



波浪冲击平板过程流场的数值模拟

金凤^{1,2}

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098;

2. 江苏科技大学船舶与海洋工程学院, 江苏镇江 212003)

摘要: 为研究波浪冲击过程的流场特性, 应用FLUENT软件建立了规则波与平板结构相互作用的二维数学模型, 模型中采用RANS方程和 $k-\epsilon$ 湍流模型, 以VOF方法处理自由表面。通过对不同工况的数值模拟和试验结果比较, 验证了模型的可靠性, 得到波浪对结构物底面冲击过程的流场变化特性。然后分别讨论了波陡、平板离开水面距离和板宽等因素对结构物底面水质点最大垂向运动速度的影响, 并研究了水质点运动速度和冲击压力之间的关系。

关键词: FLUENT; 规则波; 透空式建筑物; 波浪冲击; 速度矢量

中图分类号: TU 35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0052-05

Numerical simulation of flow field in the process of wave impact on open-piled structures

JIN Feng^{1,2}

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Naval Architecture and Ocean Engineering Department, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: In order to study the characteristics of flow field in the process of wave impact, two-dimensional regular wave numerical models are established based on the software FLUENT. RANS equations are adopted. The standard $k-\epsilon$ equations are used to close the Reynolds equations. VOF method is used to reconstruct the free surface. Through three typical cases of wave slamming on open-piled structures, the models are verified by experimental data and the flow field under the structure is displayed visually. Then the parametric studies are carried out for different wave steepness, relative clearance and relative structure width. Furthermore, the relationship between the velocities of the water particle and the impact pressures is studied based on the probability analysis.

Key words: fluent; regular wave; open-piled structure; wave slamming; velocity vectors

近海人工岛、采油平台、开敞式码头和海上栈桥等透空式建筑物的安全与波浪冲击作用关系很大。近年来, 波浪冲击荷载的预报在海岸和近海工程设计中越来越受到重视。已有的研究多采用半理论半经验的方法, 即用基本假定建立数学模型, 得出经验公式, 再用模型试验确定经验系数。而随着计算机和各种数值计算方法的发展, 数值模拟逐渐成为研究波浪冲击问题的另一种重要方法。王永学^[1]采用VOF方法得到了非线性波浪对结构物的冲击压力分布特征, 并讨论了结构

物离开水面距离等参数对波浪冲击压力的影响。Baarholm等^[2-3]基于势流假定, 采用非线性边界元法研究了二阶斯托克斯波对平板结构的冲击问题。Iwanowski等^[4]应用VOF方法建立了二维和三维模型, 并将数值计算结果与Kaplan等的结果进行了比较。任冰等^[5]应用改进的VOF方法研究了随机波对开敞式结构物的冲击压力特性。Kleefsman等^[6-7]介绍了用于求解波浪冲击问题的改进的VOF方法——Comflow。Li^[8]采用高度-通量方法追踪自由表面, 应用有限元方法研究了椭圆余弦波对结

收稿日期: 2012-09-03

作者简介: 金凤(1980—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事港口海岸及近海工程方面研究。

构物的上托力随时间的变化。Brodtkorb^[9]以五阶斯托克斯波为入射波,应用Comflow法研究了波浪作用下以及波流联合作用下固定导管架平台所受的水平力和上托力。李雪临^[10]利用数值模型对波浪冲击过程的压力变化特性、流场变化特性以及二者之间的关系进行了统计分析。可见,现阶段的数值模拟研究大多是对波浪冲击过程的压力变化特性进行研究,而对结构物附近的流场变化特性以及流场与冲击压力之间的关系方面的研究成果还较少。另外,VOF方法被用来研究波浪的冲击问题,在模拟波浪冲击过程的随机性、冲击压力的峰值和负压力过程以及不同入射波要素对冲击压力的影响等方面有成功的应用,有必要在此基础上发展数学模型,加深对波浪冲击过程中流场变化的特性研究。

本文应用FLUENT软件建立规则波与平板结构相互作用的二维数学模型,以RANS方程为控制方程,用 $k-\varepsilon$ 模型来封闭湍流模型,采用VOF法处理自由表面。通过数值模拟计算,得到波浪对结构物底面冲击过程的流场变化特性,并且研究波陡等因素对结构物底面水质点最大垂向运动速度的影响规律及水质点运动速度和冲击压力之间的关系。

