

孤立波与固定海洋结构物相互作用数值模拟¹⁾

曹洪建, 刘远传, 万德成²⁾

(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)

摘要: 基于开源程序库 OpenFOAM 数值求解 N-S 方程, 采用 VOF 方法捕捉自由面, 开发了粘性数值水池。并采用模拟推板运动的方式生成孤立波, 与孤立波理论波形比较验证了本文方法的有效性。基于粘性数值水池, 实现了孤立波与大尺寸直立圆柱结构的相互作用的数值模拟, 重点研究了孤立波对直立圆柱的冲击现象和爬高等现象。通过数值模拟得到了一系列不同波高的孤立波在圆柱前的最大爬高值, 并计算分析了结构物受到的波浪载荷, 为海洋结构物的设计提供了很好的支持。

关键词: 孤立波; 圆柱; 爬高; 波浪载荷; OpenFOAM

引言

近年来人类开采海洋油气资源的范围逐渐由近海扩大到深海, 使得研究恶劣海况下海洋工程结构物的安全性、稳定性变得越发重要。当海洋结构物遭遇深海恶劣海浪的冲击作用时, 巨大的冲击力将严重影响海洋平台的安全性, 然而如何确定极限海况下的波浪对结构物的载荷是海洋结构物设计和应用的关键。目前对于非线性很强的极限波浪与大型结构物的相互作用, 采用传统的势流理论难以得到准确的结果。因此, 通常都会进行水池模型实验获取需要的数据。随着 CFD 技术的不断发展, 应用数值模拟方法构建粘性数值波浪水池研究波浪与海洋结构物相互作用问题将是有效的手段。国内外众多学者对基于实验造波技术以及数值模拟方法对数值造波理论进行了大量研究^{[1]-[6]}。

近几年, 由地震引起的海啸给人类造成了巨大的灾害, 对于近海岸的各种海洋平台结构物也造成了很大的破坏。而孤立波是一种典型的强非线性长波, 可以用来描述海啸和风暴引起的巨浪的某些特征, 在以往的研究中常以孤立波来表示海啸来研究极限波浪与海洋结构物的相互作用。国内有许多学者对孤立波与结构物的相互作用问题进行了研究, 万德成、缪国平^[7]应用 VOF 方法研究了表面孤立波翻越直立方柱流动的全过程; 刘长根、陶建华^[8]用基于时变雷诺方程和方程为基础的数学模型模拟了表面孤立波与近海不同淹没深度水平圆柱的相互作用过程; 谢伟松、陶建华^[9]用 Level Set 算法模拟表面孤立波与前台阶的相互作用等等。

为了研究强非线性孤立波与大尺寸海洋结构物的相互作用, 为海洋工程结构物的设计提供支持, 本文基于开源程序库 OpenFOAM 数值求解 Navier-Stokes 方程, 采用 VOF 方法捕捉自由面, 开发三维粘性数值波浪水池。在此基础上, 以具有大直径圆柱结构的 Spar 平台为研究对象, 数值模拟了孤立波的生成以及传

¹⁾ 本文工作得到国家自然科学基金项目(Grant No. 11072154, 50739004), 海洋工程国家重点实验室研究基金 (Grant No. GKZD010053-11)和上海东方学者人才计划基金(Grant No. 2008007)资助。

²⁾ E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

播过程中遇到 Spar 平台立柱时波面的变化过程，重点分析了孤立波对 Spar 平台立柱的冲击和爬高现象。

1 数学模型

1.1 控制方程

本文基于 OpenFOAM 开源程序库中求解两相流问题的求解器，将空气和水作为不可压缩粘性流体处理，采用有限体积法(FVM)求解其控制方程：

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

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_s \quad (2)$$

其中： ρ ， $\mathbf{u}$ ， p 分别为流体密度、速度矢量和压力； μ 为流体动力粘性系数； $\mathbf{g}$ 为重力加速度； $\mathbf{F}_s = \sigma \kappa(x) \mathbf{n}$ ，为自由面引起的表面张力，这一项只在自由面上产生； $\kappa(x) = \nabla \cdot \mathbf{n}$ ， $\mathbf{n}$ 分别为自由面的曲率和单位法向量； σ 为常数。

确定自由面的方法主要有 MAC (marker-and-cell)^[10]、VOF (Volume of fluid)^[11]、Level-Set 方法^[12] 和 CIP (Constrained Interpolation Profile)^[13] 等。本文采用 VOF 法捕捉空气和水交接的自由表面，通过求解体积分数 γ 的控制方程

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

得到计算网格单元内的流体所占的份额，从而确定自由面的位置。

1.2 孤立波的数值模拟

数值造波是研究孤立波与海洋结构物相互作用的关键，目前基于粘性流体理论造波的方法大致可分为三类：给定入射边界处的波高和流体质点速度造波；仿物理实验造波板（推板或摇板）运动造波；在控制方程中加源项造波。本文采用动网格(moving-mesh)技术仿推板运动的方法生成孤立波。

