

数值模拟南海复杂海底地形上的波浪演化

曹洪建, 张晨亮, 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, 上海, 200240,

*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘要: 本研究利用基于开源程序库 OpenFOAM 自主开发的非定常黏性流体水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 对南海复杂海底地形上的波浪传播演化过程进行了数值模拟研究,对南海岛屿近岸浅水区的浪高值进行了预报。数值模拟结果给出了波浪从深海到近岸浅水整个区域上的演化过程,包括在近岸浅水区的波浪浅化和波浪破碎的完整过程,深度分析了复杂海底地形对波浪特性的影响。对岛屿近岸浅水区的浪高值进行了预报,为港口码头的设计建造和泥沙输运等问题提供了重要环境信息。

关键词: 南海; 波浪演化; 波浪浅化; 波浪破碎; naoe-FOAM-SJTU

1 引言

本世纪是海洋的世纪,海洋和海底蕴藏着丰富的自然资源。随着海洋科技产业的迅速发展,海洋和海底的资源将成为国际竞争的焦点。随着我国经济的不断发展和海洋领土意识的日益增强,我国正逐步加大对海洋和海底资源的开发和利用,尤其是深海油气资源。据探测表明,我国南海海底蕴藏着丰富的油气资源。由于南海海底地貌的复杂多变,海面海况十分恶劣,将对深海海洋平台和岛屿近岸港口码头造成严重的影响甚至破坏。因此,研究南海复杂海底地形上波浪的非线性演化过程,准确预报南海岛屿近岸浅水区域的海浪浪高,对于南海深海资源的开发和港口码头的设计建造和都具有重要意义。

随着计算机性能不断提高,CFD 技术已经成为研究非线性水波动力学问题的重要手段,可以较为可靠地对工程设计提供指导。针对当今船舶海洋工程领域较为关心的波浪的非线性演化问题和波浪结构物相互作用问题,我们基于开源程序库 OpenFOAM 自主开发了非定常黏性两相流动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU^[1],通过求解不可压缩黏性流体的控制方程,采用 VOF 方法捕捉自由面,实现对波浪生成、传播和演化以及波物相互作用过程的数值模拟研究。目前所开发 naoe-FOAM-SJTU 的求解器具有三维黏性数值波浪水池模块、模拟物体自由运动的 6DoF 运动模块和海洋工程中较为关心的锚链系统模块。利用 naoe-FOAM-SJTU 的数值波浪水池可以模拟多种类型的波浪流条件,从而实现在不同波浪条件下对船舶和海洋工程结构物的水动力性能的计算研究。本研究利用 naoe-FOAM-SJTU 的数值波浪水池模块对南海复杂海底地形上的波浪的非线性演化过程进行数值模拟研究,进而预报岛屿近岸浅水区的浪高,为结构物设计建造提供重要的波浪环境信息。

2 数值方法

水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 集成了数值波浪水池模块、物体的六自由度运动模块和为浮体结构物设计的锚链系统,可以提供多种波浪环境,计算模拟各种波浪环境下的海洋浮体结构的水动力性能和运动响应。naoe-FOAM-SJTU 采用有限体积法(FVM)求解黏性不可压缩流体的控制方程,包括:

$$\text{连续性方程:} \quad \nabla \rho U = 0 \quad (1)$$

$$\text{N-S 方程:} \quad \rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho U \cdot \nabla U - \mu \nabla^2 U = -\nabla p + \rho g + f_s \quad (2)$$

采用 VOF 方法捕捉自由面,流体体积分数 α 满足输运方程式:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha U = 0 \quad (3)$$

本研究采用速度入口边界造波,通过在波浪入射边界给定对应波面位置和水质点的速度表达式生产入射波浪。水底边界设置为不可滑移壁面条件 $U = 0$, $\partial p / \partial n = 0$; 出口的速度和压力梯度设置为 0。在数值模拟过程中,对控制方程中的各项采用不同的数值离散格式,采用隐式 Euler 格式对时间项进行离散,对 N-S 方程中的对流项采用带线性控制器的 TVD 格式,对 VOF 输运方程中的对流项采用 Van Leer 格式,采用人工压缩交界面的方法求解自由面,其他各项采用二阶中心差分格式。采用 PISO 算法实现压力场和速度场的耦合求解。

