

基于CFD的楔形体浅水入水砰击载荷分析

袁颖聪, 陈超核

(华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

[摘要] 为了研究楔形体入水砰击载荷特性, 应用重叠网格法对入水砰击过程进行了数值模拟, 计算了三种入水速度下楔形体的砰击压力值。通过与试验结果对比, 验证了数值模拟方法的有效性。此外, 通过改变水深, 模拟有限水深情况下的入水砰击过程, 探究水深对楔形体表面压力、下落速度及自由液面的影响。结果表明: 浅水中水深方向的壁面效应会使得作用在楔形体上压力的增加, 水深越小, 作用在楔形体上的砰击压力越大; 水中水深方向的壁面效应同时也使楔形体产生与下落方向相反的加速度, 水深越小, 反向加速度越大; 相对于无限水深, 浅水情况下的自由液面会有更大地升高。

[关键词] 计算流体力学(CFD); 楔形体; 入水砰击; 浅水入水; 砰击载荷

[中图分类号] U 661.1

Analysis of Impact Loads on Wedge for Shallow Water Entry Based on CFD

YUAN Yingcong, CHEN Chaohe

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to study the characteristic of slamming pressure on wedge during entering water, overlapping grid method was used to simulate the water entry process. The slamming pressure of wedge at three different entry velocities was calculated. Moreover, the numerical simulation method was verified by comparing with the experimental result. In addition, by changing the water depth, the process of wedge entering water with finite depth was simulated to investigate the influence of water depth on the surface pressure, falling speed and free water surface. The results show that the water depth of shallow water will increase the pressure on the wedge. The shallower the water, the greater the pressure. The wall effect also causes the wedge to accelerate in the opposite direction of falling. The shallower the water, the greater the reverse acceleration. In addition, compared with infinite water depth, the free water surface will rise more significantly in shallow water.

Keywords: computational fluid dynamics(CFD); 2D wedge; water entry; shallow water; water impact

0 引言

船舶在高海况中航行时, 无可避免地会发生船体砰击。对于大型船和高速船而言, 在快速航行过程中所承受的砰击载荷往往不可忽略且影响较大。强烈的砰击不仅会造成仪器失灵、船员受伤, 甚至可能导致船舶结构破损事故的发生。因此, 船舶入水砰击这个涉及到气-液-固相互作用的强非线性

[收稿日期] 2019-10-29

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51909096)

[作者简介] 袁颖聪(1995—), 男, 硕士, 从事船舶与海洋结构物设计制造研究。通信作者: 陈超核(1962—), 男, 博士, 教授, 从事船舶与海洋工程结构设计研究。E-mail: chenchaoh@scut.edu.cn

问题,成为了目前的研究热点。根据船型的具体特点,准确预报外飘砰击载荷,具有重要的理论意义和实用价值。

近年来,对入水砰击问题的数值计算已成为重要的研究手段,也有较多学者进行了相关研究。杨凡等^[1]基于CFD技术对水深无限大情况下的船体典型剖面的砰击载荷强度进行了直接计算。谢行等^[2]基于纳维-斯托克斯方程,应用流体体积法模拟分析了外飘剖面以不同横倾角和水平速度的入水砰击问题。窦义哲等^[3]分析了入水速度和横倾角对游艇艇艏砰击压力特性的影响。Bilandi等^[4]采用有限体积法与流体体积法相结合的方法对不对称楔形体的垂直入水砰击进行了数值模拟。陈小平等^[5]研究了不同冲击速度下流固耦合效应对弹性结构动响应的影响。Ermanyuk等^[6]考虑流域水深带来的壁面效应,对圆盘的浅水砰击进行了实验研究,并与理论值进行对比。吴家鸣等^[7]分析了平底结构在限制水域前提下的自由落下砰击。Yu等^[8]研究了在浅水环境下楔形体发生入水砰击时冲击力、压力分布和浅水系数随冲击速度、斜升角等的影响。

