

· 综合 ·



# 规则波对平板缓变压力作用数值模拟研究\*

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, 对透空平板结构底面受到的波浪缓变压力作用进行研究。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。首先对 3 组典型工况进行了模拟, 采用低通滤波器方法提取上托力信号的缓变部分, 通过数值模拟和试验结果比较, 验证了模型的有效性。然后讨论了波陡、超高和板宽等因素对面板底部所受的最大缓变压强的影响, 给出了便于工程应用的计算波浪上托力缓变压强的经验公式, 以供工程设计参考。

**关键词:** FLUENT; 规则波; 透空式建筑物; 平板结构; 缓变作用

中图分类号: TU 35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)02-0015-05

## Simulation of regular wave up-lift force on horizontal plate structures

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 up-lift force on horizontal plate structures, we establish two-dimensional regular wave numerical models based on the software FLUENT. RANS equations and standard  $k-\varepsilon$  equations are adopted and VOF method is used to reconstruct the free surface. Firstly, three typical cases of wave slamming on horizontal plate structures are simulated. Using the low-pass filter method, we obtain the slowly-varying sections from the up-lift force signals. Based on the comparison of the simulated and experimented results, we verify the effectiveness of the model. We also discuss the influence of wave steepness, structure geometry and the distance between underside of horizontal plate and still water level on the maximum slowly-varying force. Finally, the empirical slowly-varying force formulas are provided.

**Keywords:** FLUENT; regular wave; open-piled structure; horizontal plate structure; slowly-varying force

波浪对大尺度面板的作用是一个非常复杂的过程, 总体上波浪冲击压强历时曲线呈周期性变化, 每个周期内包括一个低频的缓变压力和一个高频的瞬时冲击压力(图1)。两者对结构的作用机理不尽相同, 缓变压力会造成结构的整体失稳, 而冲击压力会造成结构的局部损坏。国内外曾多次发生类似破坏的先例, 如 20 世纪 70 年代, 北

海港栈桥面板在波浪作用下发生了局部损坏, 我国北方多地港口码头在遭受台风侵袭时引桥面板发生了破坏, 2004 年 Escambia 海湾的 I-10 姐妹桥在 IVAN 号台风袭击下遭受了严重破坏等<sup>[1-2]</sup>。对于刚性很大的海岸工程结构物, 由于冲击压力持续时间短暂, 其作用的冲量很小, 基本上可以不用考虑, 缓变压力是波浪上托力荷载的主要部分。

收稿日期: 2015-06-29

\*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。

目前国内外的大量研究多关注冲击压力方面,对缓变压力的研究有一定的涉及。如 Wang<sup>[3]</sup>对水平悬空平板的波浪压力进行了试验,认为缓变压强与波面和周期有关。Sih<sup>[4]</sup>给出了简单的大尺度平台在规则波和不规则波作用下缓变压强的公式。McConnell K 等<sup>[5]</sup>通过水平透空面板的不规则波试验,提出了垂直缓变压力的公式。黄磊<sup>[6]</sup>通过物理模型试验,给出了平板不规则波下缓变压强的经验公式。以往的研究虽然认识到波浪上托力由冲击压力和缓变压力组成,但往往两者不加区分,把冲击压力当作上托力的全部,对于缓变压力的研究还较少,且方法多集中采用模型试验研究,论述也缺乏一定的系统性。

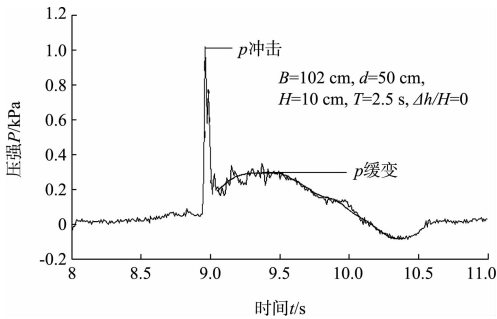


图1 波浪压力随时间变化的特征曲线

当前数值模拟技术有了较大的发展,数值模拟成为了研究波浪作用问题的另一种重要方法。其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等方面有过成功的应用<sup>[7-9]</sup>。

本文拟采用数值模拟方法,并在分析中结合物理模型试验结果,应用 FLUENT 软件建立波浪与平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。利用低通滤波器方法对冲击信号进行滤波处理,得到原信号的缓变部分,探讨波浪缓变压力随各因素的变化特征,提出便于工程应用的平板底面缓变压强的经验公式。