3 计算模型

本研究以我国南海某岛屿附近的真实海底地形为例,将其简化为如图 1 所示的由多个斜坡和台阶组成的二维计算模型。

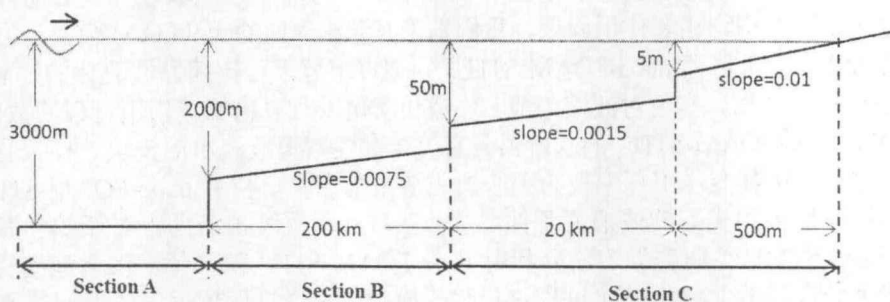


图 1 南海复杂地形的二维简化模型

波浪从深海传播到岛屿近岸,传播距离超过 200 km,水深变化近 3000 m。针对如此长距离、大尺度的问题进行整体计算,不但计算量巨大,且计算精度难以保证。本研究将计算模型划分成 A、B、C 三个区域,根据相对波高和水深等参数对水波进行分类,从而将计算模型进一步简化。入射波浪选取南海一年一遇波浪情况,周期 $T=13.6\text{ s}$,波高 $H=11.1\text{ m}$,由色散关系可知入射波波长 $\lambda=288.5\text{ m}$,在 A、B 两个区域中相对水深 $\lambda/d>0.5$,满足深水条件,认为在这一区域水深的变化对波浪特性影响很小,可以忽略。因此,直接模拟波浪在 C 区域的传播和演化过程,并对 C 区末端浅水区的浪高情况进行预报。计算时设定 C 区域入口边界设置为造波边界,根据 Stokes 一阶波理论给定入射波浪参数,入射波面方程为: $\eta = A \sin(kx - \omega t)$ 。在 C 区域入口处的水深 $d=50\text{ m}$,相对波高 $H/d=0.22$, Ursell 数 $(\lambda/d)^3 H/\lambda=7.39$,相对水深 $d/\lambda=0.17$,由参考文献[2]可知该位置水波参数满足有限振幅波-Stokes 理论。因此在计算时,入射波按照一阶 Stokes 波的理论解给定。计算过程中在计算域内特定位置处设置浪高仪记录波高实时变化情况,用于分析波浪特性。

针对近岸 C 区域,采用 OpenFOAM 的前处理工具 *blockMesh* 进行计算网格划分,使用 *snappyHexMesh* 工具对自由面附近区域进行局部网格细化,生成质量较高的网格以保证对自由面的捕捉,计算网格如图 2 所示。由于 C 区域尺度非常大,为提高计算效率,避免长时间计算造成数值耗散的累积,本研究将从水深 50 m 到 20 m 的斜坡长度缩短到 2000 m,相应的坡度由 0.0015 变为 0.015。参考文献[4]在讨论水深变浅过程对长周期重力波影响的时候,通过实验证明了海底坡度对波面高度分布的偏度以及峰度影响不大。计算模型中的海底坡度很小,并不是影响波浪特性变化的主要因素,因此认为改变海底坡度对计算结果影响不大。