目前大多数研究都基本假定流域处于无限水深状态,考虑壁面效应影响的相关研究较少。然而在一些实际模型试验中,试验水域的水深是有限的,壁面效应的存在可能会对结构物入水冲击产生影响,如有限尺度水池中的入水冲击试验等^[9]。因此,本文对由实际船体剖面简化而来的二维楔形体进行浅水入水砰击的数值模拟,并考虑不同水深对入水砰击压力和速度变化的影响,定量给出当水深与模型高度满足何种关系时,可忽略壁面效应对结构物入水冲击的影响。

1 数值方法

采用RANS模拟方法,研究有限水深下二维楔形体的入水砰击问题。采取有限体积法求解不可压缩RANS方程的积分形式,通过流体体积函数(VOF)方法捕捉空气与水的交界面,利用具有自由表面流体的重叠网格功能和动态流固耦合(DFBI)功能对楔形体的运动进行建模。

采用基于N-S方程的气-液两相流模型,假设流体是不可压缩的,且气液不相容,在入水砰击的过程中也没有温度的变化,则连续性方程和动量方程可以写为

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{u} &= 0; \\ \partial \mathbf{u} / \partial t + (\mathbf{u} \cdot \tilde{\mathbf{N}}) \mathbf{u} &= -\tilde{\mathbf{N}} p / \rho + \nu \tilde{\mathbf{N}}^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}.\end{aligned}$$

其中: ρ 为流体密度; \mathbf{u} 为速度矢量; p 为场压; ν 为动态粘度; \mathbf{F} 为体积力。

水和空气可被当作是单一有效流体中的两种不可混合组分,它们的性质随体积分数的变化而变化。有效流体的密度 ρ_{eff} 和动态粘度 ν_{eff} 可表示为:

$$\rho_{\text{eff}} = \gamma \rho_a + (1 - \gamma) \rho_w; \nu_{\text{eff}} = \gamma \nu_a + (1 - \gamma) \nu_w。$$

其中: ρ_a 和 ν_a 分别为空气的密度和动态粘度; ρ_w 和 ν_w 分别为水的密度和动态粘度; γ 是空气的体积分数, $\gamma = 0$ 表示网格中的流体为水, $0 < \gamma < 1$ 表示网格同时包含水和空气。

参考文献[4]对无限水域楔形体入水冲击的分析,通过使用流体体积函数方法,对同一连续体内的两种流体(空气和水)进行运动建模。由于两种不同相流体的存在,采用欧拉多相模型,并使用重力模型,考虑流体所受重力作用,流体模型设置为层流。通过重叠网格技术实现楔形体的入水砰击,通过线性插值实现重叠域与背景域中物理量的交互。

2 数值模型验证

船体剖面可近似简化为楔形体,因此楔形体的入水砰击载荷特性分析是研究船体在恶劣海况下砰击载荷的基本。本节对刚性楔形体在无限水深下的入水砰击进行了数值模拟,并与试件实验数据进行对比,验证仿真结果的准确性和仿真方法的有效性。

2.1 建模过程及设置介绍

参照文献[10]的模型数据,在Solidworks中进行建模,以完成前处理,后导入有限元分析软件

中进行数值计算。楔形体模型具体参数如表 1 所示，模型示意图如图 1 所示，模型材质为 Q235 碳钢。

表 1 楔形体模型参数
Tab. 1 Parameters of wedge shape model

底升角 Dead rise angle/(°)	长度 Length /m	宽度 Width /m	总高度 Total height /m	干舷 Freeboard /m	总质量 Total mass/kg
45°	1.5	0.9	0.75	0.3	553

为保证数据的可靠性并尽量减小误差，在纵向长度中点处的环肋板与外底板交界处自下而上布置 4 个压力传感器，命名依次为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 ，位置如图 1 和图 2 所示（图中长度单位为：mm），数值模拟过程中监测对应点处的砰击载荷。