## 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, $k-\varepsilon$  模型来封闭湍流模型。

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

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

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 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<sup>[10]</sup>。源项表达式为:

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

式中: $-\frac{\mu}{\alpha} \cdot u_i$ 为黏性损失项; $-C_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho |u| u_i$ 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基本一致,其计算区域见图2。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、长度为1.02 m,为平板在静水面上的超高。在板底部设置压力测点,测点与板前端部距离为0.035 m。

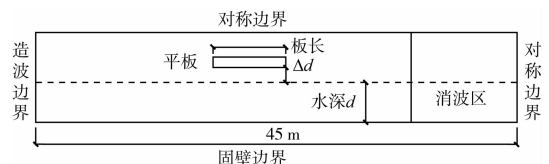
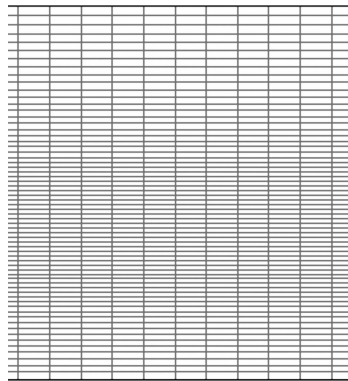


图2 数值计算区域

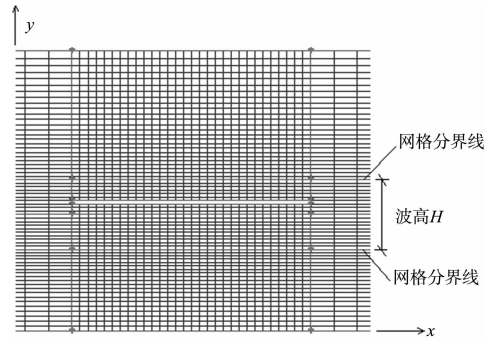
### 1.3 水槽网格设置

生成数值水槽计算网格时,在竖向上,在自

由表面附近将网格进行了加密, 以能够准确计算出表面波的形状和变形, 即在波高范围内均匀设置 10~20 个单元, 以外逐渐变疏。在横向上, 由于板附近的流动情况比较复杂, 其物理量和梯度可能会发生较大的变化, 所以这个区域也进行了网格加密, 每个单元约为 1.0 cm, 其他为一个波长设置 60~100 个单元。数值波浪水槽及结构物网格划分见图 3。



a) 水槽局部风格



b) 平板周围网格

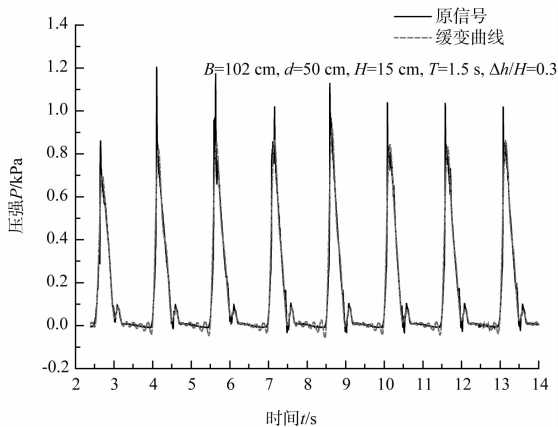
图3 数值波浪水槽及结构物网格划分计算

### 1.4 数值水槽验证

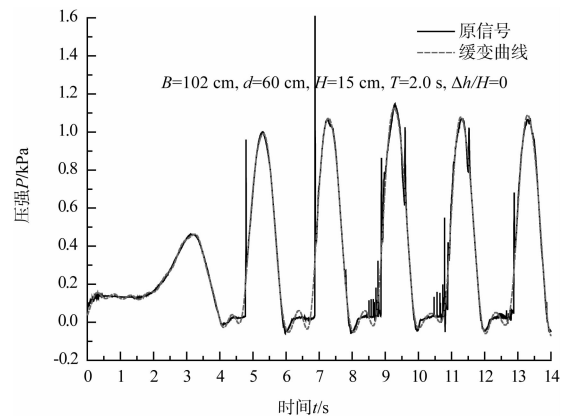
为通过波浪冲击压历时曲线得到缓变压强的特征值, 这里采用低通滤波器方法对原信号进行了滤波处理。图 4 为不同工况下缓变压强历时曲线与原信号的比较, 表 1 给出了数值模拟和物理模型试验的统计结果。可见缓变曲线能较好地反映出冲击信号的缓变部分, 这里取缓变压强峰值的平均值作为分析波浪缓变特性指标。