根据势流理论 Boussinesq 方程的单向行波解，孤立波的自由波面为：

$$\eta = H \operatorname{sech}^2(k(x - ct)) \quad (4)$$

其中： H 为波高， $k = \sqrt{\frac{3H}{4d^3}}$ ， d 为水深， x 为波峰处对应坐标， $c = \sqrt{g(H + d)}$ 为孤立波的波速， t 为时间。

采用仿推板运动数值模拟孤立波，需要确定每一时刻推板的位置 $X(t)$ 。Goring & Raichlen^[3] 在 1980 年发表的文章中对此给出了推导过程。首先，造波推板的速度可以表示为：

$$U(t) = \frac{d X(t)}{dt} = \frac{c\eta}{d + \eta} \quad (5)$$

将式(4)带入式(5)，可得

$$\frac{d X(t)}{dt} = \frac{cH \sec h^2(k(X - ct))}{d + H \sec h^2(k(X - ct))} \quad (6)$$

式(6)为标准的微分方程，有精确解为：

$$X(t) = \frac{H}{kd} \tanh(k(ct - X)) \quad (7)$$

推板的冲程可以通过(7)得到：

$$S = X(\infty) - X(-\infty) = \sqrt{\frac{16Hd}{3}} \quad (8)$$

孤立波的理论周期是无限长的，但在实际模拟过程中是无法实现的。在实际模拟过程中需要作截断处理，一般取 $\tanh(k(ct - X)) \approx \pm 0.999$ 代替 $\tanh(k(ct - X)) = \pm 1$ 。因此实际模拟过程的造波周期为：

$$T = \frac{2}{kc} (\tan^{-1}(0.999) + \frac{H}{d}) \approx \frac{2}{kc} (3.80 + \frac{H}{d}) \quad (9)$$

数值模拟过程中，先由式(7)求出推板每一时刻的位置，然后由式(5)确定推板边界的运动速度，通过控制推板边界每一时刻的速度确定推板边界的运动从而实现造波。

2 计算模型

在设计海洋平台的过程中，要求保证海洋平台在极限波浪情况下的安全性和稳定性。海洋平台甲板下方和吃水线之间要预留足够的气隙(air-gap)，以保证甲板不会在波浪经过受到冲击而遭到破坏。本文通过对不同波高的孤立波经过海洋平台时波浪爬高现象的数值模拟，研究波浪爬高值与波浪参数的关系，为海洋平台的设计提供支持。本文主要是研究孤立波对 Spar 平台支柱的冲击和波浪爬高现象，计算模型简化为一个高 75m、直径 $D=30m$ 的直立圆柱。

数值波浪水池相对实验室波浪水槽不受物理模型尺度的限制，可以模拟实际尺度下的波浪与结构物的相互作用，而且成本低。由于 Spar 平台立柱尺度较大，且孤立波的波长无限大，因此水池的长度要足够大才能保证模拟出孤立波从生成到通过基本通过 Spar 平台立柱的全过程。但水池太长将带来计算量的增加和更多地时间消耗，所以综合考虑计算量和计算时间之后，本文选定数值波浪水池的尺度为：水池长 1500m，宽 300m，水深 $d=50m$ ，水池上方空气部分高 50m。

计算模型如图 1 所示，坐标原点放在水池左端，水池左端是造波推板边界，右侧为直立壁面。水池底部为可滑移壁面条件，上方为压力入口边界条件，水池两侧为对称边界条件。数值模拟孤立波与大直径直立圆柱相互作用，将直立圆柱固定置于水池中部，圆柱吃水为 25m，圆柱的顶端到自由水平面的距离为 50m。初始时刻，圆柱中心距离造波推板 750m，距离水池两侧均为 150m。计算过程中在水池中设置波高探测点探测自由面高度的变化，图 2 中所示 $p1$ ， $p2$ ， $p3$ 为三个探测点，对应的坐标为 $p1(300, 0)$ ， $p2(500, 0)$ ， $p3(750, 100)$ 。