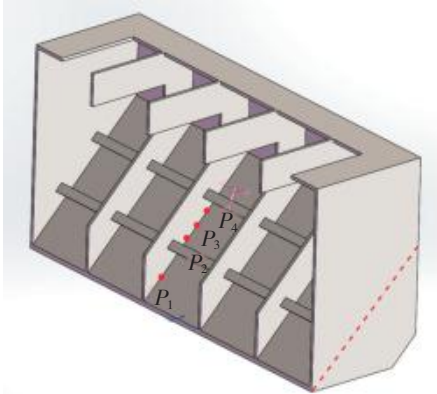


图 1 楔形体模型

Fig.1 The model of the wedge

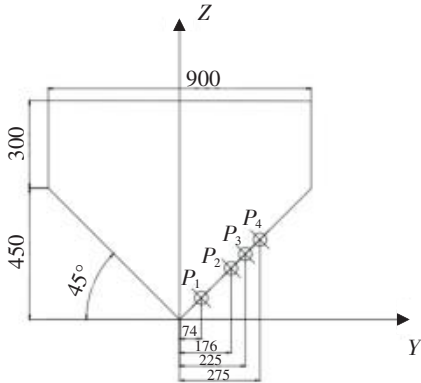


图 2 楔形体剖面

Fig.2 The profile of the wedge

初始时刻楔形体位于空气域中，最低点距离自由液面的垂直高度 $h_0 = 0$ ，通过给楔形体施加一定的初始速度 v_0 ，可模拟不同落体高度 h' 下的模型落体试验，易知三者满足关系式： $v = \sqrt{2g(h' - h_0)}$ 。

考虑到流场和结构模型的对称性，仅建立 $y > 0$ 的一半模型进行数值计算，如图 3 所示。空气域高 2 m，宽 5 m，水域深 5 m，宽 5 m。流体域内的网格划分如图 3 所示。具体网格层次如图 4 所示。水表面网格区域设置为水面上下 0.1 m 的区域，并对水表面网格进行相应加密，以捕获相关的流体细节。重叠网格区域大小要求涵括整个楔形体的运动区域，以此来实现楔形体的整个运动过程。

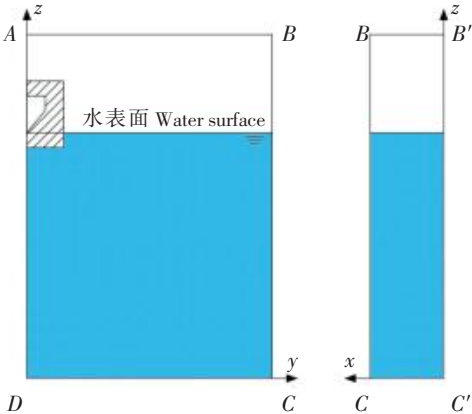


图 3 计算域划分

Fig.3 Computational domain division

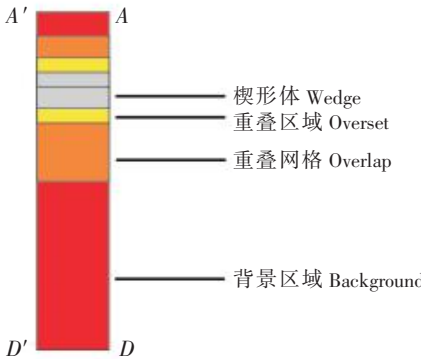


图 4 由里到外网格层次分布图

Fig.4 Grid distribution from inside to outside

2.2 网格收敛性分析

网格密度通常对数值模拟结果有较大的影响，本文分别在 6 种不同密度的网格划分下，给模型施加一个初速度 $v_0 = 5 \text{ m/s}$ ，监测 P_1 点的压力并相互对比分析，以确定合适的网格结构。分析结果如表 2 所示。

在网格尺寸方面, 将重叠区域网格尺寸定为背景区域网格尺寸的 20%, 重叠网格的网格尺寸定为背景区域网格尺寸的 25%, 保证重叠网格尺寸大小在背景区域和重叠区域之前的同时, 让重叠网格尺寸大小更接近于重叠区域, 可最大程度上消除在两个区域之间插入变量时产生的错误。

从图 5 可以看出, 随着网格尺寸的减小, P_1 点的压力变化曲线逐渐稳定起来。结合表 2, 网格 4 下 P_1 点的压力峰值已比较稳定, 当重叠区域网格尺寸从 0.02 m 减小至 0.018 m 时, 仿真精度提高不大, 但耗时大大增加, 在工程上不符合经济性原则, 因此选择网格 5 作为数值计算的网格结构, 如图 6 所示。此外, 由于本次模拟着眼于入水砰击和撞击力, 因此水流模型选择层流模型, 时间步长则定为 0.0025 s, 这样可同时保证计算精度和计算效率。