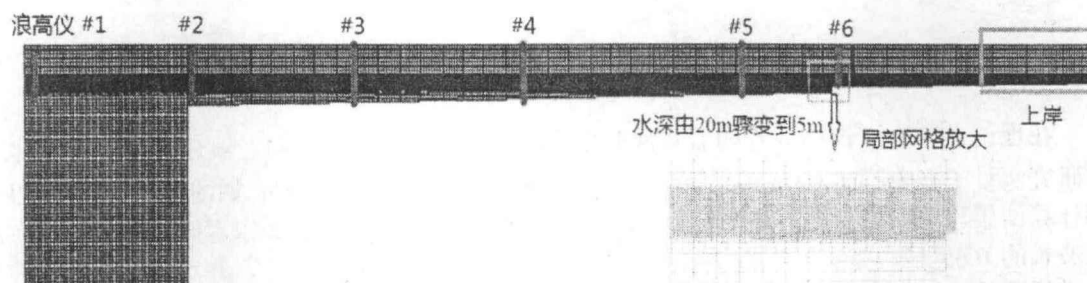


图 2 数值计算网格

4 计算结果分析

4.1 数值造波的验证

为了验证造波方法的可靠性,将在 C 区域的入口处设置的浪高仪测得的波面历时曲与 Stokes 波理论值进行比较。如图 3 所示,数值结果与理论值吻合的较好,说明本研究采用的造波方法是可靠的,且具有较好的精度。

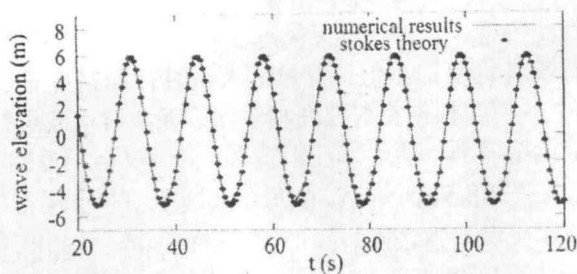


图3 波高时历曲线数值结果与 Stokes 波理论值对比

4.2 波浪浅化效应

波浪浅化效应的存在是近岸海浪的显著特征，所谓浅化效应就是波浪从深水传播至浅水时，随着水深的变浅而出现波相速度降低、波长缩短、波高增大、波形呈现非对称性，并且其非线性增强，呈现尖峰坦谷的一种现象。图 4 为计算得到的 $t=300$ ，为了突出波高变化，图形在波高方向放大了 10 倍。从图中可以明显看出水深变浅对波浪的影响，波长变短，波峰变尖，波谷变坦。

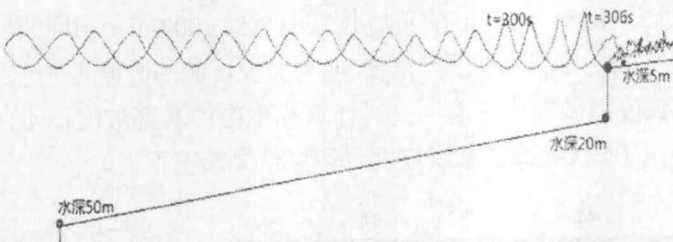


图4 数值计算 $t=300$ s 和 $t=306$ s 波形

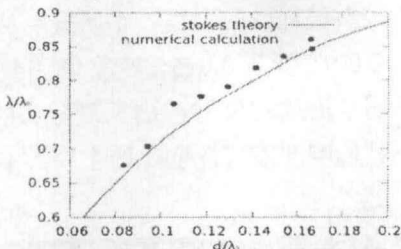


图5 波长的计算结果与理论值

在理论上 Stokes 波的波长随着水深的变化满足 $\lambda/\lambda_0 = \text{th}(2\pi d/\lambda)$ ，其中 λ_0 为深水波长。本研究测量了多个不同水深位置处的波长，并与理论曲线进行了比较。如图 5 所示，可以看到计算结果与理论值吻合的较好。当南海一年一遇深水波传播至 20 m 水深时，其波长只有深水波长的 0.65 倍，在实际工程中就可以根据海浪波长选择结构物尺寸，并对结构物所受波浪力进行预估。

表 1 波形特征参数随水深变化情况

浪高仪	水深 d/m	d/λ_0	均峰值/m	均谷值/m	峰/谷	波高 H/m	H/H_0	τ_p (s)	τ_p/T
#1	500	1.733	5.85	-5.25	1.114	11.10	1.00	0.00	0.000
#2	50	0.173	5.75	-4.40	1.307	10.40	0.94	0.12	0.009
#3	41	0.142	5.95	-4.05	1.469	10.00	0.90	0.15	0.011
#4	32	0.111	6.45	-4.30	1.477	10.65	0.96	0.86	0.063
#5	23	0.080	7.10	-4.70	1.511	11.80	1.06	1.67	0.123
#6	20	0.069	8.60	-4.90	1.755	13.50	1.22	2.22	0.163