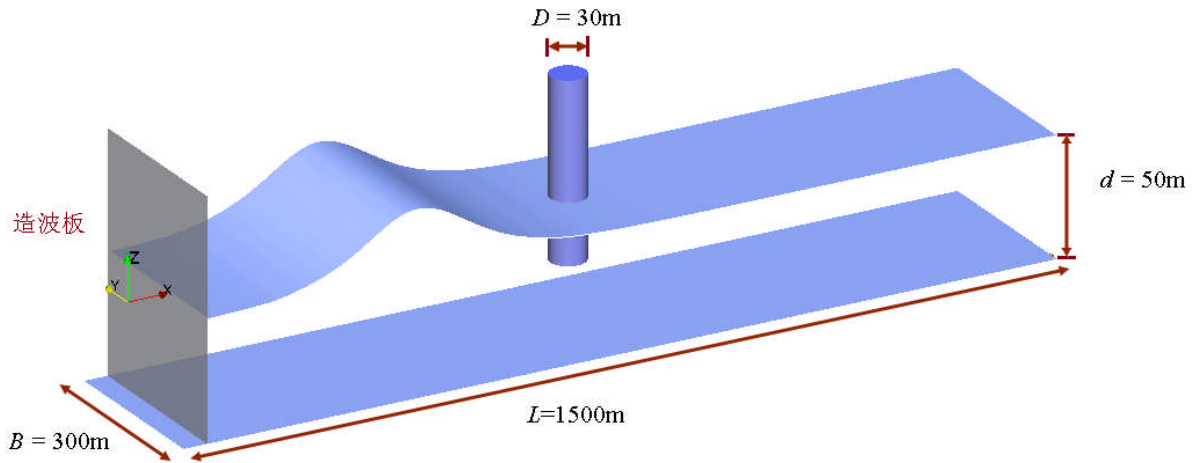


图 1 三维计算模型示意图

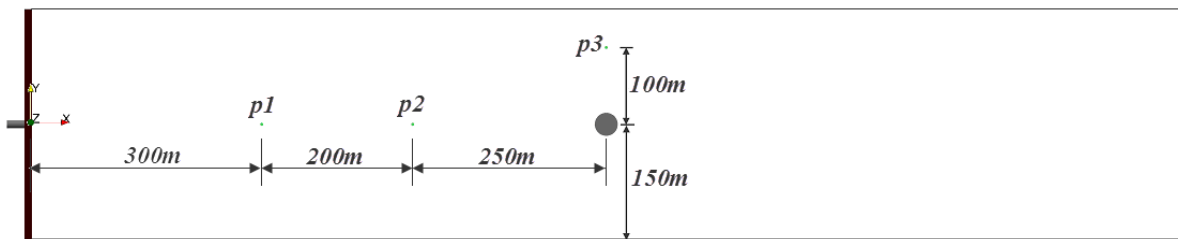


图 2 波高探测点的布置

计算网格如图 3 所示，所有网格均为六面体网格。计算网格在平台以及自由面附近逐渐加密，圆柱平台表面设置为不可滑移壁面条件。网格在数值水池的右端部分，沿 x 轴方向的单位网格尺度逐渐加大，网格变得稀疏，目的是利用数值粘性的耗散起到一定的消波作用。

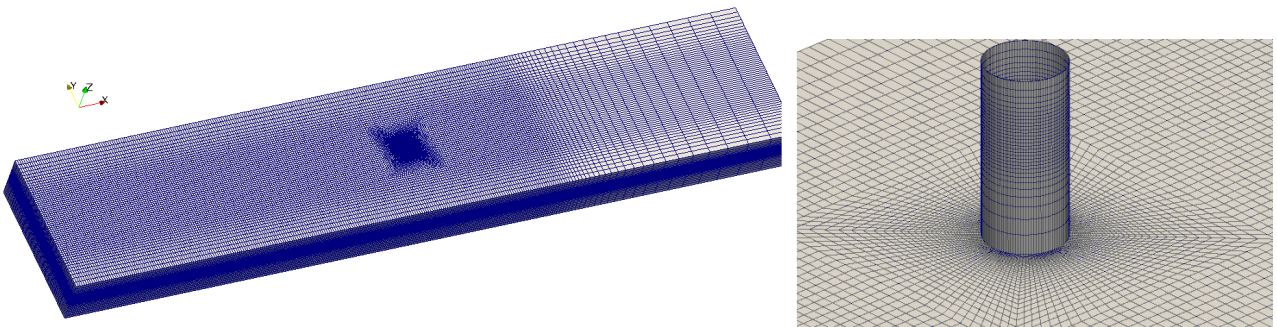


图 3 计算模型网格结构

3 数值结果与讨论

3.1 孤立波的数值模拟结果

孤立波是单向行进波，在行进过程中其波形保持稳定不变。根据势流理论，孤立波的波动特性主要取决于波高水深之比 H/d ，孤立波在未达到平台之前会保持稳定的波形。

首先，数值水池中没有圆柱结构物时可以将模型简化为二维情况，图 4 给出了二维情况下波高 $H=10m$ 的孤立波在距造波推板 300m, 500m 和 750m 处的自由面随的历时曲线，可以看出孤立波沿水池方向传播

过程中波形保持的非常稳定。在有圆柱结构物存在的三维情况下，我们在探测点 $p1$ 、 $p2$ 、 $p3$ 处探测得到的孤立波波高历时曲线如图 5 所示，孤立波的波形同样保持得非常稳定。