表 2 网格收敛性分析
Tab. 2 Grid convergence analysis

网格 Grid	网格单元数 Number of grid elements	背景区域 网格基础尺寸 Grid size of background /m	重叠区域 网格基础尺寸 Grid size of overset/m	P_1 压力峰值 Peak pressure of P_1 /Pa	模拟时长 Simulation time/min
1	66 140	0.30	0.060	27 565.85	13.36
2	107 907	0.25	0.050	26 508.54	23.98
3	192 482	0.20	0.040	26 365.84	43.65
4	414 709	0.15	0.030	26 631.60	107.97
5	1 300 773	0.10	0.020	25 190.10	298.13
6	1 725 764	0.09	0.018	25 371.70	547.42

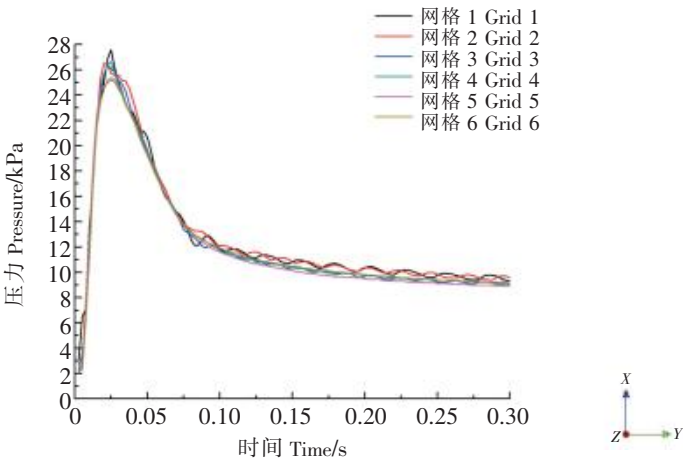


图 5 网格收敛曲线
Fig.5 Grid convergence curve

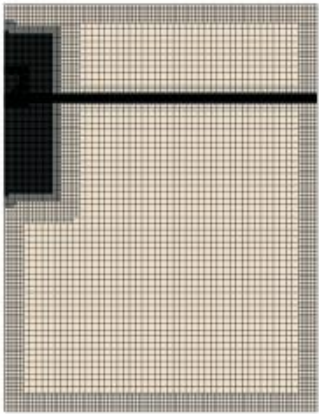


图 6 最终选取的计算域网格划分
Fig.6 Selected grid for simulation

2.3 试验验证

取用文献 [10] 的试验, 该试验为保证楔形体尽可能接近刚体, 在底部外板上焊接四根 T 形连续性纵骨和四个隔板。楔形体外形模拟实船舶外飘, 隔板底部开孔, 安装压力传感器, 具体试验工况如表 3 所示。

表 3 楔形体实验工况
Tab.3 Experimental condition of the wedge

工况 Condition	模型落体高度	模型入水初速度
	Fall height of wedge/m	Initial entry velocity of wedge/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	0.55	3.283
2	0.70	3.704
3	0.85	4.082

在本文的数值计算中，楔形体取自刚体模型，对应表 3 中 3 个工况进行数值计算。数值计算结果与试验结果的对比分析如下表 4 及图 7 ~ 图 9 所示。

表 4 3 种工况压力峰值对比
Tab.4 Peak pressure of three working conditions

工况 Condition	压力测点 Pressure measuring point	压力峰值 Peak pressure		
		模拟值 Value of simulation/Pa	试验值 Value of experiment/Pa	差值 Percentage of value difference(%)
1	P_1	12 932.51	12 200.37	6.00
	P_2	11 280.38	11 487.42	-1.80
	P_3	10 564.34	11 039.86	-4.31
	P_4	9 279.28	8 773.19	5.77
2	P_1	15 452.40	15 098.39	2.34
	P_2	13 120.98	13 285.88	-1.24
	P_3	12 158.81	12 247.70	-0.07
	P_4	10 537.25	10 794.64	-2.38
3	P_1	17 821.76	18 619.61	-4.48
	P_2	14 997.99	15 724.53	-4.84
	P_3	13 694.39	14 396.67	-5.13
	P_4	12 054.21	12 689.82	-5.27

