

DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2013.04.006

三维溃坝波绕方柱剧烈流动的数值模拟*

曹洪建¹, 万德成¹, 杨驰^{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,

Email: hongjianc@163.com;

2. Center for Computational Fluid Dynamics, George Mason University, Fairfax, Virginia, USA)

摘要: 该文采用自主开发的非定常黏性流动问题求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对三维溃坝波和直立方柱相互作用问题进行数值模拟。求解器 naoe-FOAM-SJTU 是基于开源代码 OpenFOAM 的数据结构、工具箱和基本流场求解器, 专门面向研究船舶与海洋工程水动力学问题而开发的数值计算程序, 它可以模拟三维波与物体相互作用等复杂问题, 能够较精确的模拟波浪破碎、翻卷等复杂自由面演化过程。计算结果给出了三维溃坝波的演化过程, 包括溃坝波和直立方柱相互作用过程中的波面爬高、破碎及翻卷现象, 给出了方柱附近的涡流场; 并分析了流体黏性效应的影响, 得到了直立方柱受溃坝波拍击作用的水动力时间演化过程图, 计算结果与实验数据吻合较好。计算结果表明, 采用 naoe-FOAM-SJTU 求解器可以有效地模拟有复杂波面演化的剧烈流动问题, 较准确地预报波浪在结构物上的爬高和拍击力。

关键词: 溃坝波; 剧烈流动; 黏性流动; naoe-FOAM-SJTU 求解器; OpenFOAM

中图分类号: U661.1

文献标识码: A

Numerical simulation of violent flow of 3-D dam-breaking wave around square cylinder

CAO Hong-jian¹, WAN De-cheng¹, YANG Chi^{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. Center for Computational Fluid Dynamics, George Mason University, Fairfax, Virginia, USA)

Abstract: Numerical simulation of 3D dam-breaking wave flows around a square cylinder by our in-house solver naoe-FOAM-SJTU is presented in this paper. The solver naoe-FOAM-SJTU is an unsteady viscous flow code for dealing with hydrodynamic problems in ship and ocean engineering, and developed based on the open source toolbox OpenFOAM. It can be applied to simulate the complex wave-structures interaction and the complex free surface evolution including the wave breaking

* **收稿日期:** 2013-02-20(2013-05-06 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(11072154, 50739004)

作者简介: 曹洪建(1982—), 男, 黑龙江牡丹江人, 博士研究生。

通信作者: 万德成, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: February 20, 2013 (**Revised** May 6, 2013)

Project supported by foundation: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11072154, 50739004)

Biography: CAO Hong-jian (1982—), Male, Ph. D. Candidate.

Corresponding author: WAN De-cheng, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

and turning over phenomena. This paper presents the 3D complex free surface evolution of dam-breaking wave and the phenomena of wave run-up, wave breaking and turning over during the dam-breaking wave interaction with the square cylinder. The vortices field near the cylinder is presented, and the influence of viscous effect is analyzed. The calculated wave impact force on square cylinder shows good agreement with the data from experiment. The numerical results indicate that the naoe-FOAM-SJTU solver can efficiently simulate the complex free-surface evolution, and accurately predict the wave run-up height and impact force on structures.

Key words: dam-breaking wave; violent flow; viscous flow; naoe-FOAM-SJTU solver; OpenFOAM

1 引言

三维溃坝波绕方柱剧烈流动是研究非线性水波与结构物强相互作用的一个典型算例, 它包括了非线性波面演化、波浪在结构物上爬高和拍击以及在结构物作用下自由面剧烈变形甚至破碎等现象, 这些现象与流动非线性和流体黏性特性密切相关。采用传统势流理论很难求解分析这样的复杂剧烈流动问题, 因此采用黏性流体运动模型, 并结合有效的自由面求解方法是很好地求解分析复杂自由面问题的一个有效途径, 可以实现水波与结构物强非线性相互作用过程, 包括波浪破碎和翻卷等剧烈流动现象的模拟研究。随着计算机技术的发展, 采用数值求解 Navier-Stokes 方程和界面跟踪技术, 对非线性波之间及非线性波与物体的相互作用问题进行数值模拟已成为研究黏性流体流动问题的主流方法。在处理带有自由液面的问题时, 需要结合自由面求解方法, VOF 方法^[1]和 Level-Set 方法^[2]是目前最为流行的自由面捕捉方法。万德成^[3]曾采用 VOF 方法有效地模拟了孤立波撞击在后台阶上发生的非线性波面演化过程; Kleefsman 等^[4]采用 VOF 方法对波浪拍击形成的复杂自由面进行数值模拟, 验证了 VOF 方法捕捉自由面的有效性。陶建华等^[5]采用 Level-Set 方法模拟了溃坝波的传播过程, 取得了很好的效果。

溃坝问题是水利工程设计中非常关心的问题, 因此对溃坝问题展开研究具有实际工程意义, 同时溃坝问题也是专家学者们长期关注和研究的重要学术课题。由于其建模容易, 同时有相关的实验数据可以利用, 被许多研究者用于验证数值方法在处理自由面问题的有效性。文献[4]和文献[5]都曾以溃坝问题为例, 验证所提出的数值方法的有效性。Koshizuka 等^[6]为了验证他的粒子法的有效性, 进行了溃坝模型实验, 用摄像机记录了溃坝波的整个发展演化过程。之后的许多研究者都将数值模拟结果和此实验进行对比, 例如: 张雨新等^[7]采用无网格粒子法MPS研究了三维溃坝问题; 张驰等^[8]以溃坝问题为算例对比了两种粒子法SPH和MPS的求解效率; Greaves^[9]应用自适应分层网格求解溃坝问题; Wang等^[10]采用有限元(FEM)结合Level-Set