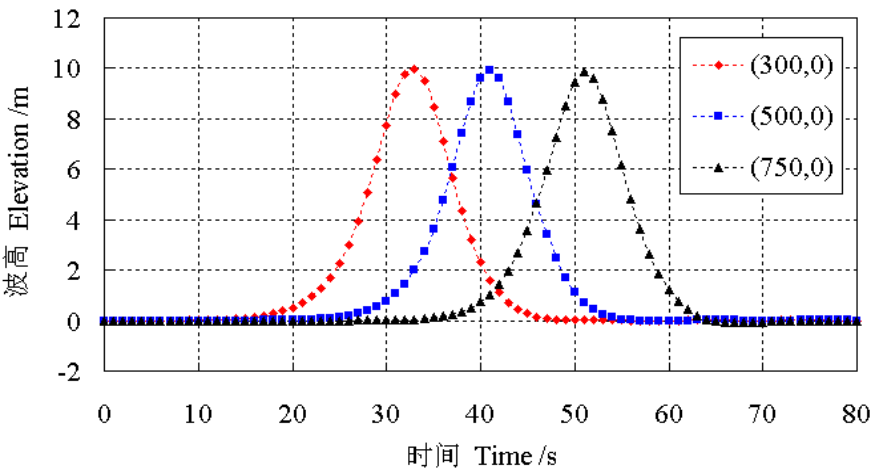


图 4 二维孤立波在不同位置探测点的自由面高度历时曲线

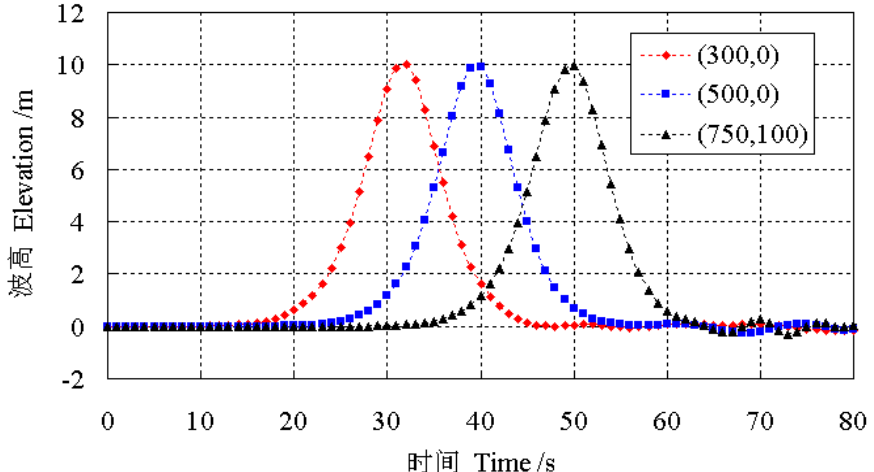


图 5 三维孤立波在 $p1$ 、 $p2$ 、 $p3$ 处的自由面高度历时曲线

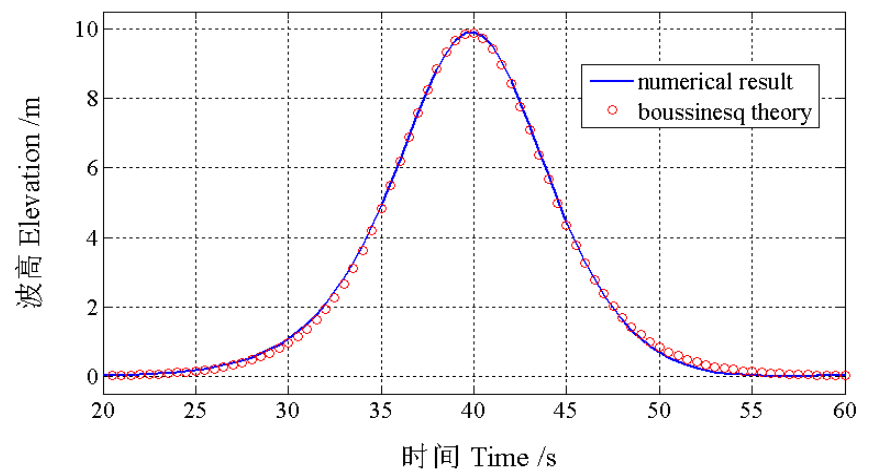


图 6 探测点 $p2$ (500,0) 处波高的历时曲线数值结果与理论解比较

图 6 将探测点 $p2$ 处得到的波形结果与根据势流理论结果进行了比较，可以看到两者比较吻合的很好，

进一步说明了所采用的生成孤立波的方法是行之有效的，且具有较好的精度。

3.2 孤立波与直立圆柱相互作用

本文数值模拟了 $H=10m$ 、 $15m$ 、 $20m$ 、 $25m$ 四种不同波高的孤立波对直立圆柱的冲击以及在圆柱前的爬高现象，计算分析了直立圆柱的受力情况。

3.2.1 计算网格的收敛性验证

数值模拟过程中，对不同波高的情况都采用了三套不同网格进行计算模拟，通过比较波浪爬高值以及圆柱受到了水平波浪力 F_x 来检验计算网格的收敛性。限于篇幅，这里仅给出使用 3 套不同网格对 $H=20m$ 情况下对网格收敛性验证情况，表 1 所示为 3 套网络的详细信息。

表 1 用于网格收敛性验证的网格信息

网格名称	网格数 / 万	圆柱圆周上网格数	$\Delta z_{min} / H$	$\Delta x_{max} / \Delta z_{min}$
Mesh 1	22.3	64	0.075	5
Mesh 2	42.0	80	0.06	5
Mesh 3	73.0	96	0.05	5

