



# 规则波下码头面板底部冲击压强分布数值模拟\*

金凤, 万超

(江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003)

**摘要:** 采用计算机数值模拟方法, 在 FLUENT 软件计算平台上建立了二维规则波数值波浪水槽, 对透空平板、有梁面板结构底面受到的波浪冲击压强分布情况进行研究。数学模型采用 RANS 方程和  $k-\varepsilon$  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, 验证了模型的造消波性能和应用的有效性。然后通过计算, 得到了波浪冲击过程中面板底部冲击压强的分布规律, 并对数据进行了分析和统计, 提出了面板底面冲击压强分布宽度的拟合公式, 作为工程设计的参考。

**关键词:** FLUENT; 规则波; 平板结构; 梁板结构; 冲击压强; 分布宽度

中图分类号: TU 35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0029-06

## Simulation of wave impact pressure's distribution on panel structure

JIN Feng, WAN Chao

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

**Abstract:** To study the specialties of wave slamming on horizontal plate structures and beam-plate structures, we establish two-dimensional regular wave numerical models based on software FLUENT. Adopting RANS equations and standard  $k-\varepsilon$  equations and using the VOF method, we reconstruct the free surface. Through typical cases of wave slamming on panel structures are reproduced, and the models are verified by experimental data. Then with plentiful simulation the impact pressure distribution rules during slamming are obtained. The statistical distribution data are analyzed and the fitting formula of distribution width is put forward, which may serve as reference for the engineering design.

**Keywords:** FLUENT; regular wave; horizontal plate structure; beam-plate structure; impact pressure; distribution width

对近海码头面板结构进行设计时, 首先要考虑的问题是较准确地计算出各种波况条件下不同高程的上托力大小。而对于最大总上托力, 其值是由压强和压强分布宽度决定的。有关冲击压强分布宽度的研究, 合田良实<sup>[1]</sup>采用试验方法, 通过假定波浪上托力压强分布宽度为  $L/4$ , 建立了上托力总压力值和栈桥面板设计高程的关系式。我国《海港码头设计手册》<sup>[2]</sup>建议采用板宽作为分布宽度。WANG 等<sup>[3-5]</sup>试验研究了随机波对结构物的

冲击问题, 指出了冲击压沿板宽方向上的分布特征。周益人等<sup>[6-7]</sup>进行了物理模型试验, 根据线型波理论给出了波浪与结构物接触宽度  $x$  的关系公式, 认为当压强为均匀分布时, 分布宽度为  $x/2$ , 当为冲击型分布时, 分布宽度为  $x/20$ 。陈国平等<sup>[8]</sup>试验研究了波浪对高桩码头面板上托力计算内容, 认为发生较大波浪冲击力时的压强分布主要有均匀型分布、冲击型分布两类, 且多数为均匀型分布。均匀型对应的分布宽度约为  $x/2$ , 冲击型对应

收稿日期: 2015-10-27

\*基金项目: 江苏镇江江苏科技大学 博士科研启动项目 (1012921415)

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

的分布宽度约为  $x/10$ 。可见，对波浪作用下面板上压强分布宽度的相关研究中，各家说法不一，有的采用板宽，有的采用  $1/4$  波长，有的则采用接触宽度来计算。而采用板宽和  $1/4$  波长的方法不是很合理。采用板宽，意味着板宽越大，作用在面板上的总力越大。事实是，板宽达到一定值，随板宽增大总力不再增大，这时如采用板宽为分布宽度就会使计算结果偏大。采用  $1/4$  波长作为分布宽度同样存在问题，对不同超高而言，分布宽度是固定的，而事实上超高较大时，分布宽度很小，也会因此造成计算结果偏大的问题。不难理解，波浪冲击到面板上，其压力作用范围与波浪在板上的接触宽度是密切相关的，所以将波浪在板上的接触宽度作为确定分布宽度的要素是较为合理的。

