



波浪对有梁面板结构冲击作用数值模拟*

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, 对透空有梁面板结构底面受到的波浪冲击作用进行研究。数学模型采用 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, 验证了模型的造消波性能和应用的有效性。通过计算, 得到了波浪冲击过程中波陡、超高和板宽各因素对冲击压强的影响。最后在已有冲击压强计算公式基础上提出了修正公式, 以更准确地预报波浪的冲击荷载, 深入认识波浪冲击机理。

关键词: FLUENT; 规则波; 透空式建筑物; 梁板结构; 波浪冲击

中图分类号: TU 352; TV 139.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-4972(2015)12-0010-06

Numerical simulation of regular wave impact on beam-plate 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 beam-plate structures, we establish two-dimensional regular wave numerical models based on software FLUENT. Adopting RANS equations and standard equations, VOF method is used to reconstruct the free surface. Comparing typical cases of wave slamming on beam-plate structures, we verify the models by experimental data. With plentiful simulation, we carry out the parametric studies for different wave steepness, structure geometry and the distance between underside of horizontal plate and still water level, and get to know the influences of the three parameters on the impact pressure. Finally, the pressure formulae are improved based on the original calculation formulae of Hohai University. The work is significant for accurately predicting the impact load and mastering more impact mechanism.

Keywords: FLUENT; regular wave; open-piled structure; beam-plate structure; wave slamming

波浪冲击荷载的确定是海洋建筑物工程设计面临的首要问题, 其直接影响到建筑物上部结构的高程, 进而影响工程的造价及安全。有关波浪对建筑物的冲击问题, 以往的研究多采用半理论半经验的方法, 用基本假定建立数学模型得出经验公式, 再用物理模型试验确定其中的经验系数^[1-13]。但这些已有的经验公式, 由于考虑的具体

工况和影响因素各不相同, 其计算结果差别较大; 另外, 波浪与面板结构相互作用, 主要是极短时间内强烈的冲击作用, 由于当前的试验设备和条件仍存有限制, 如设备的采样频率偏低会使得极大冲击力捕获不到, 进而对结果产生影响。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。

收稿日期: 2015-05-18

*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。

随着计算机和数值计算技术的发展, 数值模拟逐渐成为了研究波浪作用问题的另一种重要方法。数值模拟方法投资较少、周期短、且易于改变各类参数条件, 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。因此可以利用其优势, 开展更广泛的研究工作。

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 软件建立波浪与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。探讨波浪冲击压力随各因素的变化特征, 提出有梁面板底面冲击压强的修正公式, 以便更准确地预报波浪的冲击荷载、深入认识波浪冲击机理。

1 原有公式

文献[14]从工程安全的角度出发, 根据试验资料的整理和分析, 以相对超高(超高波面高度之比)为主要参数, 对波浪相对冲击压强随相对超高变化规律采用 90% 保证率的外包络线方法, 得到各结构面板底部最大冲击压强计算公式, 其成果已列入国家最新规范。规则波作用下透空式有梁面板冲击压强计算公式如下:

$$p/(\rho g H) = 3.2 \times \left(1 - \frac{\Delta h}{\eta}\right)^{0.3} e^{[-0.8 \times (\frac{\Delta h}{\eta} - 0.8)^2]} \quad (1)$$

式中: p 为波浪上托力压强; ρ 为单位水体的质量; Δh 为面板在静水面上的超高; η 为波峰顶点在静水面上的高度(与 2013 年新版《海港水文规范》中的波峰面高度计算公式一致), 按下式计算:

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

式中: H 、 L 、 d 分别为波浪波高、波长和静水深。

2 数值波浪水槽的建立与验证

2.1 数学控制方程

考虑不可缩流体, 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。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho f_i + F_i \quad (4)$$

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。

2.2 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^[15]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:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} \cdot u_i + C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho |u| u_i \right) \quad (5)$$

式中: $-\frac{\mu}{\alpha} \cdot u_i$ 为黏性损失项; $-C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho |u| u_i$ 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^[14]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。物理模型试验的采样频率为 300 Hz 左右, 而数值模拟的最大采样频率为 2 000 Hz。