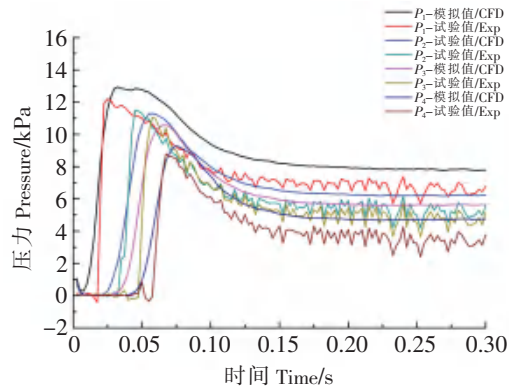


图 7 工况 1 压力曲线

Fig.7 Pressure curve of condition 1

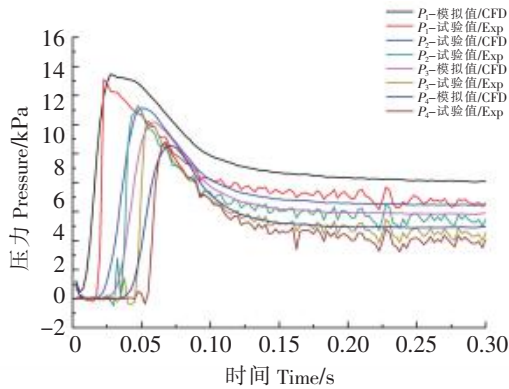


图 8 工况 2 压力曲线

Fig.8 Pressure curve of condition 2

从图 7 ~ 图 9 中可以看出，3 个工况共 12 个测点，压力峰值虽然有差值，但相对总值而言差别不大，所有单一测点的压力变化趋势和整体走向也基本一致。楔形体的表面测点都是在入水后压力值迅速攀升，并到达峰值，然后缓慢减小，并逐渐趋于平衡。而在同一工况下，测点 P_1 到 P_4 的压力峰值逐渐减小，说明楔形体表面测点压力峰值随测点距楔形体表面最低点的高度增加而减小。表 4 亦从数字方面佐证了上述观点。此外，也可观察到表面点到达压力峰值的时间也随点的高度增加而滞后。而从表 4 还可以看出，2/3 的测点压力峰值误差在 5% 以内，另外 1/3 的测点压力峰值误差虽超出 5%，但最大误差百分比仅为 6%，均在可接受范围之内。

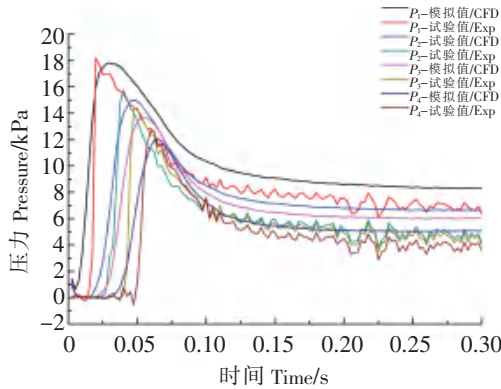


图 9 工况 3 压力曲线

Fig.9 Pressure curve of condition 3

压力峰值之所以存在差距, 本文认为数值计算是一个绝对理想化的状态, 会与实际试验存在一定误差。因此, 在压力峰值差距不算太大, 且压力变化趋势基本相同的情况下, 可表明本文的重叠网格法适用于模拟二维楔形体的入水砰击。

3 浅水效应影响分析

对浅水入水砰击, 模拟了不同水深下二维楔形体的入水砰击情况。研究了在水深有限的前提下, 水深对于楔形体底表面压力分布以及楔形体速度变化的影响。浅水入水分析分为 5 个工况, 各工况水深 h 分别为 1.125, 1.500, 2.250, 3.00, 3.750 m, 即分别为 1.5 倍, 2.0 倍, 3.0 倍, 4.0 倍, 5.0 倍的楔形体高度。各工况除水深有区别外, 其他参数保持不变。 $t = 0.0$ s 时刻, 楔形体的最低点同样离自由液面的垂直高度 $h_0 = 0$, 初始入水速度为 $v_0 = 4.427$ m/s (即模拟楔形体从 $h = 1.0$ m 处开始发生自由下落), 选取点 P_1 作为压力测点。

