



# 波浪对平板结构冲击作用数值模拟

金凤<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 交通与海洋工程学院, 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 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 以VOF方法处理自由表面。对3种典型工况下的冲击过程进行数值模拟, 验证了模型的可靠性, 并确定冲击压峰值的平均值作为波浪冲击特性指标。通过大量的数值计算, 分别对波陡、平板离开水面距离和板宽等因素对波浪冲击作用的影响进行了分析讨论, 并与试验结果进行比较。

**关键词:** fluent; 规则波; 透空式建筑物; 波浪冲击

中图分类号: TU 35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0007-05

## Numerical simulation of wave slamming on open-piled structures

JIN Feng<sup>1,2</sup>

(1. College of Traffic and Ocean 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 specialties of wave slamming on open-piled structures, two-dimensional regular wave numerical models were established based on the software FLUENT. RANS equations were adopted. The standard  $k-\varepsilon$  equations were used to close the Reynolds equations. VOF method was used to reconstruct the free surface. Through three typical cases of wave slamming on open-piled structures were reproduced, the models were verified by experimental data and the average of peak impact pressure was chosen as the characteristic impact pressure. Then with plentiful simulation the parametric studies had been carried out for different wave steepness, structure geometry and the distance between underside of structure and still water level. Good agreements between the numerical and experimental results were obtained.

**Key words:** FLUENT; regular wave; open-piled structure; wave slamming

在海岸和近海工程中, 位于浪溅区的建筑物, 如码头、人工岛、栈桥、海上平台等, 其安全与波浪冲击作用关系很大。由于波浪冲击面板过程的机理极其复杂, 涉及到波浪的强非线性、瞬时效应、流体黏性、湍流、水气掺混等因素<sup>[1]</sup>。现阶段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, 但已有成果对波浪冲击过程的认识还远远不够。

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一种重要方法。王永学<sup>[1]</sup>采用VOF法得到了非线性波浪对结构物底面的冲击压力分布特征, 并讨论了结构物离开水面的距离等参数对波浪冲击压力的影响。Baarholm 等<sup>[2-3]</sup>基于势流假定, 采用非线性边界元方法研究了二阶Stokes波对固定水平板结构的冲击问题。Iwanowski等<sup>[4]</sup>应用VOF方法建立二维模型FSWL-2D和三维模型FLOW-3D, 将数值计算结

收稿日期: 2012-03-08

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。

果与Kaplan等人的结果进行了比较。任冰等<sup>[5]</sup>应用改进的VOF方法建立了求解随机波浪冲击作用的数值模型,研究了随机波对开敞式结构物的冲击压力特性。Kleefsman等<sup>[6-7]</sup>介绍了用于求解波浪冲击问题的改进的VOF方法-Comflow。Li<sup>[8]</sup>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构物的上托力随时间的变化。Brodtkorb<sup>[9]</sup>以五阶stokes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。与模型试验相比,数值模拟消除了比尺效应,投资较少,周期较短,且易于改变各类参数条件,但其局限性主要在于理论模型的选择是否合理以及计算方法是否有效。

本文应用FLUENT软件建立波浪与结构物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。通过大量的数模计算,得到规则波对平板结构底面冲击压力幅值的定量分析成果,对平板离开水面的距离 $\Delta h$ 等参数对冲击压力的影响进行分析讨论,并与试验值进行比较验证。

## 1 数学模型与模型验证

### 1.1 控制方程

数值计算中采用RANS方程作为控制方程,VOF方法跟踪自由液面, $k-\varepsilon$ 模型来封闭湍流模型。

连续方程和动量方程分别为:

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

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

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; $\rho$ 为流体的密度; $t$ 为时间; $\mu$ 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,以此产生一系列规则波。数值消波采用董志等<sup>[10]</sup>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。源项表达式为:

$$S_i = -\left( \frac{\mu}{\alpha} u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |u| u_i \right) \quad (3)$$

式中: $-\frac{\mu}{\alpha} u_i$ 为黏性损失项; $-C_2 \frac{1}{2} \rho |u| u_i$ 为惯性损失项, $|u|$ 为速度大小, $u_i$  ( $i=1,2$ )为两个方向上的速度分量; $1/\alpha$ 和 $C_2$ 为常数。

数值计算区域如图1所示。数值波浪水槽左侧设为造波边界,右侧和上部设为对称边界,下部设为固壁边界。水槽长度取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, $\Delta h$ 为平板离开水面的距离,板底部测点与左端部距离为0.035 m。