以往的波浪作用研究多采用物理模型试验的方法<sup>[11]</sup>，但当前的试验设备和条件仍存有限制，比如试验中压强传感器布置受限，较大冲击压强在板上的分布通常仅对应于板上一个测点，难以精确得出其分布宽度，只能对所有组次的试验结果进行概化处理，得到最大冲击压强对应的分布宽度公式。因此有必要寻求其他有效方法验证试验结果或提出更合理可靠的计算公式。数值模拟方法在一定程度上克服了模型试验的局限，可以与试验研究相互验证、相互补充，逐渐成为研究波浪作用问题的另一种重要方法。

本文主要采用数值模拟方法，并在分析中结合文献物理模型试验结果。应用 FLUENT 软件建立规则波与平板、有梁面板结构相互作用的二维数学模型，模拟波浪冲击面板结构的过程。探讨波浪冲击码头面板底部冲击压强的分布规律，提出面板底面冲击压强分布宽度公式，以更准确地预报波浪的冲击荷载，深入认识波浪冲击机理。

### 1 数值波浪水槽的建立与验证

#### 1.1 数学控制方程

考虑不可压缩流体，二维非定常带自由液面流动，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、 $k-\epsilon$  模型来封闭湍流模型。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2\delta_{ij}}{3} \cdot \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) + \rho f_i + F_i$$

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 水槽边界条件及参数

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>[9]</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：

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

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。

数值波浪水槽参数与物理模型试验水槽<sup>[8]</sup>基本一致，其计算区域见图 1。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。水槽长度为 45 m，水深  $d$  为 0.5 m，右侧 10 m 区域用于源项消波，其长度约为 3 个代表波长。平板厚 0.015 m，长度  $B$  为 1.02 m， $\Delta h$  为平板在静水面上的超高。沿板底部纵向等间距设置 20 个压力测点，间距为 0.05 m，测点与端部距离为 0.035 m。

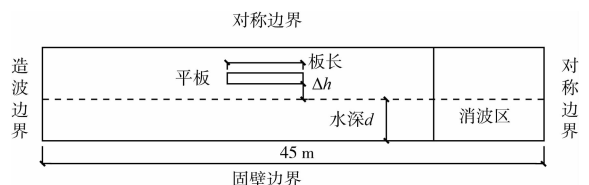
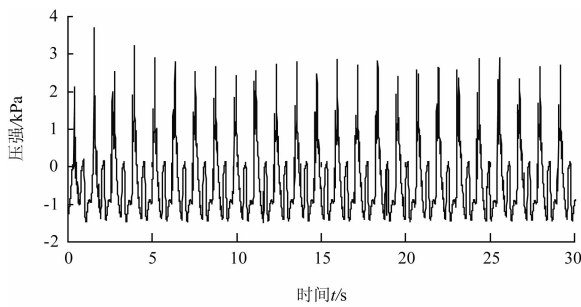


图 1 数值计算区域

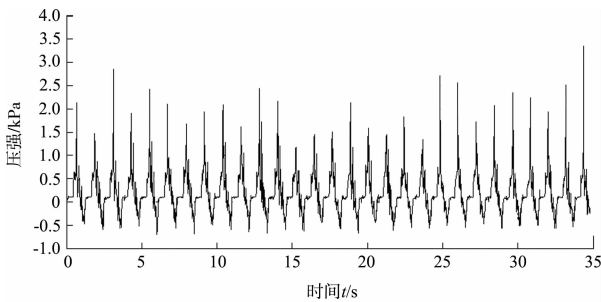


表1 数值模拟和试验的统计结果比较

工况	特征值				试验类型	压强/kPa		
	$d/cm$	$H/m$	$T/s$	$\Delta h/H$		最大值	1/3 峰值	平均峰值
1	50	0.20	1.2	0.2	试验1	2.682 0	2.545 0	2.435 5
					试验2	2.512 8	2.492 8	2.432 1
					模拟	2.380 8	2.340 6	2.162 7
2	50	0.15	2.0	0.3	试验1	0.818 0	0.711 5	0.622 8
					试验2	0.926 0	0.769 8	0.665 3
					模拟	1.789 7	1.714 3	1.459 4
3	50	0.10	1.0	0	试验1	0.874 2	0.621 2	0.462 9
					试验2	0.605 4	0.507 9	0.439 3
					模拟	0.942 1	0.795 2	0.523 9