方法数值模拟了三维溃坝流动等。关于溃坝波和下游固定结构物相互作用的研究, 在文献[7]、文献[9]和文献[10]中也都有结果给出, 并与文献[6]对应的实验进行了比较验证。此外, Wu^[11]采用有限体积法(FVM)结合VOF方法模拟了三维溃坝波绕方柱流动过程中的复杂自由面演化, 分析了剧烈流动过程中湍流效应, 并给出了对应的实验结果来验证方法的有效性。

开源程序库 OpenFOAM 为研究者提供了大量的 CFD 求解器和工具库, 并为 CFD 程序开发提供了良好的平台。越来越多的研究者利用 OpenFOAM 求解复杂流体流动问题, 例如 Yang 等^[12]基于 OpenFOAM 自带的两相流求解器, 较好地数值模拟了一系列强非线性自由面流动问题。本文利用自主开发的三维黏性水动力问题求解器 naoe-FOAM-SJTU 对三维溃坝波和直立方柱的相互作用问题进行数值模拟。求解器 naoe-FOAM-SJTU 是基于源代码 OpenFOAM 的数据结构、工具箱和基本流场求解器, 专门面向研究船舶与海洋工程水动力学问题而开发的数值计算程序^[13]。它开发了完整的数值造波和消波模块, 可以使用多种方法, 如速度入口式、推板造波以及摇板造波法, 来制造出各种常用类型的波浪: 包括规则波和不规则波、线性和高阶 Stokes 波、孤立波和椭圆余弦波以及不同浪向角的波浪等。同时, 还开发集成了船舶与海洋结构物六自由度运动模块, 可以实现各类复杂船型的黏性兴波阻力、计及船舶航行姿态的船舶快速性、船舶在波浪上的波浪增阻和运动响应预报、船舶大幅度运动和甲板上浪、液舱晃荡以及与船舶运动的耦合作用、船-桨-舵相互作用和固定平台或浮式平台的波浪爬高、气隙、上浪、砰击和运动响应等问题的数值模拟, 以及水下潜水器复杂黏性流场模拟和水动力性能计算等方面。利用所开发的造波和消波模块, Cao 等^[14]模拟研究了规则波在圆柱上的爬高问题。此外, Cao 等^[15]对极限波浪和圆柱结构的相互作用进行了模拟研究, 验证了所开发造波和消波模块的可靠性。沈志荣等^[16]将六自由度模块应用于模拟船舶在波浪中的大幅度运动响应和波浪增阻预报, 验证了求解器 naoe-FOAM-SJTU 在处理强非线性波物相互作用问题的能力。此外, 求解器 naoe-FOAM-SJTU 还开发了锚链系统模块, 可以数值求解有锚链约束的海洋浮体结构受到的波浪载荷以

及运动响应问题。由于求解器 naoe-FOAM-SJTU 是针对黏性流体流动问题进行求解的,控制方程为雷诺时均 N-S (RANS) 方程,故可以用于包括实船在内高雷诺数黏性流动的数值模拟,在模拟计算中可以根据流动问题特性选择使用多种湍流模型。对 RANS 方程求解采用有限体积法,对流项采用一阶迎风离散格式,黏性耗散项采用二阶中心离散格式,时间项采用欧拉隐式离散格式,采用 PISO 方法处理速度压力耦合问题^[17]。

为验证求解器 naoe-FOAM-SJTU 数值模拟强非线性剧烈流动问题的有效性,本文对三维溃坝波与方柱相互作用过程中的爬高、波浪破碎以及翻卷现象进行了模拟,计算了方柱受到的波浪拍击力以及黏性剪切力,对流场中的速度变化进行了监测,并与 Wu^[11]提供的实验结果进行比较验证。计算得到了详细的剧烈流动的流场变化过程和方柱受到的波浪拍击力的时间变化历程,分析了流体黏性的影响以及强非线性自由面及涡结构的演化特征。

2 数值方法

2.1 控制方程

本文在数值模拟过程中使用气液两相流模型,假设空气和水均为不可压缩黏性流体,以连续性方程和雷诺时间平均 N-S (RANS) 方程为控制方程,可表示为:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) + f_i^\sigma \quad (2)$$

其中: u_i 表示直角坐标系中 x_i 方向的速度分量 ($i = 1, 2, 3$); p 为流场压力; ρ 为流体密度; f_i^σ 为气液交界面处的表面张力分量; μ 为流体动力黏性系数。

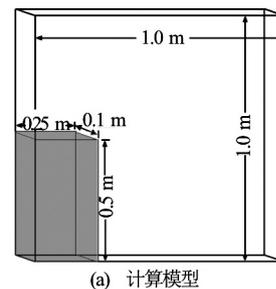
本文采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型来封闭控制 RANS 方程:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

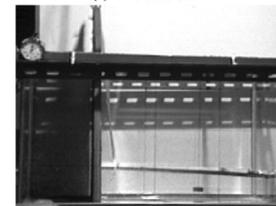
$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k}{\varepsilon}$ 为湍动黏度系数,其中 $C_\mu = 0.09$; $C_{1\varepsilon} = 1.44$; $C_{2\varepsilon} = 1.92$; $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, 分别为 k 和 ε 对应 Prandtl 数; $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项。



(a) 计算模型



(b) 实验模型

图1 溃坝模型

Fig.1. Computational and experimental model of dam-break

2.2 自由面捕捉

Hirt 等^[1]提出的 VOF 方法是目前被广泛使用的自由面捕捉方法,该方法可以严格保证质量守恒,同时具有计算效率高和易于执行的特点。VOF 方法可通过定义体积分数方程来捕捉两项流体的自由面

$$\alpha(x, t) = \begin{cases} \alpha = 0, & \text{空气} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{自由面} \\ \alpha = 1, & \text{水} \end{cases} \quad (5)$$