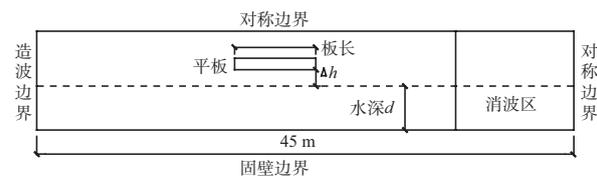
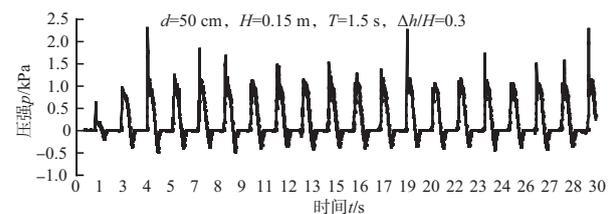


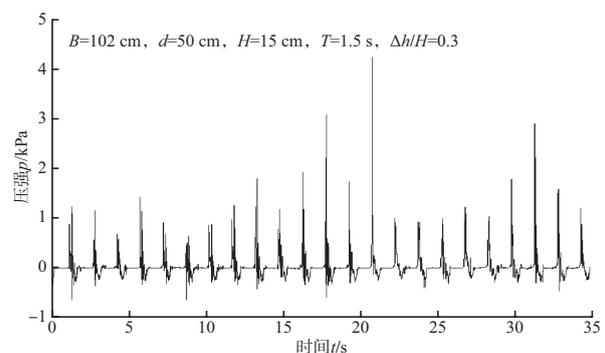
图1 数值计算区域

### 1.3 数值模型的验证

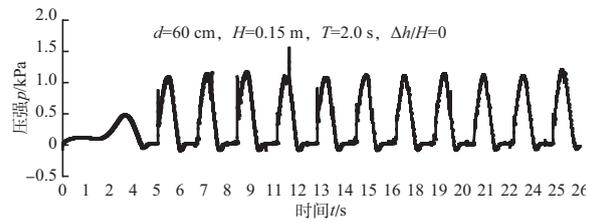
利用所建的数值模型对3种不同波况和 $\Delta h$ 情况下波浪冲击过程进行模拟,图2为数值模拟和试



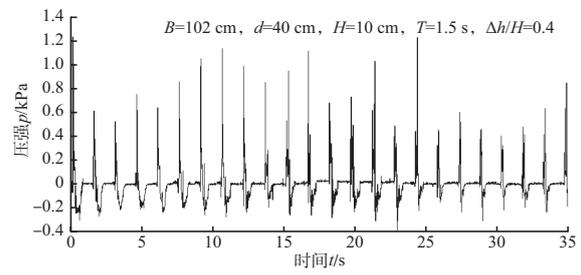
a) 工况1模拟结果



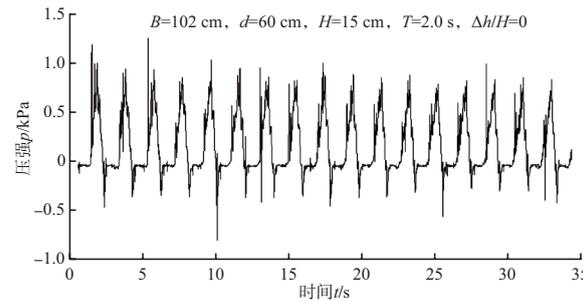
b) 工况1试验结果



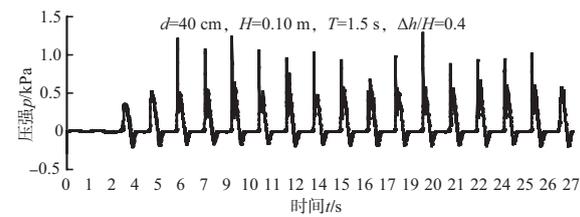
c) 工况2模拟结果



f) 工况3试验结果



d) 工况2试验结果



e) 工况3模拟结果

图2 3种典型工况下冲击压强历时曲线比较

验所得的冲击压强历时曲线比较,表1给出了数值模拟和试验的统计结果,其中每组试验重复2次,特征值是根据连续12个波的冲击压峰值计算求得。比较结果表明: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,由于峰值平均值和1/3大值表现比较稳定,文中取冲击压峰值的平均值作为分析波浪冲击特性指标。