计算过程中采用自适应变时间步长，设定初始时间步长 $\Delta t = 0.005s$ ，最大库朗数 $Co = 0.5$ 。在保证 Co 小于 0.5 的情况下，计算过程中自动调节 Δt 。图 7 所示为表 1 所示的三套网格计算得到的结果，可以看到计算网格数量由 22.3 万变化到 73 万，得到的结果最大水平波浪力 $F_{x_{max}}$ 和最大自由面高度值 H_{max} 基本保持稳定不变，说明本文方法对网格具有较好的收敛性。

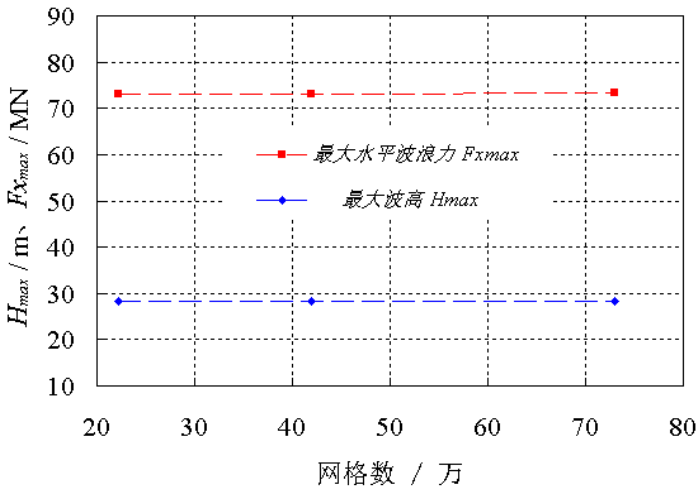


图 7 计算网格收敛性验证（孤立波波高 $H=25m$ ）

3.2.2 波浪爬高

为便于描述自由面高度在圆柱表面的分布情况，按照图 8 所示定义 θ 角圆柱轴心与圆周上点连线与坐标轴 X 轴的夹角，逆时针为正， θ 角的范围是 $(0, 360)$ 度。当孤立波波峰经过大直径直立圆柱时，由于

圆柱的阻碍使水体在圆柱前堆积从而使自由面抬高，即波浪爬高；在海洋工程设计中为避免波浪爬高现象对甲板底部产生冲击破坏，需要在甲板底部和水平面直接预留足够的气隙(air-gap)。

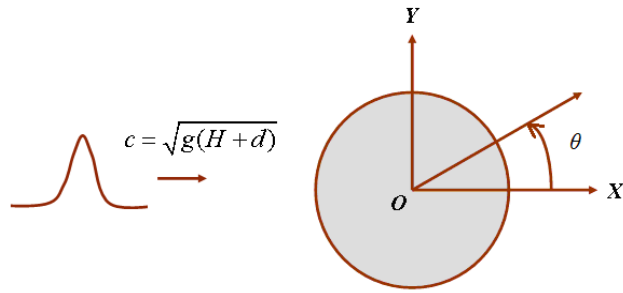


图 8 圆柱表面上的点所对应 θ 角的定义

图 9 所示为发生最大波浪爬高时的自由面高度云图。图 10 给出了发生最大波浪爬高情况时的圆柱表面的自由面高度情况。可以看到，最大爬高高度都发生在 $\theta=180^\circ$ ，即圆柱的迎浪面。由于圆柱的结构对称，所以波高高度的分布是关于 $\theta=180^\circ$ 左右对称的。随着孤立波高的增大，最大爬高值也按照一定的规律增大。当 $H=10m$ 时，最大爬高值为 11.76m；当 $H=25m$ 时，最大爬高可以达到 40m。