1 数学模型与模型验证

1.1 数学模型

考虑不可压缩流体、二维非定常带自由液面流动。连续方程和动量方程分别为:

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho f_i + F_i \quad (2)$$

式中: $x_i(i=1,2)$ 表示二维笛卡儿坐标系下的空间坐标; $u_i(i=1,2)$ 为速度分量; ρ 为流体的密度; t 为时间; μ 为动力学黏性系数; f_i 为体积力(这里仅为重力); F_i 为附加源项。

1.2 边界条件

数值造波采用给定流速和波高的设置造波边

界法^[11],根据小振幅波线性理论的解析解,来给定造波边界上的值,以此产生一系列规则波。数值消波采用董志等^[11]的多孔介质模型,即在动量方程中增加动量衰减源项达到消能作用。

图1为数值波浪水槽模型。其中左侧为造波边界,右侧和上部为对称边界,下部为固壁边界。文中所模拟的水槽参数与实际水槽相近,其长度取为45 m,右侧10 m区域用于源项消波。平板厚0.015 m,长度为1.02 m, Δh 为平板离开水面的距离(超高),板底部压强测点与左端部距离为0.035 m。由于波浪冲击到结构物底面的水质点垂向运动速度变为零,这里速度测点取在压强测点下0.005 m处。

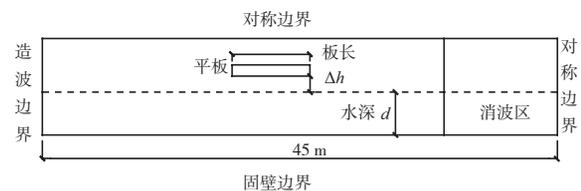


图1 数值波浪水槽

生成二维数值水槽计算网格时,在竖向上,为了能够准确计算表面波的形状和变形,在自由表面附近将网格加密,即在波高范围内每个单元为 $\Delta x=1.5$ cm,以外逐渐变疏;在横向上,由于平板附近物理量和梯度可能会发生较大的变化,流动情况较复杂,所以这个区域也进行了网格加密,每个单元为 $\Delta y=3.4$ cm,其他为 $\Delta y=10$ cm。水的密度 $\rho=1$ g/cm³;重力加速度 $g=980$ cm/s²;运动黏滞系数 $\nu=0.010 02$ cm²/s。

1.3 数值模型的验证

物理模型试验是在河海大学严恺馆波浪水槽内进行,水槽宽1.0 m,高1.2 m,长80 m。水槽工作段在纵向预先被分隔成两个部分,试验段设在其中一部分,另一部分用以扩散二次反射波能。水槽两端均铺设消浪缓坡,并在一端设有推板造波机。聚氯乙烯试验平板放置在试验段的中部,板底部安装有点压强传感器探头。采用南京水利科学研究院研制的计算机系统控制造波和数据采集,采用北京水利水电科学院生产的DJ800型多功能监测系统压力测量,传感器的背景压力是

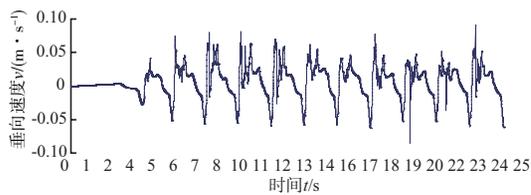
大气压力。每组试验重复2次，特征值是根据连续12个波的冲击压峰值计算求得。

利用所建的数值模型对3种工况的波浪冲击过程进行模拟，表1给出了数值模拟和试验的统计结果，结果表明建立的规则波数值波浪水槽可以有效地进行波浪冲击作用模拟。选取冲击压峰值的平均值作为分析波浪冲击特性指标，水质点垂向速度峰值的平均值作为分析流场变化特性的

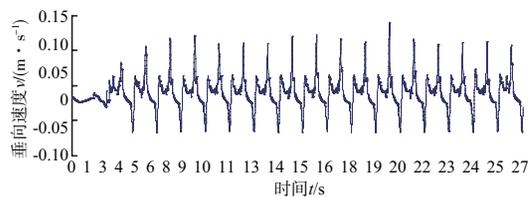
指标。图2为模拟所得的水质点垂向速度的历时曲线，可见水质点垂向速度与冲击压强的历时曲线相类似。图3为工况1不同时刻波浪冲击过程的流场矢量，直观地显示了波浪对结构物底面冲击过程的流场变化特性，即冲击发生时刻水质点斜向上运动冲向结构物底面，其后冲击到结构物下面的水体以很大的水平速度沿着结构物底面向前水平运动，且逐渐与结构物底面脱离。