表 1 给出了不同水深位置处的波峰和波谷值，可以看到波浪从深水到浅水的传播过程中，其非线性逐渐增强，波高呈现出先略微减小再逐渐增加，直至波浪破碎。Iwagaki^[3]的实验结果以及双曲波浪理论给出波陡为 0.0355 的深水波传播至 $d/\lambda_0 = 0.151$ 处时，其波高具有最小值，大约为深水波波高的 0.91 倍。本研究计算的深水波波陡为 0.0385，当传播到 $d/\lambda_0 = 0.142$ 处时，其波高达到最小值，为深水处波高的 0.9 倍，与参考文献的结果较为吻合，说明计算结果较为可靠。故针对南海海域一年一遇波浪而言，可以计算出在水深 41 m 处海域，波高达到

最小, 约为 10 m。就波高值而言, 此处更适合结构物的建造。当然, 结构物的设计和建造位置的选取还需综合考虑其他多种因素的影响。

4.3 波浪破碎

数值模拟结果显示, 在水深 20 m 骤变为 5 m 的位置波浪发生了破碎, 此时的破碎波高为 13.50 m。Iversen^[5]的实验结果以及文献[6-7]给出的理论结果表明, 破碎波高与破碎水深比值约为 0.87, 而本研究中这一比值为 0.675。分析原因, 主要是由于水深的骤变对波浪的非对称性产生了非常大的影响, 直接导致了波浪破碎的提前到来。图 6 给出了波浪从开始破碎到完全破碎过程的流场速度变化情况。图 6(b)可以认为是波浪破碎的开始, 此时满足水质点水平速度与浅水波速 $\sqrt{gd} = 14.14$ 相等的条件。图 6(c)中波形开始发生翻卷, 随后逐渐开始破碎, 流场变得非常紊乱, 并出现大量漩涡, 同时还伴随着波浪拍打的现象。可想而知, 若此处有结构物, 将会受到剧烈变化的波浪力的拍击作用。图 6(h)反映了在波浪完全破碎之后, 出现了水底回流现象, 且回流流速非常大, 这一现象对泥沙的输运、污染物的扩散、结构物桩柱的受力都有重大的影响, 需要给予一定的重视。图 7 为波浪破碎过程中的波面演化情况, 更直接的反映出了波面破碎的过程。