式中, α 为体积分数,并满足输运方程:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u) = 0 \quad (6)$$

传统的 VOF 方法需要反复的进行自由面重构,降低了计算效率,限制了其在模拟复杂自由面流动中的应用。因此, Ruche^[17]放弃了传统 VOF 方法中的自由面重构过程,选择通过在自由面输运方程中引入一个人工压缩项来实现对自由面的精确捕捉,即有

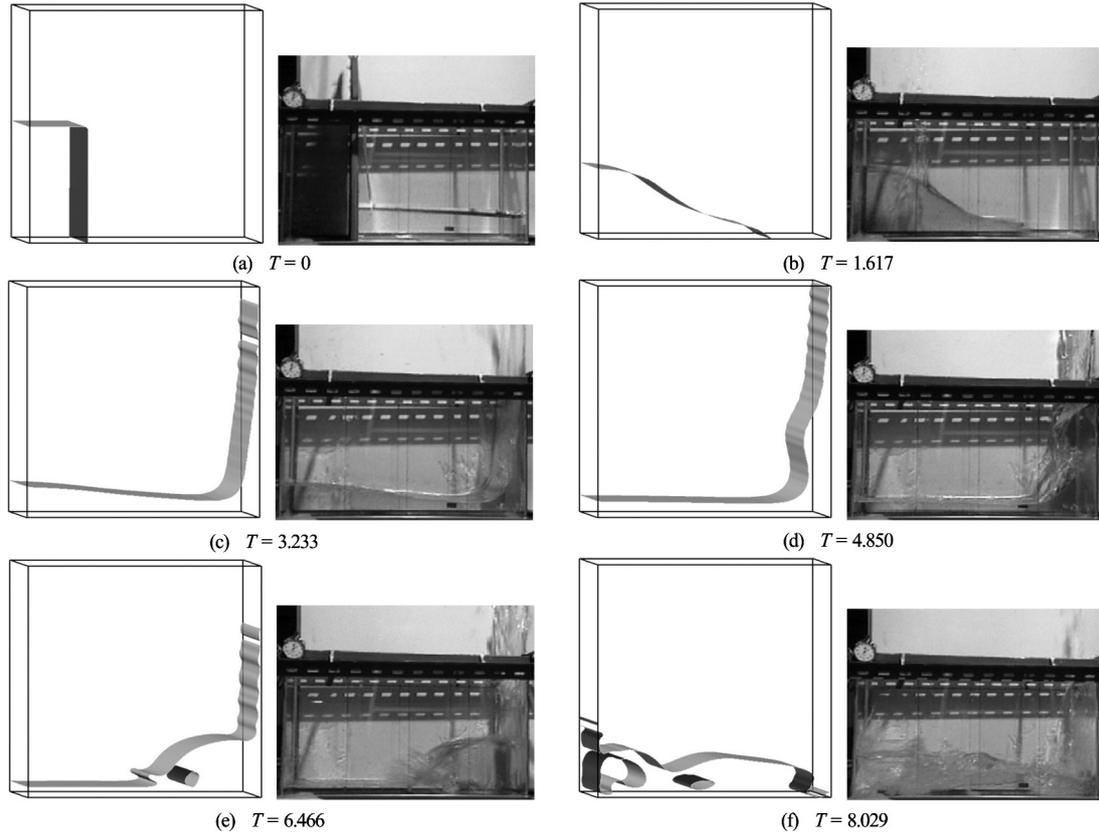


图2 不同时刻的溃坝波自由面
Fig.2. Free surface at different simulation time

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) + \nabla \cdot [\alpha(1-\alpha)\mathbf{u}_r] = 0 \quad (7)$$

式中: \mathbf{u}_r 为适用于压缩自由面及调整自由面尖锐程度的速度场。由于 $\alpha(1-\alpha)$ 的存在, 新增加的人工压缩项只在自由面过渡区域内起作用, 不会影响外部流场。 \mathbf{u}_r 的值可以根据自由面过渡区内的最大流速来确定

$$\mathbf{u}_r = \mathbf{n}_f \cdot \min \left[C_\alpha \frac{|\phi|}{|S_f|}, \max \left(\frac{|\phi|}{|S_f|} \right) \right] \quad (8)$$

式中: S_f 是单元表面面积; ϕ 是单元表面的体积流量; \mathbf{n}_f 表示自由面处的单位法向量; C_α 为控制压缩量的压缩系数, 表示流体的可压缩性, 若 $C_\alpha = 0$, 则对自由面不产生任何影响, 若 $C_\alpha = 1$, 则产生守恒的压缩。由于 C_α 的值越大界面则越容易压缩, 故在本文程序中取 C_α 为 1。

在整个流场中 (包括自由面过渡区), 流体密度和黏性系数可以表示为体积分数 α 的权重函数:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1-\alpha)\rho_2 \quad (9a)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1-\alpha)\mu_2 \quad (9b)$$

其中: 下标 1 表示水, 2 表示空气。

2.3 数值离散格式

求解器 naoe-FOAM-SJTU 采用有限体积法 (FVM) 离散流场控制方程, 使用同位网格存储流场中的速度和压力等变量信息。计算时先将计算域划分为许多网格单元, 将控制方程在每一个网格体单元进行积分, 再根据 Gauss 定理将体积分转化为网格单元的表面上面积分, 然后通过将网格体单元各个面中心的值相加得到这个积分值, 单元表面中心点的值可通过差分所得。