表1 数值模拟和试验的统计结果比较

工况	板底冲击压特征值		最大值/kPa	最大值误差/%	1/3峰值/kPa	1/3峰值误差/%	平均峰值/kPa	平均峰值误差/%
1	水深 $d=50$ cm, 波高 $H=0.15$ m, 周期 $T=1.5$ s, $\Delta h/H=0.3$	试验1	4.193 2	45.1	2.730 2	26.2	1.663 2	8.6
		试验2	2.871 0	19.8	2.553 5	21.0	1.712 8	11.2
		模拟	2.302 4		2.016 2		1.520 7	
2	水深 $d=60$ cm, 波高 $H=0.15$ m, 周期 $T=2.0$ s, $\Delta h/H=0$	试验1	1.328 0	17.6	1.130 3	12.5	0.991 1	17.9
		试验2	1.180 0	32.3	1.074 8	18.3	0.949 1	23.1
		模拟	1.561 3		1.271 1		1.168 8	
3	水深 $d=40$ cm, 波高 $H=0.10$ m, 周期 $T=1.5$ s, $\Delta h/H=0.4$	试验1	1.498 0	14.0	1.189 4	0.9	0.800 6	27.2
		试验2	1.218 1	5.8	1.117 8	7.3	0.846 9	20.3
		模拟	1.288 4		1.199 8		1.018 7	

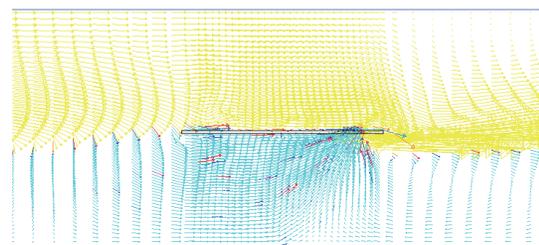


a) 工况2

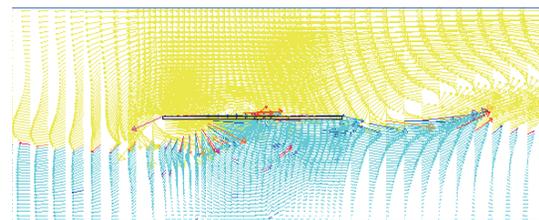


b) 工况3

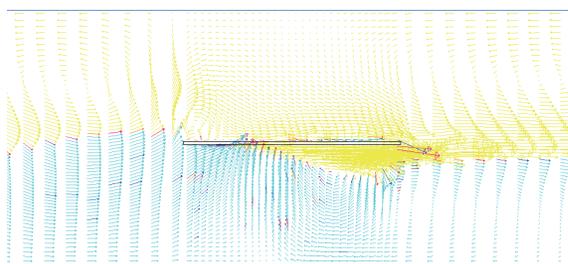
图2 水质点垂向速度历时曲线



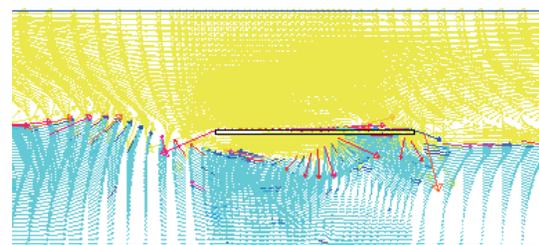
b) $t=16.6$ s



c) $t=17.05$ s



a) $t=16.25$ s



d) $t=17.5$ s

图3 工况1不同时刻波浪冲击过程的流场矢量

2 数值计算结果分析

2.1 波陡 H/L 对水质点最大垂向运动速度的影响

图4为不同水深时最大垂向速度随波陡变化的数值计算结果。虽然最大垂向速度与波陡的关系随相对水深、波高有所不同，但其曲线的形式基本类似。此外，最大垂向速度与波陡的关系随相对超高的不同也有所不同，表现为在不同的超高处对应最大垂向速度峰值点的波陡值不同，这是因为波浪冲击角度由超高和波陡联合确定，因此超高改变了，同一冲击角度对应的波陡也会不同，此外超高不同时，板下空气层对冲击角度和波浪冲击的影响也不一样，这些因素综合起来就造成了最大垂向速度随波陡变化的关系虽然大的趋势上有一定的规律性，但还是显得有些杂乱。