3.1 压力分析

楔形体在浅水中作入水砰击时, 点 P_1 压力曲线变化如图 10 所示。由图 10 可以看出, 水深方向的壁面效应会导致楔形体表面压力的增加, 水深越小, 壁面效应愈明显, 楔形体表面受到的压力也越大。由图 11 可直观看出来, 水深越大, 楔形体表面的流体压力越小, 壁面效应越弱。再结合图 10 曲线, 当水深 h 增大到 3.00 m 至 3.75 m 之间时, 楔形体所受到的压力基本不再增加, 压力变化曲线几乎重合, 楔形体附近的流体压力分布也基本相同。因此, 可认为当水深 h 为楔形体高度 H 的 4 倍及以上时, 可忽略壁面效应对压力的影响。

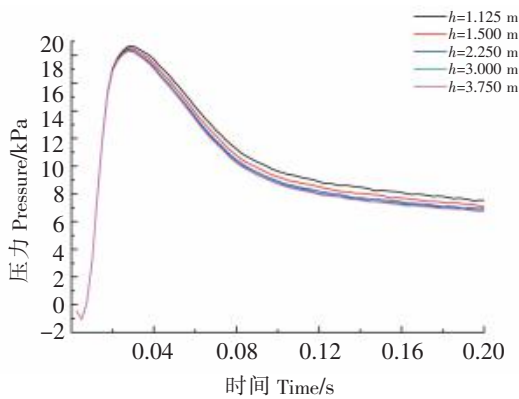


图 10 点 P_1 压力曲线随水深变化
Fig.10 Water depth dependence of pressure curve at point P_1

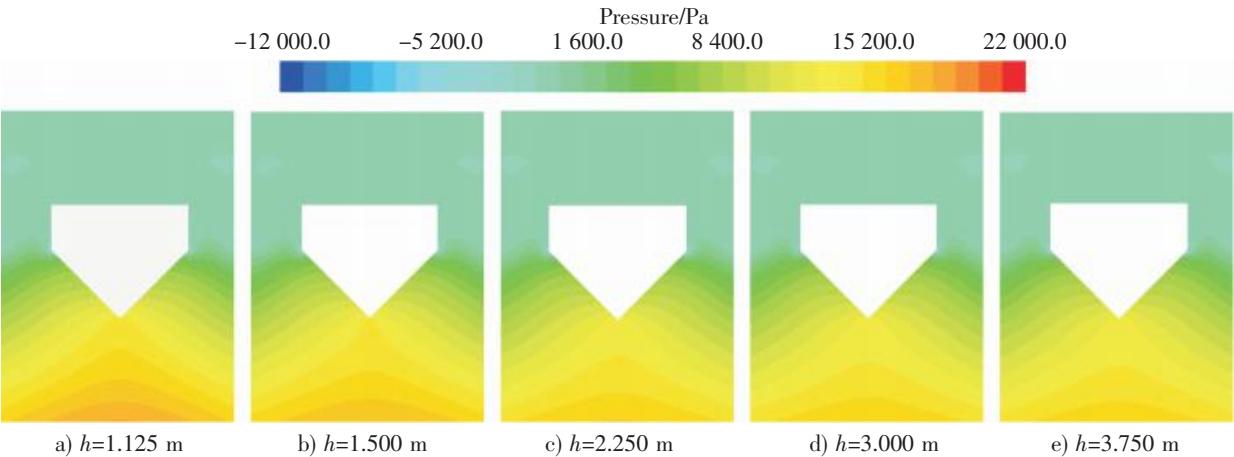


图 11 $t=0.10$ s 时刻不同水深下楔形体表面水体压力分布
Fig.11 Pressure distribution on the surface of wedge under various water depths while $t=0.10$ s