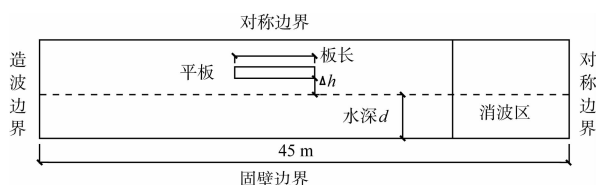


图 1 数值计算区域

平板底部横梁的高为 8 cm、宽 4 cm，横梁间距(中-中)为 24.75 cm，纵梁的高为 5 cm、宽 2 cm，纵梁间距(中-中)为 20 cm，见图 2。

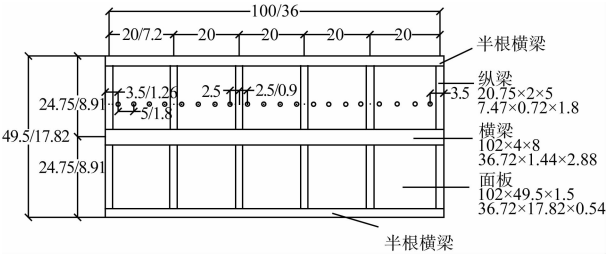


图 2 平板底纵横梁尺寸 (单位: cm, 比尺 1:36)

2.3 水槽网格设置

生成数值水槽计算网格时，竖向上，在自由表面附近将网格进行加密，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，波高范围以外逐渐变疏；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 $\Delta y = 1.0\text{ cm}$ ，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。

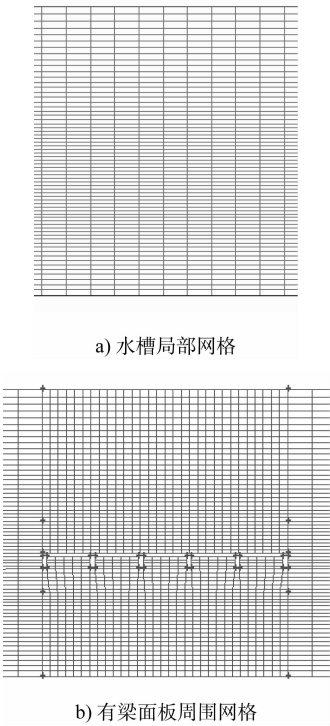
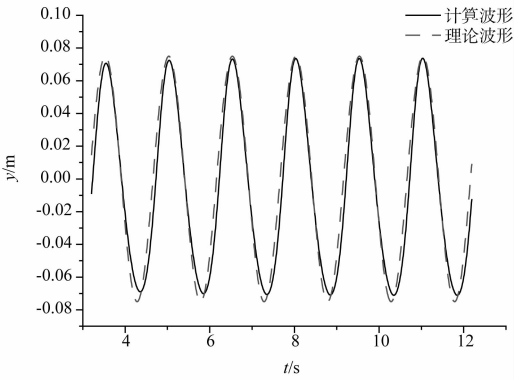


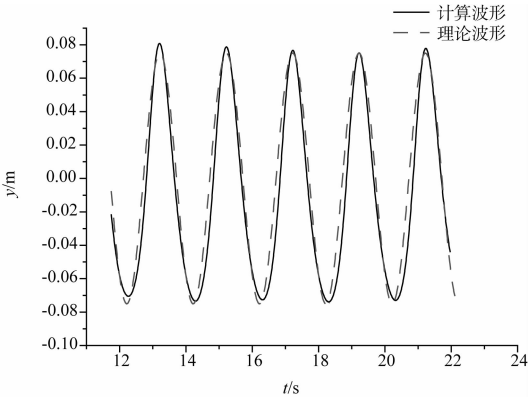
图 3 数值波浪水槽及结构物网格划分计算

2.4 数值水槽验证

图 4 为数值模拟与基于微幅波理论得到的解析解的波形比较。图 4 中为波面点距造波端的距离，可见数值模型计算得到的波形与理论波形吻合较好，计算波峰与理论波峰较为一致。



a) $d=50\text{ cm}$, $H=0.15\text{ m}$, $T=1.5\text{ s}$, $\Delta h/h=0.3$, $x=3\text{ m}$



b) $d=60\text{ cm}$, $H=0.15\text{ m}$, $T=2.0\text{ s}$, $\Delta h/h=0$, $x=7\text{ m}$