OpenFOAM 程序库提供了很多可供使用的数值离散和差分格式, naoe-FOAM-SJTU 可以直接应用这些数值离散格式对控制方程进行离散。本文使用隐式欧拉格式离散时间项, 使用带线性限制器的 TVD 格式离散 Navier-Stokes 方程中的对流项, 采用一阶迎风格式离散湍流模型控制方程中的对流项; VOF 输运方程中的对流项采用 Van Leer 格式进行离散; 其他各项采用二阶中心差分格式进行离散。本文采用 Issa 提出的 PISO^[18] (Pressure Implicit with Splitting of Operators) 算法对速度和压力进行耦合求解。由于计算中使用了一次预测和两次修正, 使速度场和压力场可以更好地同时满足动量方

程和连续方程，很好地解决了速度和压力耦合求解问题。

3 数值模拟及结果分析

3.1 溃坝模拟

溃坝问题是 CFD 计算模拟中验证自由面模拟方法可靠性的经典算例，本文以此为算例来验证求解器 naoe-FOAM-SJTU 的有效性。所采用的矩形计算域模型大小为 1.0 m(长)×1.0 m(高)×0.1 m(宽)，初始水柱的几何尺寸为 0.25 m(长)×0.5 m(高)×0.1 m(宽)的方柱，如图 1 (a) 所示。图 1 (b) 所示为 Koshizukat 等^[6]的溃坝实验模型。由图中可看出：初始时水柱被挡板挡住，处于静平衡状态；在 $t=0$ 时，右侧挡板被迅速抽出，水柱在重力的作用下开始坍塌形成溃坝波。

计算域采用 $128 \times 128 \times 1$ 的网格进行划分，在宽度方向只布置一个网格，所以实际是二维计算模型。计算模型顶部采用压力入口边界，前后面采用对称边界条件，其他壁面均采用不可滑移壁面条件。水的密度为 $\rho_1 = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，运动黏性系数 $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，重力加速度为 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。计算时采用的时间步长为 $t = 0.0005 \text{ s}$ 。

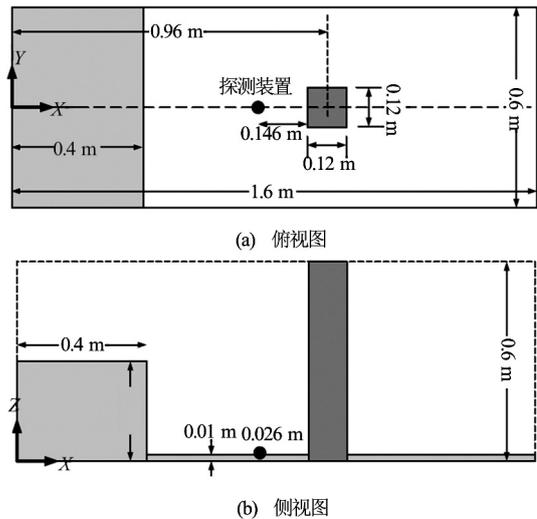


图 4 三维溃坝波绕方柱流动的计算模型
Fig.4. Numerical set-up for dam-break wave interaction with a square cylinder

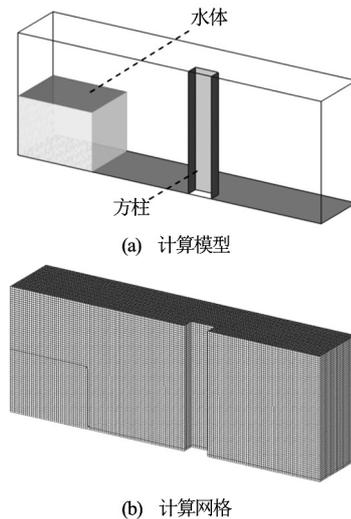


图 5 三维溃坝波绕方柱流动模型和网格结构
Fig.5. Three-dimensional computational model and mesh

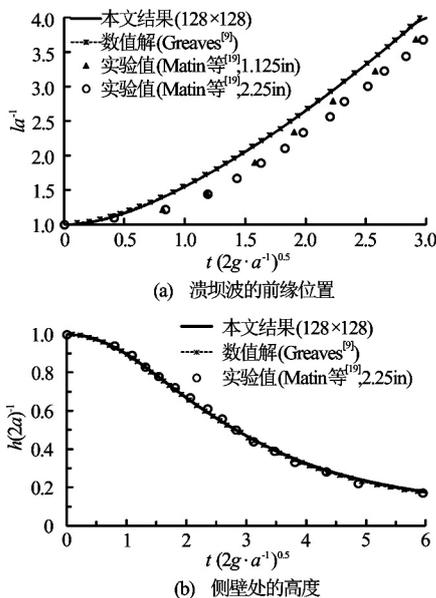


图 3 溃坝波的前缘和在侧壁处的高度变化曲线
Fig.3. Time variation of position of dam-break wave bore and the height at left wall

为了便于比较数值模拟结果和实验结果，取无量纲化时间 $T = t \cdot \sqrt{g/a}$ ，其中 a 为初始时刻水柱的宽度。图 2 给出了 $T = 0$ 、 $T = 1.617$ 、 $T = 3.233$ 、 $T = 4.850$ 、 $T = 6.466$ 和 $T = 8.029$ 时的计算结果和对应

的实验结果。可以看出，模拟得到的波面与实验情况非常吻合。在初始时刻 $T = 0$ 时，水柱处于静止状态；当计算开始后，在 $T = 1.617$ 时，水柱在重力作用下开始坍塌，水柱前缘沿着水槽底面迅速向右侧移动；在 $T = 3.233$ 时，水柱前端撞到右侧壁面，在惯性作用下，水面沿着壁面上升，当上升到一定高度时，出现波浪破碎和水花飞溅现象，但由于计算模型为二维模型，水的飞溅现象模拟并不明显；在 $T = 4.850$ 时，对应的状态为上升的水流在重力的作用下开始下落，并与从底部向上运动的水流汇集在一起，水面出现一个隆起，同时由于右侧壁附近水流的垂向速度不均匀，在回落过程中右侧壁上的水层被拉薄；在 $T = 6.466$ 时，回落的水体发生翻卷，卷裹着空气落入底部的水中，形成气穴，同时激起一水柱，冲向左侧壁面；当 $T = 8.029$ 时，水面撞击