a) 工况1模拟结果

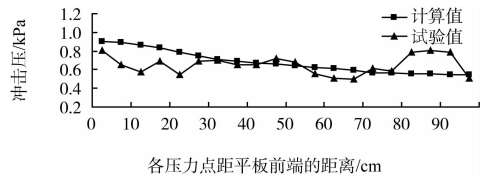


b) 工况1试验结果

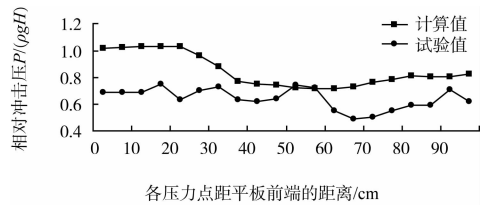
注:  $B=102\text{ cm}$ ,  $d=50\text{ cm}$ ,  $H=20\text{ cm}$ ,  $T=1.2\text{ s}$ ,  $\Delta h/H=0.2$ 。

图5 典型工况下冲击压强历时曲线比较

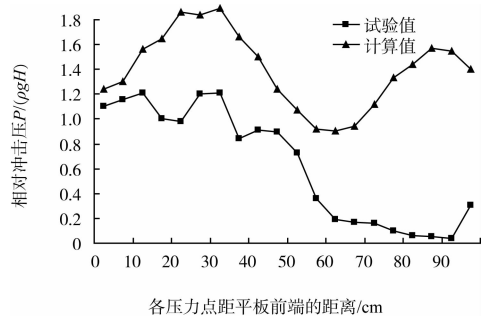
图6给出了几组工况下平板底冲击压强分布的数值计算和物理试验结果。可见两者反映出的压强分布情况较为一致。图中试验结果曲线波动较大、峰值较多,这可能与两种方法的建立基础有关,试验方法较能体现复杂的波浪现象,而数值模拟是通过合理的数值计算方法进行的研究,因此得到后者的计算曲线较为平顺。



a)  $d=50\text{ cm}$ ,  $T=1.5\text{ s}$ ,  $H=10\text{ cm}$ ,  $\Delta h/H=0$



b)  $d=50\text{ cm}$ ,  $T=1.5\text{ s}$ ,  $H=15\text{ cm}$ ,  $\Delta h/H=0$



c)  $d=50\text{ cm}$ ,  $T=1.5\text{ s}$ ,  $H=20\text{ cm}$ ,  $\Delta h/H=0.4$

图6 板底冲击压强分布数值计算和试验结果比较

## 2 板底面压强分布宽度模拟

文献[10]给出了波浪冲击平板过程中波高、周期和超高各因素对冲击压强分布的影响,得到了冲击压强在板底的分布规律。发生较大波浪冲击上托力时的压强分布主要有两种类型:一种是均匀

分布, 通常出现在平板前部; 另一种为局部冲击型分布, 通常对应着板上局部小范围为较大冲击压强。

以下在数值模拟时, 对板底部测点进行了加密, 即对于平板、有梁面板结构, 沿板底部纵向等间距设置 50 个压力测点, 间距为 0.02 m, 首个测点与前端部距离为 0.02 m, 以克服物理模型试验中压力测点布置的限制, 得到较为准确的结果。

通过试验和数值模拟发现, 波浪对面板发生冲击时在接触部分产生的瞬时冲击压强是很大的, 冲击很大的时候相对压强值往往超过 2, 而同时刻板上其他位置处的压强则是由缓变压强或比较小

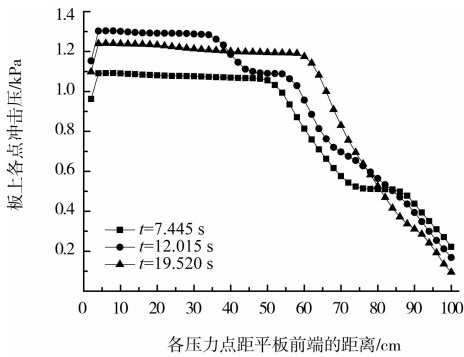
的冲击引起, 量值较小, 一般相对压强值小于 2, 在 1 左右甚至更小。对结构设计而言, 引起局部破坏的主要是量值比较大的冲击压强, 即相对冲击压大于 2 的部分, 因此需要知道这部分冲击压强对应的分布宽度。