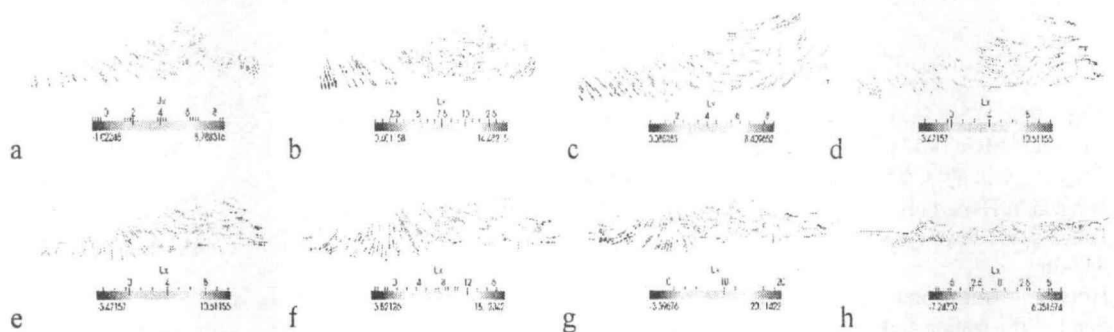


图 6 波浪破碎过程流场

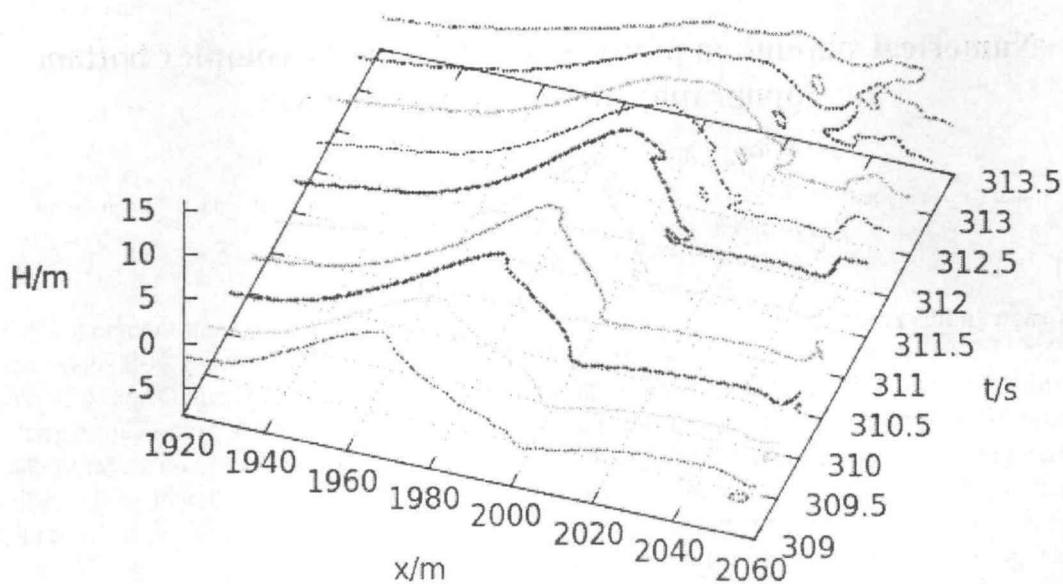


图 7 波浪破碎过程不同时刻波形

5 结论

本研究利用自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器对南海一年一遇波浪从深海到近岸浅水区的传播过程进行了模拟,对波浪传播过程中的波长、波高、非线性、波形非对称性随水深的变化情况以及波浪破碎的流场进行了分析,并与实验值和理论值进行了比较,结果表明了 naoe-FOAM-SJTU 在数值模拟求解非线性波浪演化问题上的能力。数值结果同时给出了对岛屿近岸浪高的预报,为港口码头以及其他近岸结构物的设计建造提供可靠的环境信息,为进一步研究结构物的水动力性能提供技术支持。

致谢

本工作得到国家自然科学基金项目 (Grant No. 11072154), 海洋工程国家重点实验室自主研究课题基金 (Grant No. GKZD010059), 上海东方学者人才计划基金 (No. 2008007), 以及国家 973 项目子课题 (2013CB036103) 的资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Shen Z. R., Cao H. J., Ye H. X., Wan D. C. Manual of CFD solver for Ship and Ocean Engineering Flows: naoe-FOAM-SJTU[R]. Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- 2 陶建华. 水波的数值模拟[M]. 天津大学出版社, 2005, 10: 269.
- 3 Iwagaki Y. Hyperbolic Wave and Their Shoaling [J]. Coastal Eng., 1968, 21: 124-144.
- 4 Iwagaki Y. Shoaling of Finite Amplitude Long Wave on a Beach of Constant Slope[J]. Coastal Eng, 1972, 18: 347-364.
- 5 Iversen H. W. Laboratory study of breakers[J]. Gravity Waves, Nat. Bur. Stand, 1952, 24: 9-32.
- 6 Sun F. Propagation and Deformation of Nonlinear Wave on an Uniform Slope (II) [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1986, 7: 1-7.
- 7 Wen S. C. Propagation and Deformation of Nonlinear Wave on an Uniform Slope (II) [J]. Journal of Natural Science in Colleges and Universities, 16: 214-229.

Numerical simulation of wave evolution on the complex bottom topography of the South China Sea

CAO Hong-jian, ZHANG Chen-liang, WAN De-cheng*

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

*Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn)

Abstract: In this paper the simulation of wave evolution on the complex bottom topography of the South China Sea is performed. The computations are performed by our unsteady N-S solver naoe-FOAM-SJTU, which is developed based on the open source CFD toolbox OpenFOAM. It is presented the whole process of nonlinear wave evolution during its transmission from deep to shallow water, including the wave shoaling and wave breaking phenomena. The influence on the wave characteristic by the change of water depth is analyzed. The prediction of wave height in the shallow water is achieved to provide useful environmental information for the design and construction of the coastal ports and sediment transport problems.

Key words: South China Sea, wave evolution, wave shoaling, wave breaking, naoe-FOAM-SJTU