3.2 入水砰击后楔形体下落速度分析

楔形体在浅水中作入水砰击时, 楔形体速度曲线变化如图 12 所示。由于壁面效应的存在, 水体会对楔形体产生反作用力, 使楔形体产生一个向上的加速度, 从而进一步减小楔形体的砰击速度。由

图 12 可见，水深越小，壁面效应越强，楔形体速度减小得越快。同样的，与 3.1 中的压力变化分析相同，水深越大，水体作用使楔形体产生向上的加速度越小。当水深 h 增大到 3 m 至 3.75 m 之间时，楔形体所产生向上的加速度已很小，即可认为当水深 h 为楔形体高度 H 的 4 倍以上时，可忽略壁面对楔形体水中下落速度的影响。

3.3 自由液面分析

图 13 为无限水深和有限水深 $h = 1.125\text{ m}$ 下楔形体下落的自由表面变化对比图，两种水深环境下楔形体的砰击速度均为 $v = 4.427\text{ m/s}$ 。从图 13 可以看出，相对于无限水深，浅水情况下楔形体入水砰击会引起自由液面有更多的升高。这种现象表明，浅水情况下当船舶遭遇到入水砰击时，可能会加大甲板上浪的程度。

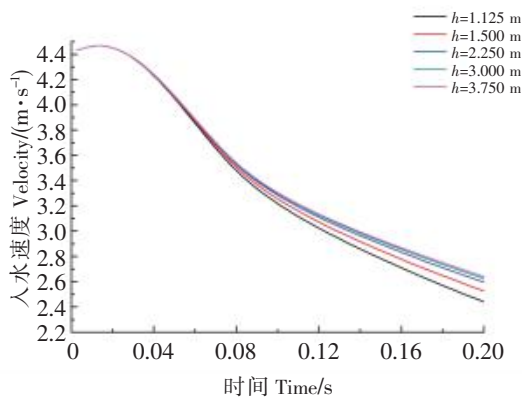


图 12 不同水深楔形体速度随时间的变化
Fig.12 Time dependence of the velocity of wedge at different water depths