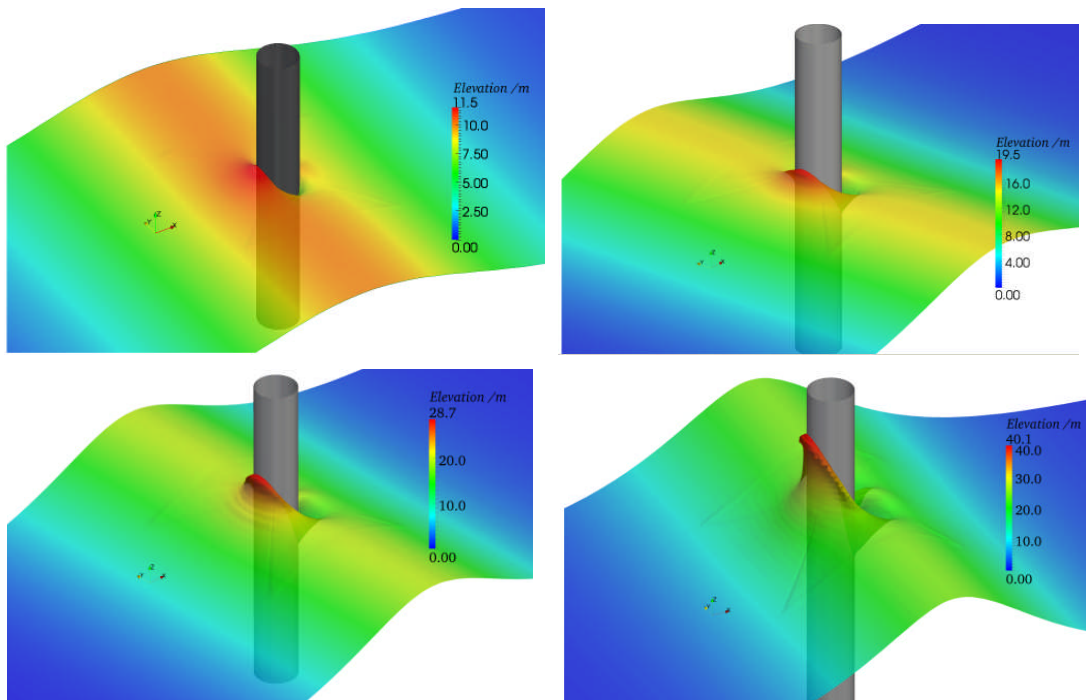


图 9 最大波浪爬高时的自由面高度云图

由图 10 可以看到自由面高度值沿圆柱表面分布有两个最小值的位置。当孤立波 $H=10m$ 时，这个位置发生在 $\theta=67.5^\circ$ 和 $\theta=292.5^\circ$ 位置，随着孤立波波高的增大，其位置逐渐向圆柱后侧移动，当 $H=25m$ 时，这个最小值点移动到 $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=315^\circ$ 位置。

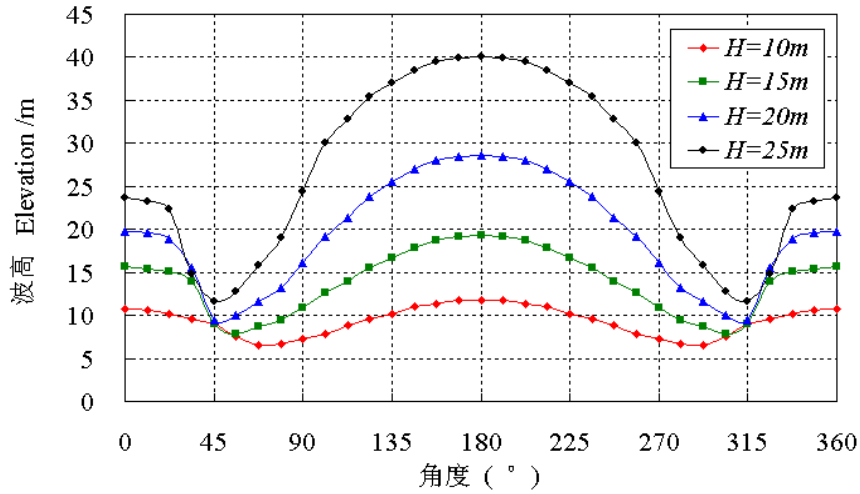


图 10 圆柱表面自由面高度分布

图 11 所示为发生最大爬高位置 $\theta=180^\circ$ 处自由面高度变化的历时曲线。随着波高的增大，孤立波的波速也增大，从而使波峰到达圆柱并发生最大爬高的时间提前。

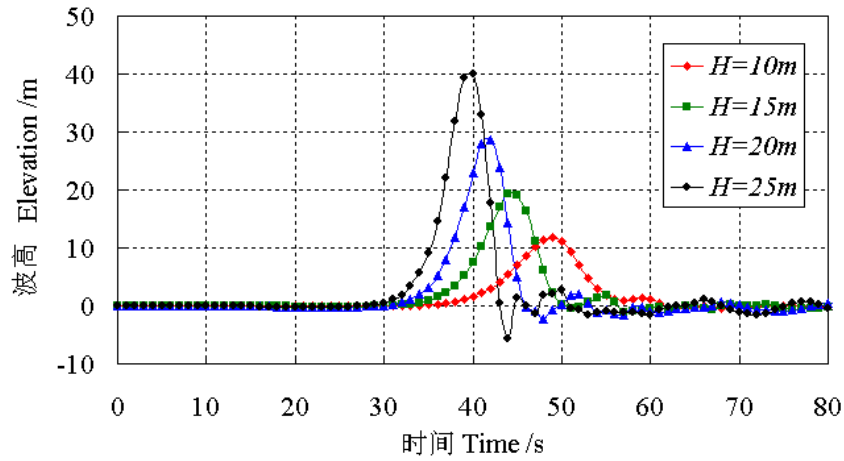


图 11 最大爬高位置点的自由面高度历时曲线

3.2.3 波浪力

当孤立波波峰经过直立圆柱位置时，巨大的水体产生的压力差对圆柱产生巨大的作用力，其在水平 X 方向和垂直 Z 方向的分量很大。如果圆柱没有被固定，将产生较大的水平漂移和垂向升沉运动，而在侧向力 F_y 的作用下，圆柱会产生侧向振荡。

图 12 为圆柱受到的不同波高的孤立波的波浪力的历时曲线，可以看到当波峰到达圆柱位置时，圆柱受到最大的水平波浪力 F_x 在 20MN~110MN 之间，垂直方向的波浪力 F_z 在 50MN~110MN 之间，而 F_y 相比 F_x 和 F_z 小很多，其大小仅在 0.005~0.06MN 之间。同时，不难发现 $F_{x_{max}}$ 发生的时间要比 $F_{z_{max}}$ 发生的时间早，而 $F_{z_{max}}$ 发生的时间与最大波浪爬高值 H_{max} 出现的时间大致相同。