图 7 给出了几个工况下, 平板底部某一测点发生较大冲击压强和冲击总力时同时刻压强沿板宽的分布。由此可以得到不同工况下, 发生较大波浪冲击压强时压强的分布宽度, 数值见表 2 中第 7 列。

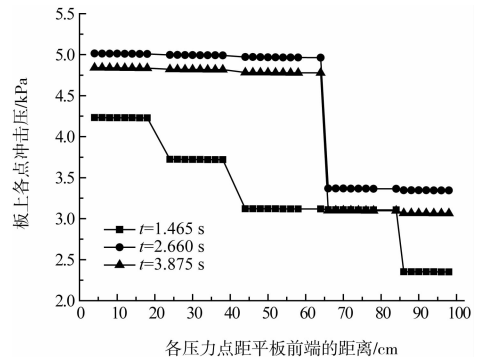
图 8 给出了几个工况下, 有梁面板底部某一测点发生较大冲击压强和冲击总力时同时刻压强沿板宽的分布, 具体分布宽度数值见表 2 中第 7 列。

表 2 冲击压强分布宽度情况

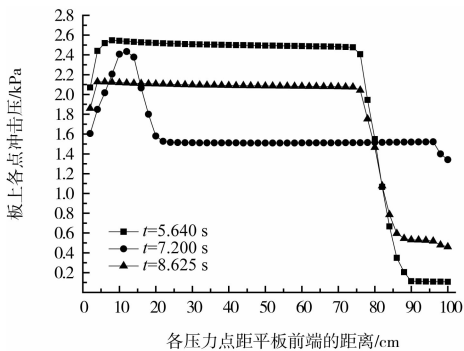
数据	H/m	波长/m	$\Delta h/H$	L/B	波浪在板上接触宽度 x/m	数值模拟结果 (取 3 个时刻)/m			x/2/m	L/4/m	公式结果/m
1	0.05	2.825	0.0	2.770	1.412	0.56	0.48	0.54	0.706	0.706	0.510
2	0.15	2.825	0.4	2.770	0.581	0.72	0.20	0.72	0.291	0.706	0.697
3	0.20	4.054	0.2	3.975	1.478	0.22	0.24	0.22	0.739	1.014	0.678
4	0.10	1.512	0.0	1.482	0.756	0.48	0.16	0.28	0.378	0.378	0.510
5	0.15	0.562	0.0	0.551	0.281	0.60	0.60	0.42	0.141	0.141	0.510
6	0.15	1.020	0.4	1.000	0.209	0.42	0.42	0.42	0.105	0.255	0.694
7	0.15	2.047	0.0	2.007	1.023	0.14	0.14	0.14	0.512	0.512	0.510
8	0.15	2.825	0.2	2.770	1.040	0.54	0.12	0.12	0.520	0.706	0.684



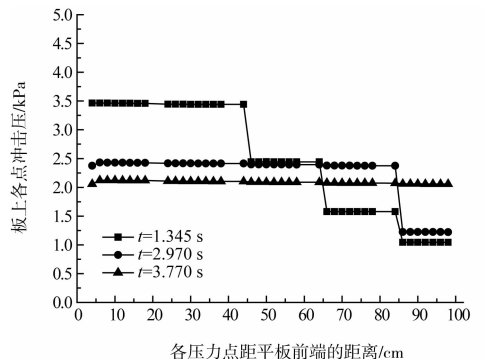
a) B=102 cm, d=50 cm, H=5 cm, T=1.5 s,  $\Delta h/H=0$



a) B=102 cm, d=50 cm, H=15 cm, T=0.6 s,  $\Delta h/H=0$



b) B=102 cm, d=50 cm, H=15 cm, T=1.5 s,  $\Delta h/H=0.4$



b) B=102 cm, d=50 cm, H=15 cm, T=0.81 s,  $\Delta h/H=0.4$

图 7 各工况同时刻压强在板上的分布

图 8 各工况同时刻压强在板上的分布

由二阶 stocks 波理论,  $x$  可写为:

$$x = \frac{L}{\pi} \arccos \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{8\pi H}{L} f\left(\frac{h}{L}\right) \left[ \frac{\pi H}{L} f\left(\frac{h}{L}\right) + \frac{2\Delta h}{H} \right]}}{\frac{4\pi H}{L} f\left(\frac{h}{L}\right)} \quad (4)$$