图 4 计算波形与理论波形的对比

利用所建的数值模型对几组不同工况下波浪冲击过程进行模拟，图 5 为数值模拟和试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。由图表可见，冲击压强随时间的变化过程并不完全一致，每一周期内冲击压峰值不能完全一一对应，但总的来看所统计到的 12 个波的最大值、1/3 大值和平均值离散程度较小，表明建立的数值波浪水槽可以较有效地进行波浪冲击作用模拟，这里取峰值的平均值作为分析冲击特性的指标。

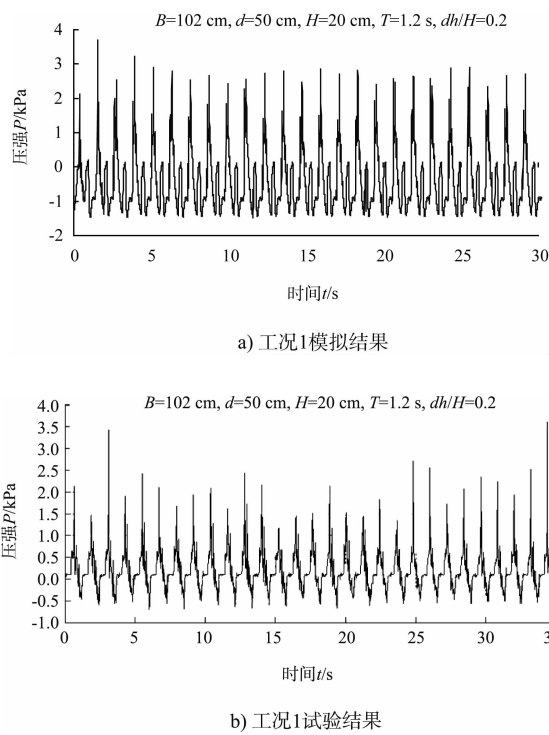


图 5 典型工况下冲击压强历时曲线比较

表 1 冲击压强数值模拟和试验结果比较

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

3 冲击压数值模拟研究

3.1 波陡 H/L 的影响

图 6 为不同工况下板底最大相对冲击压随波陡变化的数值计算结果。不同波高下，在周期比较大且波陡较小时，波浪冲击角比较小，多在 0.03、0.06 波陡附近出现冲击压峰值。总的来说，最大冲击压峰值主要出现在波陡比较小时。

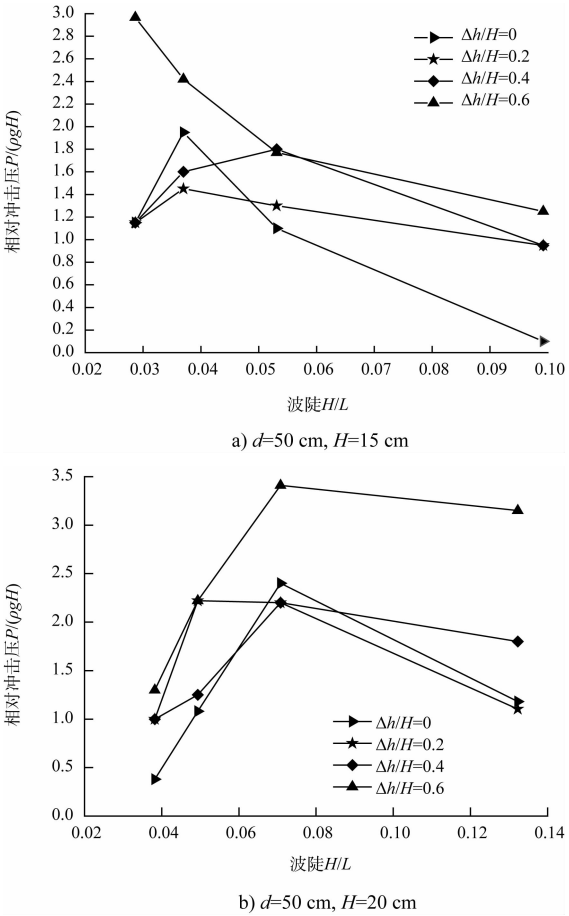


图 6 平板底面冲击压与波陡的关系

3.2 Δh 的影响

对封闭空气层的影响进行分析，封闭空气层不仅对板下冲击压起到缓冲的作用，当其达到一定压强时还可能对波浪冲击角度产生影响，从而影响冲击压力。横纵梁形成的框架使得封闭的气体更难逃逸，因此空气层的影响与无梁平板相比更大，而相对超高的变化将改变空气层的存在状态，从而改变板下冲击压，再结合波浪动力的影响，造成有梁面板条件下相对超高的影响将更为复杂。