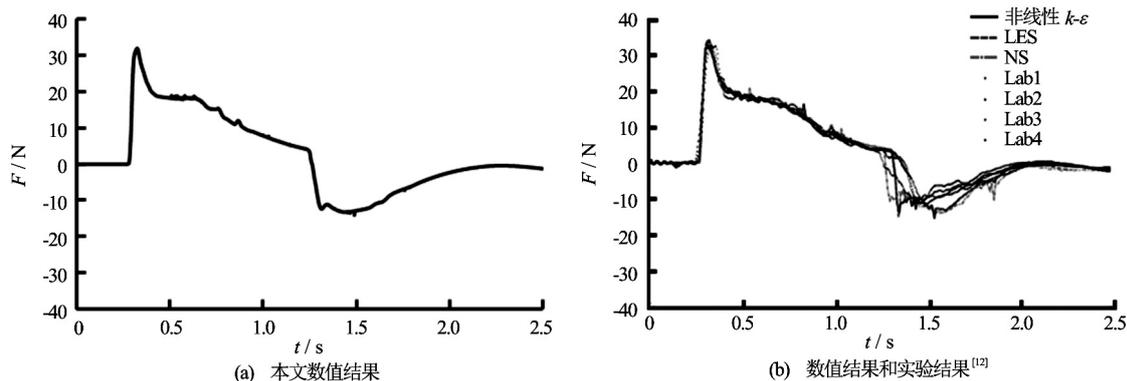


图6 方柱受到的拍击力随时间变化曲线

Fig.6. Time variation of dam-break wave impact force on square cylinder

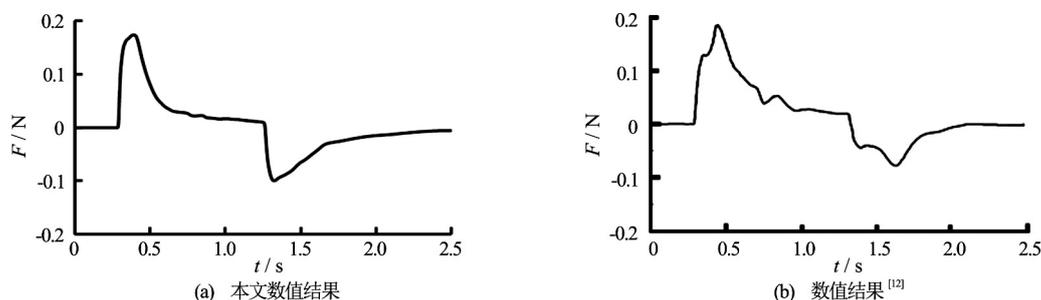


图7 方柱上黏性剪切力随时间变化曲线

Fig.7. Time variation of viscous shear force on square cylinder

到左侧壁面, 由于多次将空气卷入水中, 在水下形成多个气穴, 使水面更为复杂混乱。

通过和实验照片的对比, 定性的验证了 naoe-FOAM-SJTU 求解器的有效性。为了进一步验证 naoe-FOAM-SJTU 求解器的精度, 定量地验证本文数值模拟结果的可靠性, 在此将溃坝波的前缘位置 l 和侧壁处的高度 h 与实验结果以及其他文献中的数值模拟结果进行对比, 如图3所示。图中实验数据来自 Martin 等^[19], 数值结果为 Greaves^[9]采用自适应网格计算得到的结果, 为了便于比较, 将数据进行了无量纲化。从图中结果可以看出: 本文数值模拟结果和 Greaves^[9]的结果吻合的相当好, 且两者与 Martin 等^[19]实验结果也基本吻合。此外, 从图中还可看出, 在对溃坝波前缘位置的预测上, 数值模拟结果普遍要略大于实验结果。

3.2 三维溃坝波绕方柱流动

三维溃坝波绕直立方柱流动的计算模型如图4所示。长方形水槽大小为 1.6 m(长)×0.6 m(宽)×0.6 m(高), 初始时刻在水槽左侧 0.4 m×0.6 m×0.6 m 的区域内会被水体占据, 方柱结构物尺寸为 0.12 m(长)×0.12 m(宽)×0.6 m(高), 放置在水体下游 0.5 m 处, 方柱侧面距离水槽侧面距离 0.24 m。在物理实验情况下, 移开阻挡水体的挡板之前, 水会从挡板下方渗透到水槽下游, 因此很难将下游的水完全抽干净。因此为了便于和实验结果进行比较, 在数值计算模型中水槽下游也设置了和实验相

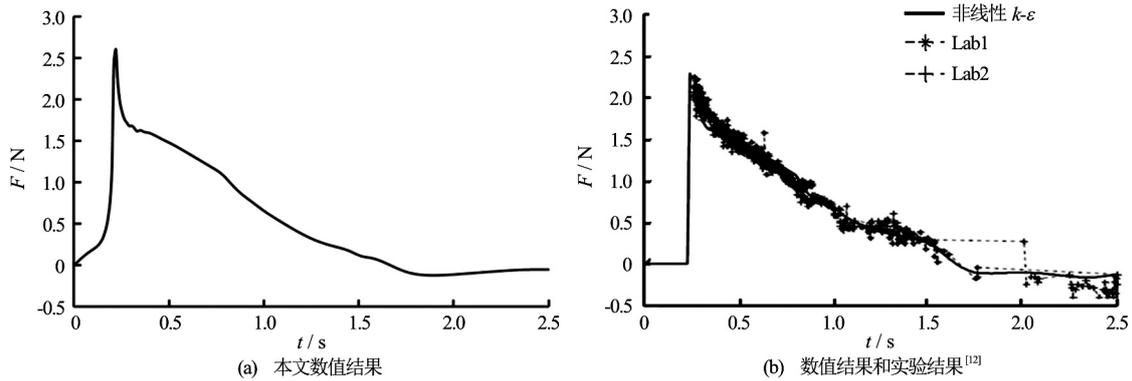
同的厚度为 0.01 m 的一层水。Wu^[11]在实验过程中实时记录了方柱的受力情况, 同时在方柱前方 0.146 m 及高 0.026 m 处放置了流速探测装置, 用于记录该点处的流体速度变化情况。