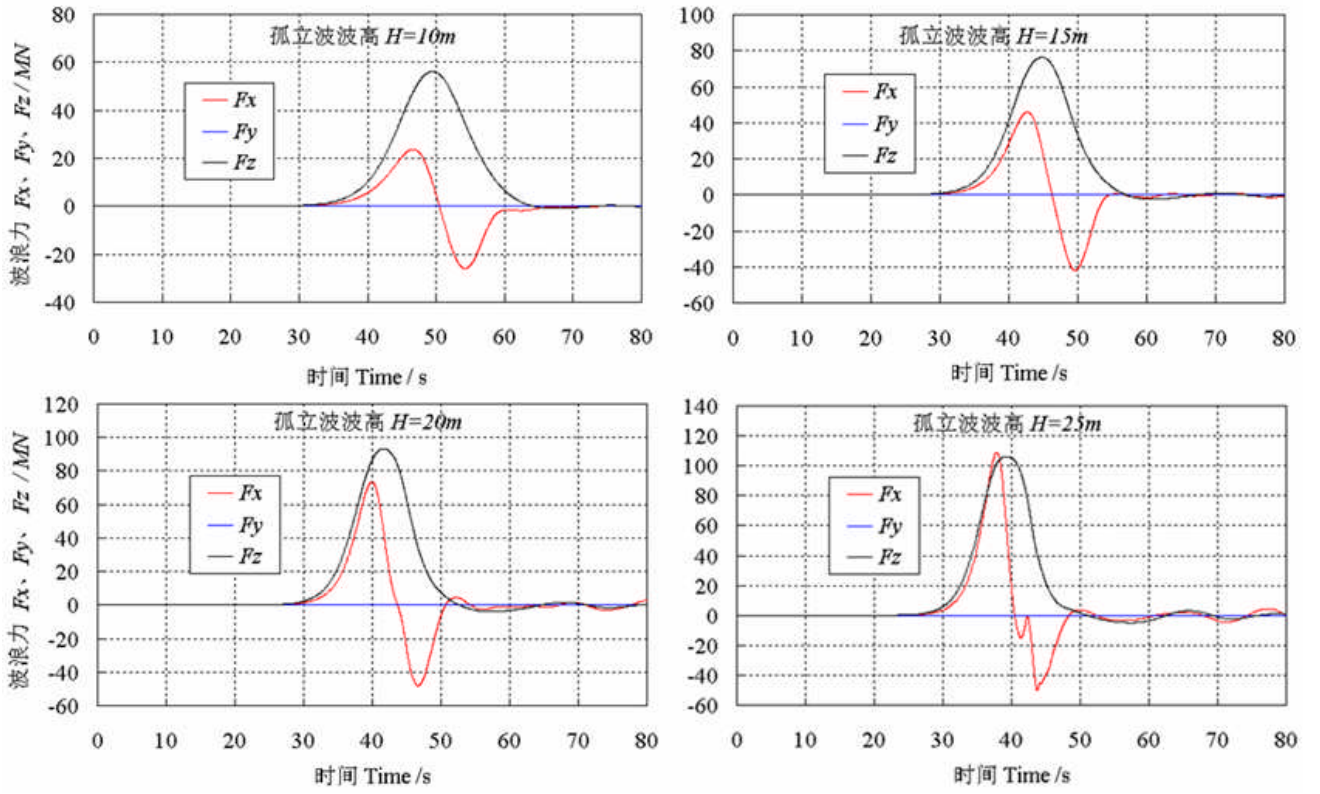


图 12 圆柱受到的波浪力的历时曲线

图 13 给出了圆柱前最大波浪爬高 H_{max} 、圆柱受到的最大水平波浪力 $F_{x_{max}}$ 和垂向波浪力 $F_{z_{max}}$ 随孤立波波高变化的趋势。其中，最大爬高值 H_{max} 和垂向波浪力的 $F_{z_{max}}$ 大致呈线性增大趋势。在波高 $H < 25m$ 的情况下，圆柱受到的水平波浪力 $F_{x_{max}}$ 都小于垂向波浪力 $F_{z_{max}}$ 。而当 $H > 25m$ 时，圆柱受到的水平波浪力 $F_{x_{max}}$ 已经大于垂向波浪力 $F_{z_{max}}$ ，说明 $F_{x_{max}}$ 随波高 H 增大的更快。其原因主要是由于垂向波浪力主要是由于孤立波巨大水体产生的压力差形成的。而圆柱受到的水平波浪力 F_x 的增大原因除了圆柱前后形成的更大压力差的贡献，还因为随孤立波的波高增大，孤立波波面的水质点的运动速度也在增大，对圆柱的产生了更大水平冲击力，因此圆柱受到的水平波浪力增大的更快。