其中:

$$f\left(\frac{h}{L}\right) = \frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi h}{L} \left( \operatorname{ch} \frac{4\pi h}{L} + 2 \right)}{4 \left( \operatorname{sh} \frac{4\pi h}{L} \right)^3} \quad (5)$$

当相对超高不是很高时,  $x$  可以线性波理论近似算得, 即

$$x = \frac{L}{\pi} \arccos \frac{2\Delta h}{H} \quad (6)$$

综合平板、有梁透空面板结构各工况下得到的冲击压强分布结果, 分布宽度与波浪作用在板上的宽度  $x$ 、相对超高和相对板宽等因素相关, 这里对表中数值模拟数据进行拟合, 得到压强分布宽度  $X$  的表达式为:

$$X = \frac{x}{L/B} \left( e^{2\Delta h/H} \right)^{1.5} \quad (7)$$

应用拟合公式计算压强分布宽度, 结果见表 2 最后一列。可以看到, 拟合公式结果大部分大于或接近数值模拟分布宽度, 而  $x/2$ 、 $L/4$  结果偏差较大, 特别是相对板宽小于或等于 1 时, 因此认为分布宽度采用拟合公式是较为安全可行的。

### 3 结语

1) 文中建立的规则波数值波浪水槽可以较有效地进行波浪冲击作用模拟。统计的冲击压强峰值的平均值表现较稳定, 可以作为分析波浪冲击面板特性的指标。

2) 利用数值模拟优势, 克服了物理模型试验测点布置受限的缺点, 对板底面测点进行了加密 2.5 倍的处理, 得到了更为准确的计算结果。

3) 冲击压强分布宽度与波浪作用在板上的宽度、相对超高和相对板宽等因素相关。提出的压

强分布宽度拟合公式, 与原  $x/2$ 、 $L/4$  分布宽度比较, 认为拟合的分布宽度公式更为可靠。

### 参考文献:

- [1] 合田良实. 构造物に働く波力[C]//1967 年度水工学に関する夏期研修会講義集, B. 日本: 海岸港湾コース, 1967.
- [2] 交通部第一航务工程勘察设计院. 海港码头结构设计手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 1975.
- [3] Ren B, Wang Y X. Laboratory study of random wave slamming on a piled wharf with different shore connecting structures[J]. Coastal Engineering, 2005, 52: 463-471.
- [4] Ren B, Wang Y X. The study of impact pressure on the subface of open-piled structures induced by incident regular waves and irregular waves [J]. China Ocean Engineering, 2004, 18(1): 35-46.
- [5] Wang Y X, Ren B. Experimental study of irregular wave slamming [C]//Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference. Japan: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002: 492-495.
- [6] 周益人, 陈国平, 黄海龙, 等. 透空式水平板波浪上托力分布[J]. 海洋工程, 2003, 21(4): 41-47.
- [7] 周益人, 陈国平, 王登婷. 透空式水平板波浪上托力计算方法[J]. 海洋工程, 2004, 22(2): 26-30.
- [8] 陈国平, 孟艳秋. 不规则波作用下高桩码头面板上托力计算试验研究[R]. 南京: 河海大学, 2009.
- [9] 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.
- [10] Jin F. Simulation of wave slamming on open-piled structures based on FLUENT[C]// The 2nd International Conference on Civil Engineering and Transportation. Guilin: ICCET, 2013: 1 960-1 964.
- [11] Bradner C. Large-Scale Laboratory Observations of Wave Forces on a Highway Bridge Superstructure [D]. USA: Oregon State University, 2008.