考虑到计算模型和流场结构的对称性, 数值模拟过程中使用一半模型, 这样可以节省计算时间, 因此实际计算域大小为 1.6 m(长)×0.3 m(宽)×0.6 m(高)。采用等尺寸均匀分布的六面体结构网格对计算域进行网格划分, 网格尺度为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.01$ m。

三维计算模型和网格结构如图5所示。方柱表面的边界条件为无滑移壁面条件 (wall), 即速度为 0, 压力梯度为 0; 水槽的四周和底部使用滑移壁面条件 (slip), 即法向速度为 0, 切向速度等于和其相邻的流场内部的速度, 压力梯度为 0; 水槽上方为压力入口边界条件, 设置为大气压力; 在对称面上使用对称边界条件 (symmetry)。

挡板移开后, 水体在重力作用下形成溃坝波向下游流动。当溃坝波遇到方柱时, 可以观察到溃坝波被沿方柱表面爬高、波浪破碎和翻卷等现象。计算过程中实时记录了方柱的受力情况, 同时对和实验中速度探测点相同位置 G (0.756, 0, 0.026) 的速度情况进行了记录。

图6所示为方柱受到的拍击力的时间历程。由图中可知, 本文的数值结果和 Wu^[11]的数值实验结果两者吻合良好。图7(a)为本文计算得到的方柱



(a) 本文数值结果 (b) 数值结果和实验结果^[12]

图8 探测点G处(0.756, 0, 0.026)的速度随时间变化曲线
Fig.8. Time variation of velocity at probe G (0.756, 0, 0.026)

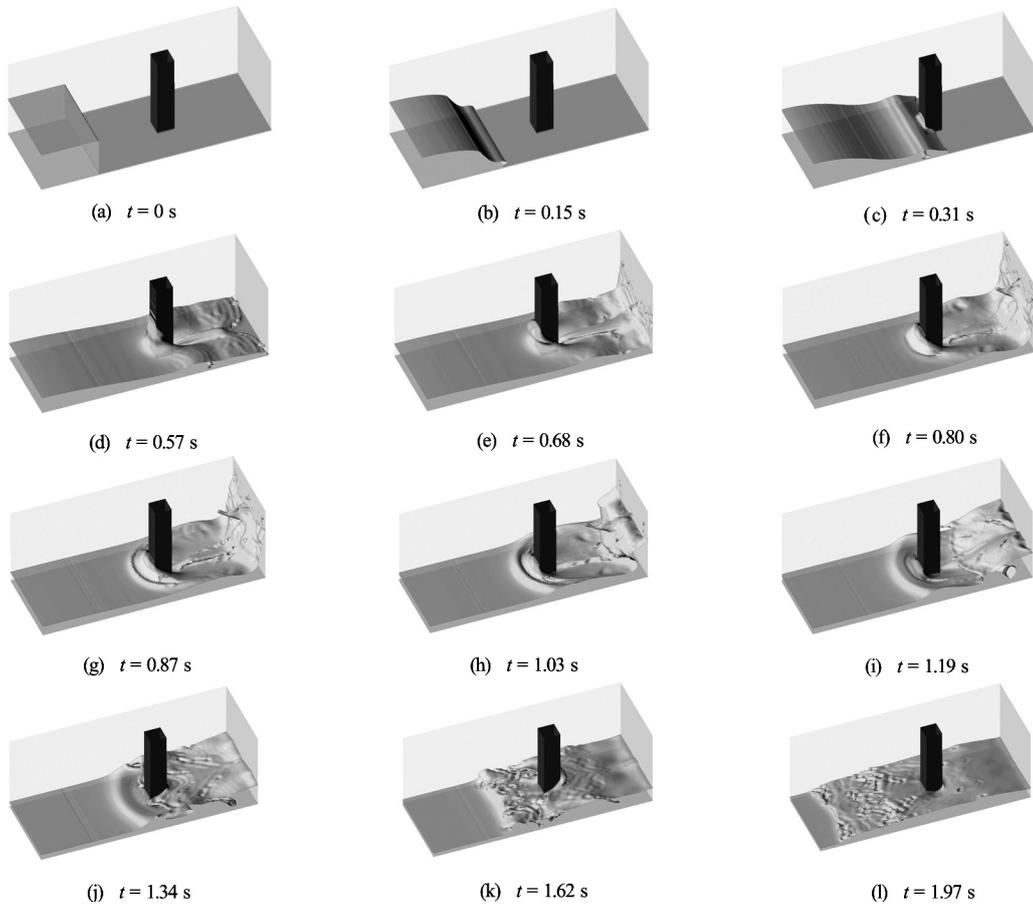


图9 不同时刻的自由面演化
Fig.9. Free surface evolution at different time

受到的黏性剪切力大小的时间历程曲线,与图7(b)中 $Wu^{[1]}$ 的数值结果变化趋势基本一致,由此表明在黏性剪切力的最大值的预测上,两者也吻合的较好。从图6和图7中可以看到:在 $t = 0.28\text{ s}$ 时受力曲线开始快速增大,而在此之前的受力值基本为0,这说明大约在此时,溃坝波水头到达方柱前端,开始拍击立柱;在 $t = 0.31\text{ s}$ 时,方柱受到的拍击力达到最大值 $F_{\max} = 32\text{ N}$ 。而与方柱受到的总拍击力相比,流体黏性剪切力所占比例很小,最大值不到 0.2 N 。