## 2 波浪冲击特性

### 2.1 波陡H/L的影响

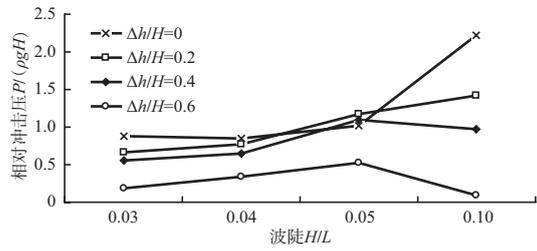
图3,4为不同水深时最大相对冲击压随波陡变化的数值计算和试验结果比较。虽然最大相

表1 数值模拟和试验的统计结果比较

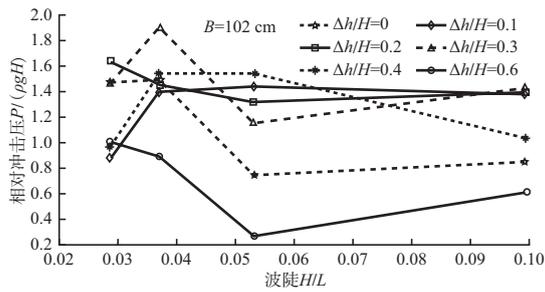
工况	水深d/cm	波高H/m	周期T/s	$\Delta h/H$	试验或模拟	最大值/kPa	最大值误差/%	1/3峰值/kPa	1/3峰值误差/%	平均峰值/kPa	平均峰值误差/%
1	50	0.15	1.5	0.3	试验1	4.193 2	45.1	2.730 2	26.2	1.663 2	8.6
					试验2	2.871 0	19.8	2.553 5	21.0	1.712 8	11.2
					模拟	2.302 4		2.016 2		1.520 7	
2	60	0.15	2.0	0	试验1	1.328 0	17.6	1.130 3	12.5	0.991 1	17.9
					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	40	0.10	1.5	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	

对冲击压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,都具有指数函数关系。当波陡 $H/L$ 超过某一值时,相对冲击压随波陡的增加而减小;当其小于这一值时,相对冲击压反而随波陡的减小而减小。此外,最大相对冲击压与波陡的关系随平板相对高度( $\Delta h/H$ )的不同也有所不同,表现为在不同的 $\Delta h$ 处对应最大冲

击压峰值点的波陡值不同,这是因为波浪冲击角度由 $\Delta h$ 和波陡联合确定,因此 $\Delta h$ 改变了,同一冲击角度对应的波陡也会不同,此外 $\Delta h$ 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相对冲击压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。

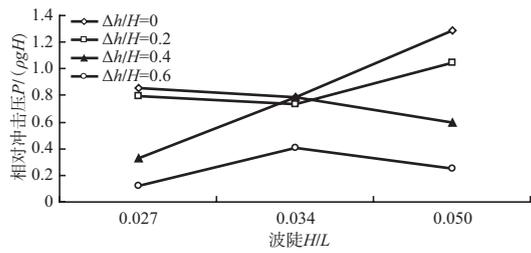


a) 模拟结果

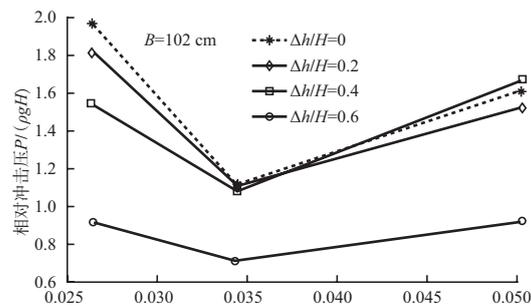


b) 试验结果

图3 数值计算和试验冲击压结果比较( $d=50$  cm,  $H=15$  cm)



a) 模拟结果



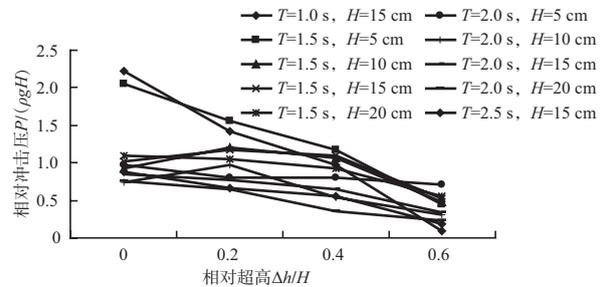
b) 试验结果

图4 数值计算和试验冲击压结果比较( $d=60$  cm,  $H=15$  cm)