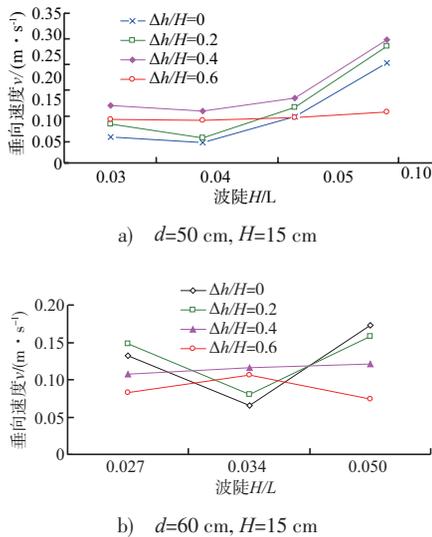


图4 波浪作用下结构物底面水质点的最大垂向运动速度与波陡的关系

2.2 相对超高对水质点最大垂向运动速度的影响

图5给出了结构物底面水质点的最大垂向运动速度与相对超高之间的关系。最大垂向速度随超高增大而增大，在某一值处达到最大，然后随超高增大而减小，该峰值点所在位置比较多地出现在相对超高为0.3~0.4处。超高比较小时，波浪冲击速度较大，波浪动力大，但此时波浪冲击角度也大，板下封闭的空气层对波浪的冲击有一个缓冲的气垫作用，会减弱波浪对板的冲击；超高比较大时，波浪冲击速度比较小，波浪动力小，但此时冲击角度小，板下空气逸出，气垫作用减

弱，波浪直接冲击到板上，使得作用强度比较大。由于以上因素共同作用，而各因素在对波浪冲击的影响程度上所占比例不一样，因此最终峰值点出现的位置并不确定，根据模拟可知范围大致在相对超高为0~0.4，比较多地出现在相对超高0.3~0.4处，此结果与相对冲击压随相对超高变化规律相同。

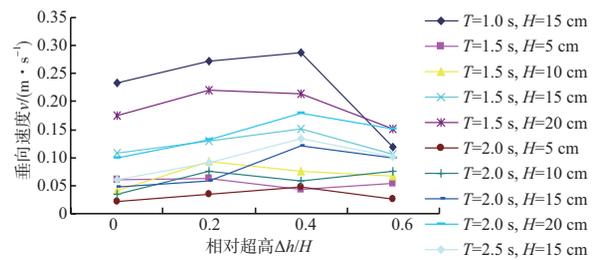


图5 波浪作用下结构物底面水质点的最大垂向运动速度与超高的关系 ($d=50$ cm)

2.3 相对板宽对水质点最大垂向运动速度的影响

图6给出了结构物底面水质点的最大垂向运动速度与相对板宽的关系。结果表明，结构物底面水质点的最大垂向运动速度随相对板宽的增大而减小，这与相对冲击压随相对板宽变化的规律基本相同。

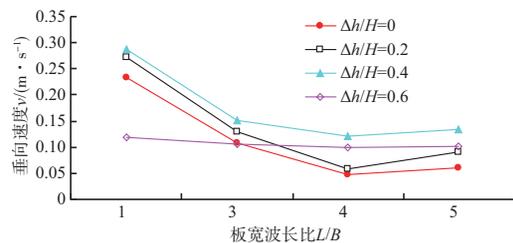
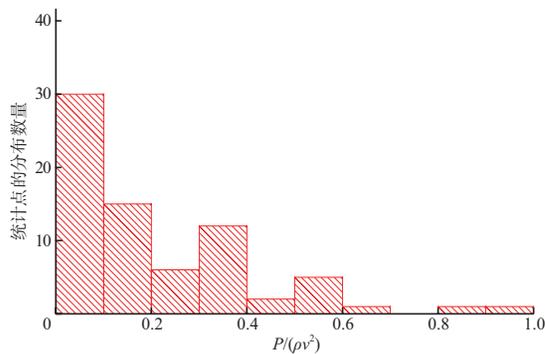