图8(a)为数值计算得到的探测点G处的速度随时间的变化情况,图8(b)为 $Wu^{[1]}$ 的实验结果和 $Wu^{[1]}$ 采用非线性湍流模型数值模拟得到的结果。通过图中对比可以看到:本文结果和实验结果的吻合的较好,速度变化的趋势和大小基本一致;与 $Wu^{[1]}$ 的数值结果相比,本文结果计算开始后不久,探测点G位置出就可以探测到速度值,而 $Wu^{[1]}$ 的数值结果此时对应的速度基本为0,并且本文得到的速度最大值要比 $Wu^{[1]}$ 的结果大一些。通过对比流场情况可以发现,导致两者不同的主要原因

图中: 自由面以浅灰色表示, 涡结构则以深灰色表示, 如图(d)所示。

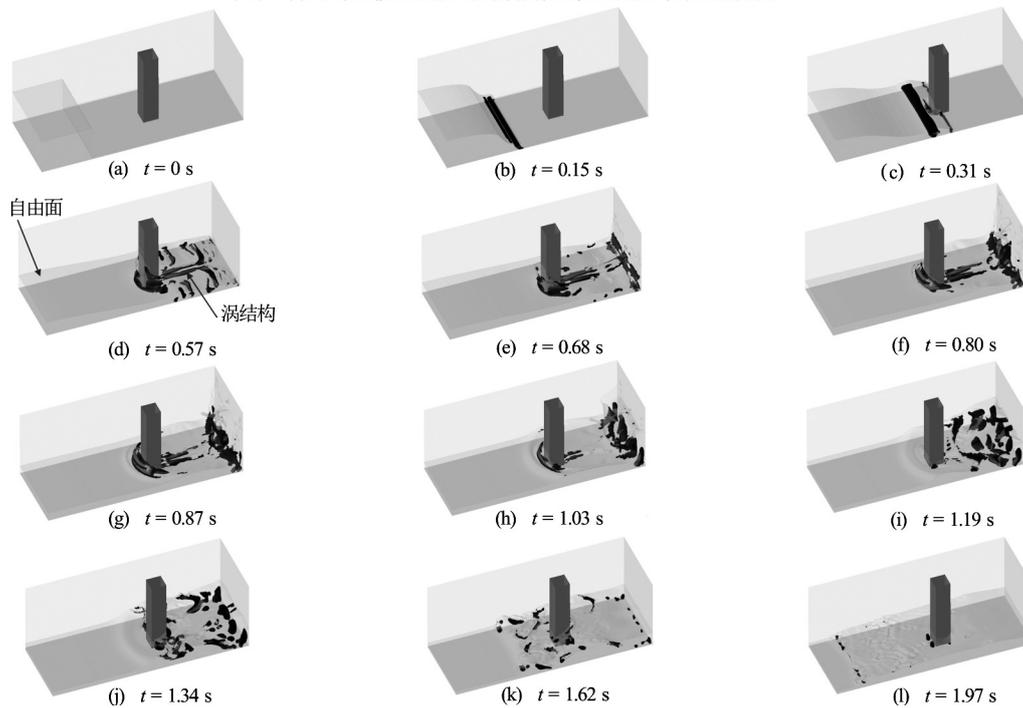


图 10 流场中的涡结构变化 ($Q=50$ 等值面)

Fig.10. Vortex in the flow field at different time with iso-surface $Q=50$

是: 在本文计算过程中采用两相流模型, 自由面附近的空气受到溃坝波流动的影响而产生流动, 由于空气密度较水小很多, 使其速度变化更快, 速度值更大。因此, 在计算开始的一段时间内, 探测得到的是被扰动后空气流动的速度。

图 9 给出了数值模拟得到的不同时刻的自由面情况, 由图中可以看到溃坝波在重力作用下形成溃坝波和方柱相互作用的整个过程中的自由面演化情况。在 $t=0.15$ s 时, 溃坝波前端形成蘑菇头; 在 $t=0.31$ s 时, 溃坝波进一步演化, 将空气卷入水中, 形成气穴; 当 $t=0.57$ s 时, 可以看到溃坝波沿方柱爬高并发生破碎和飞溅, 此时出现的最大爬高值约 0.48 m; 在 $t=0.68$ s 时, 沿方柱爬高的水体回落, 绕过方柱的溃坝波到达右侧墙壁并发生爬高; 在 $t=0.8$ s 至 $t=1.19$ s 时, 可以看到溃坝波在右侧墙壁发生翻卷, 并在翻卷过程中将空气卷入水中, 形成大量的气穴, 此时的流场情况非常复杂; 当 $t=1.34$ s 时, 溃坝波被右侧墙壁反射回来再次冲击方柱, 对照图 3 可知, 此时方柱受到的拍击力达到反方向的最大值, 当溃坝波反向再次绕过方柱时, 和溃坝波首次被方柱反射的水体相互作用形成了复杂自由面形状; 随着时间的继续推进, 由于流体湍动能的耗散, 自由面逐渐变得平静。

由于考虑了流体的黏性作用, 本文可以模拟得到溃坝波绕方柱流动过程中形成的复杂涡结构。依照 Q 准则^[20], 图 10 给出了不同时刻对应的流场涡结构 (取等值面 $Q=50$)。从图中可以看到: 当溃坝