表 1 数值模拟和试验的统计结果比较

工况	特征值	试验或模拟	最大值/kPa	1/3 峰值/kPa	平均峰值/kPa
工况 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	0.612 8	0.570 1	0.554 5
		模拟	0.785 2	0.774 1	0.753 5
工况 2	水深 $d=60$ cm, 波高 $H=0.15$ m, 周期 $T=2.0$ s, $\Delta h/H=0$	试验	0.821 4	0.768 9	0.755 6
		模拟	1.173 0	1.150 1	1.137 9
工况 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	0.231 5	0.214 2	0.168 9
		模拟	0.489 6	0.467 2	0.413 5



a) 工况1



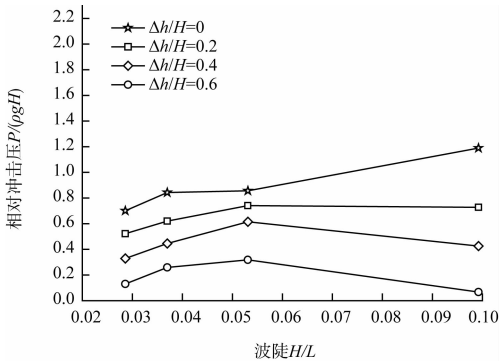
b) 工况2

图 4 几种典型工况下缓变曲线与原信号的比较

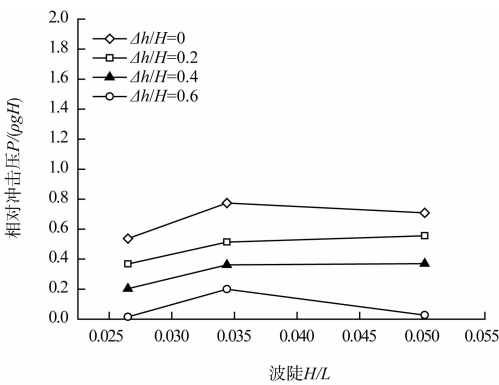
## 2 板底缓变压强数值模拟研究

### 2.1 波陡 $H/L$ 的影响

由图5可知不同水深时平板最大相对缓变压强与波陡之间的关系。曲线的形式比较一致，当波陡超过某一值时，相对缓变压强随波陡的增加而减小，当波陡小于这一值时，相对缓变压强反而随波陡的减小而减小。



a)  $d=50\text{ cm}, H=15\text{ cm}$



b)  $d=60\text{ cm}, H=15\text{ cm}$

图5 结构物底面缓变压强与波陡的关系

### 2.2 $\Delta h$ 的影响

图6为相对缓变压强随平板相对高度变化的数值计算结果。可见相对缓变压强基本上随超高的增大而减小，压强峰值点出现的位置在相对高度为0~0.4，主要发生在相对高度为0处。

### 2.3 板宽 $B$ 的影响

图7为相对缓变压强随相对板宽变化的数值计算结果。可见，随着超高增大，最大缓变压强点有后移趋势。相对缓变压强随相对板宽的变化幅度不大，并且数值多在同一量级，因此，认为板宽对相对缓变压强大小的影响有限。