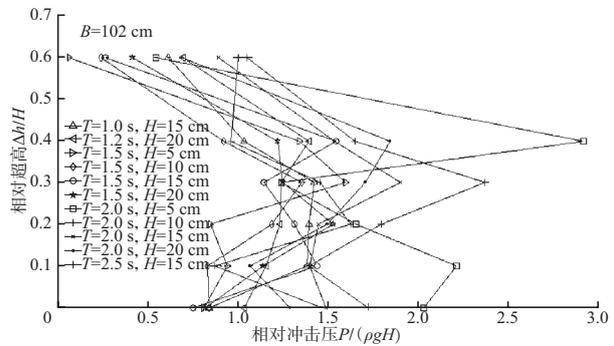
### 2.2 $\Delta h$ 的影响

图5为相对冲击压随平板相对高度变化的数值计算和试验结果比较。可见相对冲击压与相对高度之间也存在着指数函数关系。相对冲击压随 $\Delta h$ 增大而增大,在某一值处达到最大,然后随 $\Delta h$ 增大而减小,该峰值点所在位置比较多的出现在相对高度为0.3~0.4处。 $\Delta h$ 比较小时,波浪冲击速度大,波浪动力大,板上冲击压强应该比较大,但此时波浪冲击角度也大,大的冲击角对应的冲

击压强却是比较小的,此外,板下封闭的空气层对波浪的冲击有一个缓冲的气垫作用,也会减弱波浪对板的冲击。 $\Delta h$ 比较大时,波浪冲击速度比较小,波浪动力小,冲击压强会有所减小,但此时冲击角度小,冲击压强又会增强,同时,板下空气逸出,气垫作用减弱,波浪直接冲击到板上,使得作用在板上的冲击压强比较大。由于以上几个因素共同作用,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,根据模拟和试验可知范围大致在相对高度为0~0.4,比较多的出现在相对高度0.3~0.4处。



a) 模拟结果

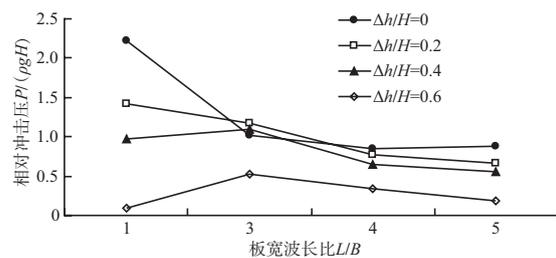


b) 试验结果

图5 数值计算和试验冲击压结果比较( $d=50$  cm)

### 2.3 板宽B的影响

图6为相对冲击压随相对板宽变化的数值计算和试验结果比较。板宽增加或减小到一定值时冲击压强的变化不大,其上限或下限值随 $\Delta h$ 不同是



a) 模拟结果

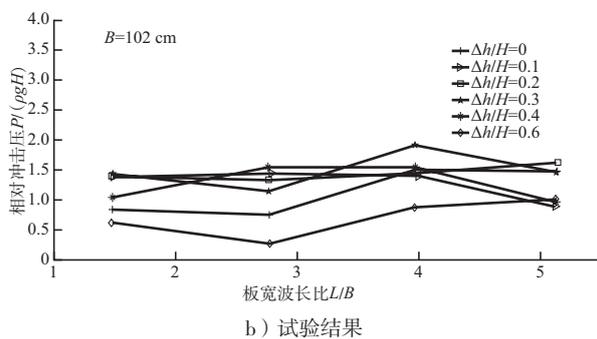


图6 数值计算和试验冲击压结果比较( $d=50\text{cm}$ )

变化的。总的来说,随着相对板宽的增加,相对冲击压减小,但变化幅度不大,并且数值都在同一量级,因此,认为板宽对相对冲击压大小的影响有限。

### 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。由于统计的峰值平均值和1/3大值表现比较稳定,可以作为分析波浪冲击特性的指标。

对于波陡、 $\Delta h$ 和板宽各因素对波浪冲击作用的影响,数值计算结果与试验结果较为吻合。

最大相对冲击压与波陡具有指数函数关系,但不同的 $\Delta h$ 处对应最大冲击压峰值点的波陡值不同;最大相对冲击压与平板相对高度之间也存在着指数函数关系,峰值点多出现在相对高度为0.3~0.4处;板宽对相对冲击压大小的影响有限,在计算中可以不予考虑。

**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] Baarholm R, Faltinsem O M. Wave impact underneath horizontal decks [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2004(9):1-13.
- [4] Iwanowski B, Grigorian H, Scherf I. Subsidence of the ekofisk platforms: Wave in deck impact study. Various wave models and computational methods[G]// 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] //14th International Offshore and Polar Engineering Conference. California, 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[G]// 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]// 16th International Offshore and Polar Engineering Conference. California, 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[G]// Subrata K Chakrabarti 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2008.
- [10] 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 )