波绕过方柱后, 在方柱后面的尾流中形成两条涡 ($t=0.57$ s— $t=0.80$ s); 在溃坝波遇到右侧墙壁并发生反射过程中, 在底角处形成大量复杂的涡结构 ($t=0.87$ s— $t=1.03$ s); 反射回的溃坝波在往回流过程中, 再次遇到方柱时, 在方柱附近再次形成涡结构 ($t=1.34$ s); 之后在方柱前端形成一对对称的涡 ($t=1.97$ s); 随着时间的推进, 流场中的涡结构随着湍动能的耗散而逐渐缩小、消失。

4 结论

本文利用自主开发的船舶海洋工程水动力问题求解器 naoe-FOAM-SJTU, 数值模拟了三维溃坝波绕方柱流动的复杂流场和自由面演化过程。数值计算结果给出了三维溃坝波演化过程: 包括溃坝波对直立方柱的爬高和拍击、溃坝波在直立方柱作用下的剧烈变形以及变形后的溃坝波拍击直立方柱后面的直立墙壁的剧烈变形流动演化过程。还给出溃坝波绕直立方柱流动的涡流场, 分析了流体黏性效应的影响, 并给出直立方柱受溃坝波拍击作用的水动力时间演化过程图。这些数值模拟结果均与 Wu^[11]提供的实验数据吻合良好, 表明本文求解器可以很好地模拟溃坝波与方柱相互作用过程中的波浪破碎和翻卷等剧烈流动现象, 可以较好预报波浪在结构物上的爬高值和拍击力。由此表明, 采用求解器 naoe-FOAM-SJTU 数值模拟强非线性剧烈

流动问题具有良好的应用前景和发展潜力。

致谢

本文工作得到海洋工程国家重点实验室自主研究课题基金(GKZD010059)、上海东方学者人才计划基金(2008007)和英国劳氏船级社教育基金(LRET)的资助,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献:

- [1] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201-225.
- [2] OSHER S, SETHAIN J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations[J]. *Journal of Computational Physics*, 1988, 79(1): 12-49.
- [3] 万德成. 用VOF法数值模拟孤立波迎撞及在后台阶上的演化[J]. *计算物理*, 1998, 15(6): 655-666.
WAN De-cheng. Numerical simulation of the transformation of a solitary wave over backward step by VOF method[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 1998, 15(6): 655-666.
- [4] KLEEFMAN K M T, FEKKEN G, VELDMAN A E P, et al. A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact problems[J]. *Journal of Computational Physics*, 2005, 206(1): 363-393.
- [5] 陶建华, 谢伟松. 用LEVEL SET方法计算溃坝波的传播过程[J]. *水利学报*, 1999, 10: 17-22.
TAO Jian-hua, XIE Wei-song. The Level Set method for calculation of dam-break wave[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 10: 17-22.
- [6] KOSHIZUKA S, OKA Y. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid[J]. *Nuclear Science Engineering*, 1996, 123(3): 421-434.
- [7] 张雨新, 万德成. MPS方法在三维溃坝问题中的应用[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41(2): 140-154.
ZHANG Yu-xin, WAN De-cheng. Application of MPS in 3D dam breaking flows[J]. *Scientia Sinica Physics, Mechanics & Astronomy*, 2011, 41(2): 140-154.
- [8] 张弛, 张雨新, 万德成. SPH方法和MPS方法模拟溃坝问题的比较分析[J]. *水动力学研究与进展, A辑*, 2011, 26(6): 736-746.
ZHANG Chi, ZHANG Yu-xin, WAN De-cheng. Comparative study of SPH and MPS methods for numerical simulations of dam breaking problems[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2011, 26(6): 736-746.
- [9] GREAVES D M. Simulation of viscous water column collapse using adapting hierarchical grids[J]. *International for Numerical Methods in Fluids*, 2006, 50(6): 693-711.
- [10] WANG J F, ZOU R Z, WAN D C. Numerical simulation of 3D dam-break flow by FEM-Level Set method[C]. *Proceedings of Twenty-Second International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 2012, 1080-1087.
- [11] WU T. A numerical study of three-dimensional breaking waves and turbulence effects[D]. Cornell University, Ithaca, USA, 2004.
- [12] YANG C, HUANG F, WANG L, et al. Numerical simulations of highly nonlinear steady and unsteady free surface flows[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2011, 23(6): 683-696.
- [13] SHEN Zhi-rong, CAO Hong-jian, WAN De-cheng, et al. Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU[R]. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, 2012.
- [14] CAO H J, ZHA J J, WAN D C. Numerical simulation of wave run-up around a vertical cylinder[C]. *Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*, Maui, Hawaii, USA, 2011, 726-733.
- [15] CAO H J, WAN D C. Numerical investigation of extreme wave effects on cylindrical offshore structures[C]. *Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 2012, 804-811.
- [16] 沈志荣, 叶海轩, 万德成. 船舶在迎浪中运动响应和波浪增阻的RANS数值模拟[J]. *水动力学研究与进展, A辑*, 2012, 27(6): 621-633.
SHEN Zhi-rong, YE Hai-xuan, WAN De-cheng. Motion response and added resistance of ship in head waves based on RANS simulations[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, 27(6): 621-633.
- [17] RUCHE H. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions[D]. Imperial College, London, UK, 2002.
- [18] ISSA R I. Solution of the implicitly discretized fluid flow equations by operator-splitting[J]. *Journal of Computational Physics*, 1986, 62(1): 40-65.
- [19] MARTIN J C, MOYCE W J. An experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plane[J]. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, 1952, 244(882): 312-324.
- [20] HUNT J C R, WRAY A A, MOIN P. Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows[R]. Center for Turbulence Research, Stanford, USA, 1988, 193-208.