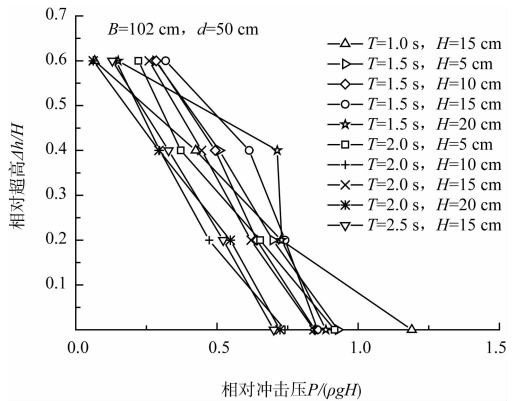


图6 结构物底面缓变压强与超高的关系

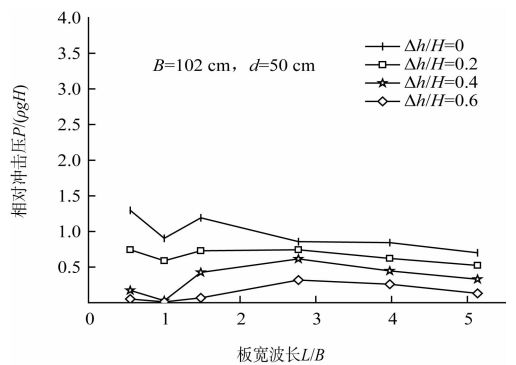


图7 结构物底面缓变压强与板宽的关系

## 3 板底缓变压强计算公式

根据以上分析并结合以往研究成果<sup>[4]</sup>，对数据点进行拟合，得到最大相对缓变压强包络线(图8)，其中拟合曲线的相关系数超过0.72。

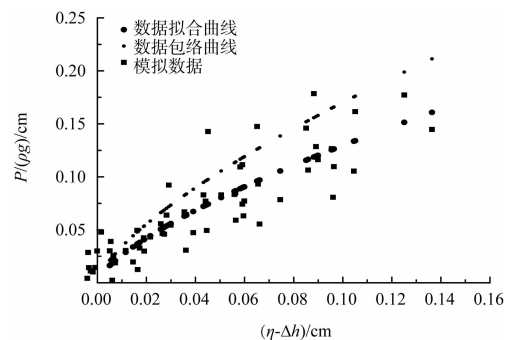


图8 最大相对缓变压强包络线

平板板底最大缓变压强计算公式为：

$$P = 0.647\rho g(\eta - \Delta h)^{0.699} \quad (4)$$

90%包络线的计算公式为：

$$P = 0.85\rho g(\eta - \Delta h)^{0.699} \quad (5)$$

式中： $P$ 为波浪上托力缓变压强； $\rho$ 为单位水体的质量； $\Delta h$ 为面板在静水面上的超高； $\eta$ 为波峰顶

点在静水面上的高度,按下式计算:

$$\eta = \frac{H}{2} + \frac{\pi H^2}{2L} \left[ \frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi d}{L} \left( \operatorname{ch} \frac{4\pi d}{L} + 2 \right)}{4 \left( \operatorname{sh} \frac{2\pi d}{L} \right)^3} \right] \quad (6)$$

式中:  $H$ 、 $L$ 、 $D$  分别为波浪波高、波长和静水深。

#### 4 结语

1) 低通滤波器方法在波浪上托力信号的处理中效果良好;建立的规则波数值波浪水槽可以有效地进行波浪缓变压强作用模拟研究。

2) 波陡对板底相对缓变压强的影响为:当波陡超过某一值时,相对缓变压强随波陡的增加而减小,当波陡小于这一值时,相对缓变压强反而随波陡的减小而减小。超高的影响为:相对缓变压强基本上随超高的增大而减小,压强峰值点出现的位置在相对高度为  $0 \sim 0.4$ 。板宽对相对缓变压强大小的影响有限。

3) 通过数值模拟数据分析,得到了平板透空结构底部缓变压强与  $(\eta - \Delta h)$  的函数关系式,并对 90% 累积率的包络线进行了拟合,以供工程上参考应用。

#### 致谢

感谢河海大学严以新教授、郑金海教授、陈国平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] Meng B, Jin J. Uplift wave load on the superstructure of coastal bridges[C]// Lyons R, Wallace J, Stovner E. 2007 Structures Congress: New Horizons and Better Practices. USA: Cdr, 2007: 1-10.
- [2] 管武成. 用 URANS 方程模型模拟高桩码头面板的浮托力[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [3] Wang H. Water wave pressure on horizontal plate[J]. Journal of the Hydraulics Division: ASCE, 1970, 96(10): 1 997-2 017.
- [4] Shih R W K, Anastasiou K. A laboratory study of the wave induced vertical loading on platform decks[J]. Proc, ICE, Water Maritime and Energy, 1992(96): 19-33.
- [5] Tirindelli M, Cuomo G, Allsop N W H, et al. Physical model studies of wave-induced loading on exposed jetties: Towards new prediction formulae[J]. Proc: ASCE, 2004: 382-393.
- [6] 黄磊. 不规则波对高桩码头面板缓变压力的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2011.
- [7] 孙家文. 波浪对水平板冲击作用的实验研究与数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [8] 梁修锋, 杨建民, 李欣, 等. 不规则波浪的数值模拟[J]. 船舶力学, 2010, 14(5): 481-486.
- [9] 郑坤. 基于 SPH 方法的波浪对水平板冲击作用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [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)

## 编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动,他们建立伪网站,利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明,从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: [www.sygj.com.cn](http://www.sygj.com.cn), 敬请广大读者和作者周知并相互转告。