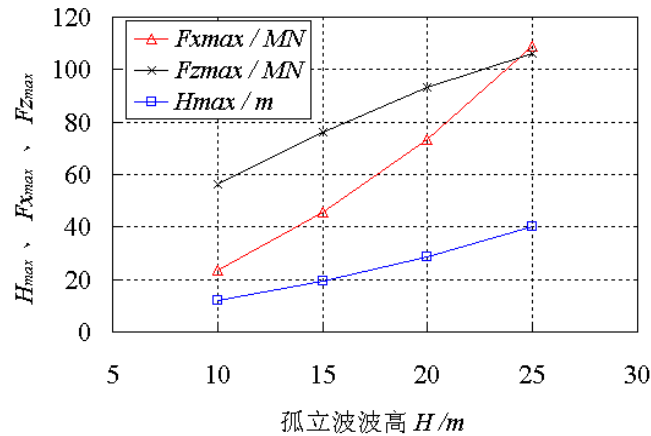


图 13 H_{max} 、 $F_{x_{max}}$ 和 $F_{z_{max}}$ 随孤立波波高 H 的变化情况

4 结论

本文基于开源程序库 OpenFOAM, 开发了粘性数值波浪水池, 较精确的模拟了孤立波。通过数值模拟孤立波与大型直立圆柱的相互作用, 计算得到了孤立波在圆柱前的最大爬高和圆柱受到的最大波浪力随孤立波波高变化的趋势。数值模拟结果显示, 孤立波在圆柱前的最大爬高随波高的增大成线性增大趋势, 与以往的研究得到的结论基本一致, 同时也说明采用本文的方法可以较好的模拟波浪与海洋结构物的相互作用, 数值模拟得到的数据和结论可以为 Spar 平台的设计提供参考。本文基于开源代码 OpenFOAM 开发的数值波浪水池具有很好的扩展性, 可以将其推广应用到对各种波浪的模拟和对波浪与自由运动浮体相互作用问题的研究。

参考文献

- 1 Ursell F, Dean RG and Yu YS. Forced small-amplitude water waves: a comparison of theory and experiment. *J. Fluid Mech.*, 1960, 7: 33-52.
- 2 Madsen OS. On the generation of long waves. *J. Geophys. Res.*, 1971, 76(36): 8672-8683.
- 3 Goring DG and Raichlen F. The generation of long waves in the laboratory. *Proc 17th Int Conf. Coastal Eng.*, Sydney, Australia, 1980. ASCE, 763-783.
- 4 Huang CJ, Zhang EC and Lee JF. Numerical simulation of nonlinear viscous wave fields generated by a piston-type wave-maker. *J. Eng. Mech.*, 1998, 124: 1110-1120.
- 5 Kim CH, Clement AH and Tanizawa K. Recent research and development of numerical wave tanks - A review. *Int J. Offshore and Polar Eng.*, 1999, 9(4): 241-256.
- 6 Dong CM and Huang CJ. On a 2-D numerical wave tank in viscous fluid. *Proc 11th Int Conf. Offshore and Polar Eng.* Stavanger, Norway, 2001. ISOPE, 148-155.
- 7 万德成, 缪国平. 数值模拟波浪翻越直立方柱. 水动力学研究与进展, A 辑, 1998, 13 (3): 363-370.
- 8 刘长根, 陶建华. 用 N-S 方程模型模拟孤立波在各种防波堤堤前的爬高. 水动力学研究与进展, A 辑, 2004, 19(4): 484-493.
- 9 谢伟松, 陶建华. 用 Level Set 算法模拟孤立波与前台阶的相互作用. 应用数学和力学, 2000, 21(7): 686-692.
- 10 Harlow FH and Welch JE. Numerical study of large-amplitude free surface motions. *Phys. Fluids*, 1965, 8: 2182-2189.
- 11 Hirt CW and Nichols BD. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.*, 1981, 39: 201-225.
- 12 Osher S and Sethian JA. Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. *J. Comput. Phys.*, 1988, 79: 12-49.
- 13 Hu C and Kashiwagi M. A CIP-based method for numerical simulation of violent free surface flows. *J. Mari. Sci. and Tech.*, 2004, 9: 143-157.

NUMERICAL SIMULATION OF SOLITARY WAVE IMPACT ON FIXED OFFSHORE STRUCTURES

Cao Hongjian, Liu Yuanchuan, Wan Decheng

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

Abstract: A viscous numerical wave tank has been developed based on the open source code OpenFOAM by solving the Navier-Stokes equations and capturing the free surface of water. The solitary wave is generated

through a moving piston-type wave-maker, and the efficiency and accuracy of this method are validated by comparing with the boussinesq theory. Based on the numerical wave tank, the simulations are performed to study the interaction of the solitary wave and a fixed vertical circular cylinder with large diameter. The phenomenon of wave impact and wave run-up on the vertical cylinder is investigated specially, and the wave impact loads on the cylinder is calculated. With different wave heights of incident solitary wave, the maximum values of wave impact loads and wave run-up on circular cylinder are obtained, which can provide the design of offshore structures with some important data and information.

Key words: Solitary wave; cylinder; run-up; wave loads; OpenFOAM.