图6 规则波作用下结构物底面水质点的最大垂向运动速度与结构相对宽度的关系 ($d=50$ cm)

2.4 冲击压力峰值与水质点垂向运动速度统计值之间的关系

对以上数值模拟的结果进行统计分析，可以得到波浪作用下结构物底面不同测点处的冲击压力峰值 P 和对应测点处的水质点垂向运动速度的平方 v^2 之间的关系。图7根据不同模拟组次的 $P/(\rho v^2)$ 值出现频率给出了统计分布直方图。经分析可知， $P/(\rho v^2)$ 出现的最大频率在0.05左右， $P/(\rho v^2)$ 的值位于0~0.25的概率大于0.70。换言之，在模拟组次的大多数情形下，当波浪刚接触到结构物底

部所产生的冲击压力峰值 P 大约是 $0 \sim 0.25\rho v^2$ 。



注：压强单位为kPa，速度单位为m/s。

图7 $P/(\rho v^2)$ 的统计分布直方图

3 结语

文中建立的规则波数值波浪水槽可以有效地进行波浪冲击作用模拟。波陡、相对超高和相对板宽各因素对结构物底面水质点最大垂向运动速度的影响，与对相对冲击压的影响规律基本相同。即最大垂向运动速度与波陡关系中，曲线的形式较为一致，但不同的超高处对应最大垂向运动速度峰值点的波陡值不同；最大垂向运动速度与相对超高之间的关系中，峰值点多出现在相对超高为 $0.3 \sim 0.4$ 处；最大垂向运动速度随相对板宽的增大而减小。并且通过分析水质点运动速度和冲击压力之间关系，得到波浪刚冲击到结构物底面瞬间时的波浪冲击压力峰值与水质点垂向运动速度之间的关系，即 $P/(\rho v^2)$ 出现的最大频率在 0.05 左右， $P/(\rho v^2)$ 的值位于 $0 \sim 0.25$ 的概率大于 0.70 。

致谢：感谢河海大学严以新教授、郑金海教授具有启发性的建议和意见。感谢河海大学严士常讲师提供了完整的试验资料。

参考文献：

- [1] 王永学, 任冰. 波浪冲击过程的湍流数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 1999, 14(4):409-417.
- [2] Baarholm R, Faltinsem O M. A boundary element method for solving water impact on a platform deck[C]// Subrata K Chakrabarti. 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2001.
- [3] B Baarholm R, Faltinsem O M. Wave impact underneath horizontal Decks [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2004(9):1-13.
- [4] Wanowski B, Grigorian H, Scherf I. Subsidence of the ekofisk platforms: wave in deck impact study. Various wave models and computational methods[C]//Subrata K Chakrabarti. 21th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2002.
- [5] Ren B, Wang Y X. Numerical simulation of random wave slamming on structures in the splash zone [J]. Ocean Engineering, 2004, 31:547-560.
- [6] Kleefsman K M, Fekken G, Veldman E P, et al. An improved volume-of-fluid method for wave impact problems[C]// Tetsuo Yamazaki. 14th International Offshore and Polar Engineering Conference. USA:International Society of Offshore and Polar Engineers, 2004:334-341.
- [7] Kleefsman T, Loots E, Veldman A, et al. The numerical simulation of green water loading including the vessel motions and the incoming wave field[C]// Subrata K Chakrabarti. 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2005.
- [8] LI L. Numerical prediction of impulsive uplift loads produced by cnoidal waves impacting coastal structures[C]//Tetsuo Yamazaki. 16th International Offshore and Polar Engineering Conference. USA:International Society of Offshore and Polar Engineers, 2006:528-535.
- [9] Bordtkorb B. Prediction of wave-in-deck forces on fixed jacket-type structures based on CFD calculations[C]// Subrata K Chakrabarti. 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2008.
- [10] 李雪临. 波浪冲击过程的流场变化特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [11] 董志, 詹杰民. 基于VOF方法的数值波浪水槽以及造波、消波方法研究[J].水动力学研究与进展: A辑, 2009, 24(1):15-21.

(本文编辑 武亚庆)