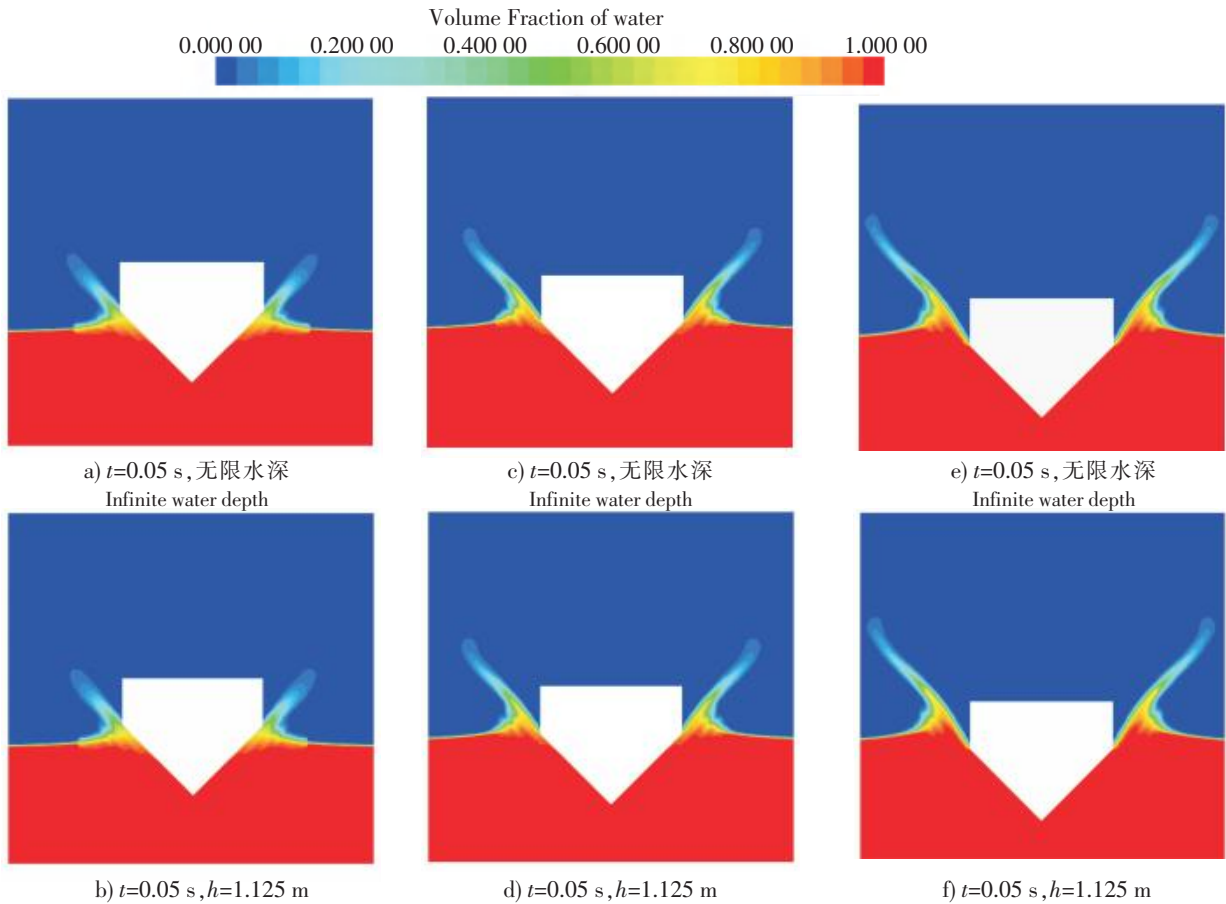


图 13 两种水深下楔形体入水引起的自由液面变化对比

Fig.13 Comparison of free surface change caused by entry of wedge into water under two different water depths

4 结论

本文首先基于 N - S 方程，应用重叠网格法对二维楔形体的入水砰击进行数值模拟，通过与实验

结果作比较,验证了该数值方法的有效性。并针对浅水环境下不同水深对楔形体砰击特性的影响进行了数值计算,可得到如下结论:

1) 水底面的存在会产生壁面效应,导致作用在楔形体上压力的增加;

2) 水深越小,作用在楔形体上的压力越大,楔形体速度衰减得也越快;

3) 当水深 h 大于或等于 4 倍楔形体高度时,水深进一步地增加,同一点的压力基本保持不变,楔形体的速度变化曲线也基本保持不变;

因此,可认为在实际试件实验中,当 $h \geq 4H$ 时,可当作是无限水深环境。当入水速度一致时,在入水砰击的相同时刻,浅水环境下相对于无限水深环境楔形体入水会使自由液面抬升更高。

[参 考 文 献]

- [1] 杨凡,任慧龙,王建辉,等. 基于 CFD 技术的砰击载荷强度直接计算 [J]. 船舶工程, 2016(11): 33-35.
- [2] 谢行,任慧龙,邓宝利,等. 基于 VOF 的非对称剖面自由入水数值模拟 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2019, 47(1): 132-137.
- [3] 窦义哲,陈章兰. 40m 游艇艇艏砰击压力有限元分析 [J]. 集美大学学报 (自然科学版), 2014, 19(6): 442-445.
- [4] BILANDI R N, JAMEI S, ROSHAN F, et al. Numerical simulation of vertical water impact of asymmetric wedges by using a finite volume method combined with a volume-of-fluid technique [J]. Ocean Engineering, 2018, 160: 119-131.
- [5] 陈小平,滕蓓,张晓杰,等. 二维楔形体入水砰击的数值仿真 [J]. 舰船科学技术, 2010, 32(1): 120-123.
- [6] ERMANYUK E V, OHKUSU M. Impact of a disk on shallow water [J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20(3): 345-357.
- [7] 吴家鸣,龚国围,朱良生. 平底结构砰击作用下限制水域的流体动力特性 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2008, 36(10): 97-101.
- [8] YU P, ZHANG B, YANG Z, et al. Numerical investigation on the shallow water entry of wedges [J]. IEEE Access, 2019, 99: 1-1.
- [9] DONG C, SUN S, SONG H, et al. Numerical and experimental study on the impact between a free falling wedge and water [J]. International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering, 2019, 11(1): 233-243.
- [10] 王强. 船舶外飘结构砰击载荷计算研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)