果中可以发现,周期较小的波浪波高变化不明显,但其波浪形状已经发生了变化,可以发现较为明显的非线性成分,因此这里对于同波高的 case1~case6 的波浪在不同测波点处的稳定时间历程进行频谱分析,对于波浪的非线性特性进行量化的分析。

如图 15 所示,图中给出了不同工况在测波点 1、10、15 及 20 处的波浪响应的频域分析结果。从结果中可以发现与前文结论及试验结论相同的规律:随着波浪周期的增大,波浪的演化现象更为明显,且随着波浪传播距离的增大,波浪的演化越发充分。从图 15 中可以看出:1)当在测波点 1 位置处时,由于波浪刚进入计算域,波浪还未演化,波浪波形还处在基于势流理论给定的 Stokes 二阶波的范围之内。由测波点 1 处的波浪响应可知,各个周期的波浪均有两个很完整的峰值。2)随着波浪的传播,在测波点 10 位置处,周期为 14 s (case6) 的波浪已经体现了极强的非线性特性,波浪响应的频域结果得到了六个较为明显的峰值,说明此时波浪已经发生了明显的演化,出现了多种频率成分的波浪响应。而周期为 12 s (case5) 的波浪则也出现了三阶的峰值,表明此时该波浪已经出现了一定程度的演化。3)当波浪传播到测波点 15 位置处时,case6 的数值模拟结果仍有六个较为明显的峰值,case5 中出现了五个较为明显的峰值,而周期较小的波浪也体现出三阶的特性。4)在测波点 20 处,由于 case6 的波高已经经历了由增大到了减小的演化过程,该波浪由于能量的消耗各阶幅值明显降低,case5 也演化为较为明显的七阶波浪。而在前文的波高演化分析中,case4 波高出口处波高明显增大,相应的,在此处 case4 的波浪已出现了 5 个较为明显的峰值,演化现象较为明显。5)与前文分析一致,波浪周期较小的波浪演化现象并不明显,在整个波浪传播的过程中,周期最小的 case1 和 case2 第三阶频率成分均不明显。

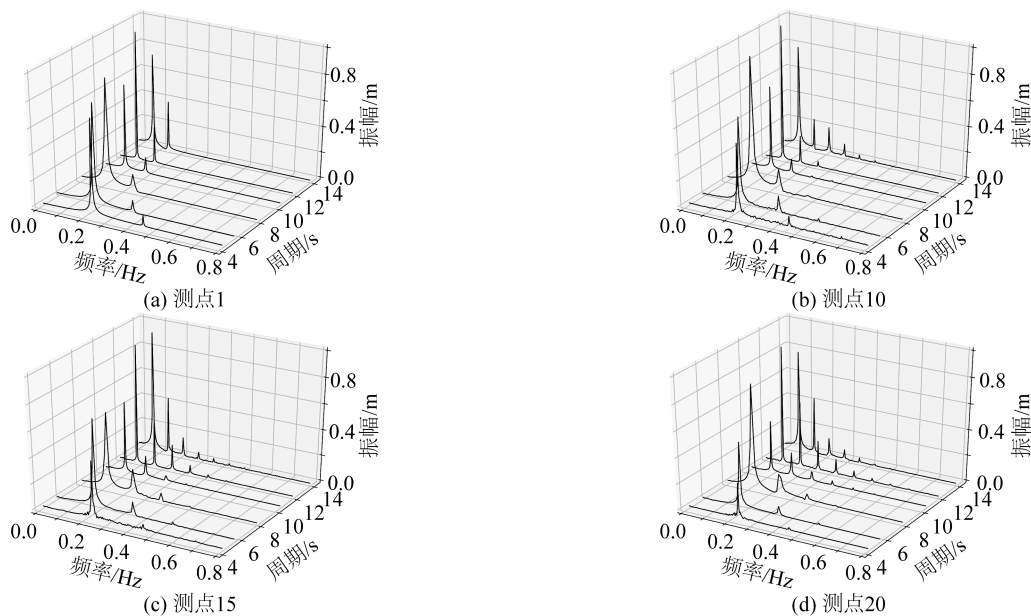


图 15 四个测波点处各波浪工况频谱分析结果

Fig. 15 Frequency analysis of different wave cases

4 结 语

利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对于近岛礁地形下某半潜式平台运动性能以及相应的波浪演化特性进行了研究。首先完成了平台三个自由度的自由衰减计算,分析了其固有频率特性,并与试验结果进行了对比,验证了求解器的可靠性与准确性。其后对于规则波中平台的水动力性能进行分析,对平台 RAO 的计算结果表明,CFD 的计算结果与试验结果更为吻合,该方法对于近岛礁波浪非线性、黏性影响较强的问题求解较好,比传统的势流理论计算结果更为准确,可以完全考虑流体黏性以及有旋运动的影响。最后,对各波浪工况下无结构物时纯粹的波浪演化问题进行了分析。分析发现,在带斜底地形的海域中,波浪会出现极为明显的演化,波形趋于坦谷波,波浪的横向及垂向不对称性均随着波浪传播更为明显;波浪的波高也在演化过程中呈现不同的变化特性,波浪的周期越大,波高的变化越明显。计算中还对波浪演化过程的非线性问题进行了量化研究,波浪在斜底地形海域中传播的距离越远,波浪的演化效应越发明显,非线性增强;此外,随着波高的增大及波长的变短,在达到极限波陡时会出现十分显著的波浪破碎现象。由于篇幅限制,对于平台运动的特性随着波浪工况的变化还未进行详细分析,同时对于不同地形下平台及波浪的演化特性的对比还未进行深入研究,这些工作留待日后继续探索。

参考文献:

[1] 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, 2015, 30(2):194-200. (DING J, TIAN C, WANG Z D, et al. Experimental research on wave deformation near the typical island [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2015, 30(2):194-200.(in Chinese))

[2] 刘远传,万德成. 锚泊浮式码头在波浪上的运动响应计算[C]//第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议文集.2013: 306-312. (LIU Y C, WAN D C. Study of motion response for floating offshore pier within mooring system in wave condition[C]//Proceedings of 25th National Conference of Hydrodynamics. 2013:306-312. (in Chinese))

[3] TAJALI Z, SHAFIEEFAR M. Hydrodynamic analysis of multi-body floating piers under wave action [J]. Ocean Engineering, 2011, 38(17-18): 1925-1933.