有梁面板各工况下相对冲击压随相对超高的变化，数值模拟结果见图 7。一些组次冲击压在相对超高超过 0.4 以后的下降程度减缓，一些组次冲击压在相对超高 0.6 时出现峰值。这说明对于有梁面板，超高比较大时，由于框架梁对波浪的反射使波浪动力增大，同时板下气体的逃逸使增加的波浪动力得以直接作用于板上，两者结合使得相

对超高为 0.6 时冲击压仍然比较大。当波浪动力比较小时($H = 10\text{ cm}$, $T = 1.5、2.0\text{ s}$), 相对超高为 0 处水质点速度大, 冲击压也大, 随着超高增大, 冲击角减小, 波浪动力也减小, 冲击角减小引起的冲击压的增大作用小于波浪动力减小的影响, 因此冲击压随超高增大而减小, 峰值出现在相对超高为 0 处。当波浪动力增大($H = 15、20\text{ cm}$), 冲击压也相应较大, 超高增大带来的波浪动力的减小的影响比较小, 因此冲击压峰值出现在超高较大之处。

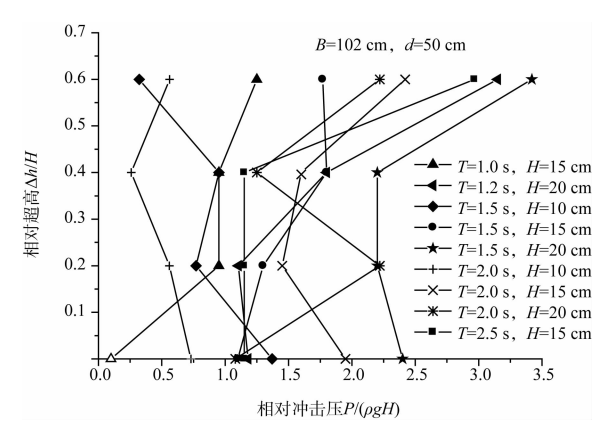


图 7 平板底面冲击压与超高的关系

3.3 板宽 B 的影响

图 8 显示了相对冲击压与相对板宽的关系。板宽对冲击压有一定的影响, 特别是板宽比较大、超高比较小时。相对板宽对冲击压的影响反映了波陡和超高对冲击压的综合影响, 超高比较大时, 相对板宽大意味着波陡较小, 此时冲击角较小, 冲击压增大, 而超高较小时, 这一影响被框架下的气垫作用降低, 导致变化比较平缓。而板宽比较小时, 由于板下封闭的气体相对少, 因此波浪冲击比较大。

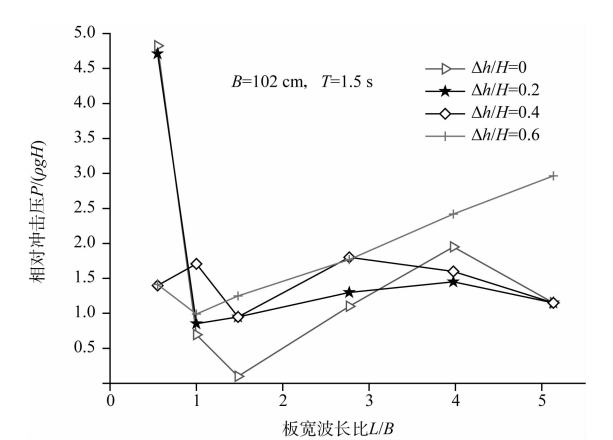


图 8 平板底面冲击压与板宽的关系

4 板底部最大冲击压强修正公式

根据数值模拟数据并结合物理模型试验资料, 采用与文献[14]同样的外包络线方法(图 9), 对原公式进行修改, 得到公式如下:

$$P/(\rho g H)=3.2 \times\left(1-\frac{\Delta h}{\eta}\right)^{0.35} e^{\left[-0.8 \times\left(\frac{\Delta h}{\eta}-0.8\right)^2\right]} \quad(6)$$

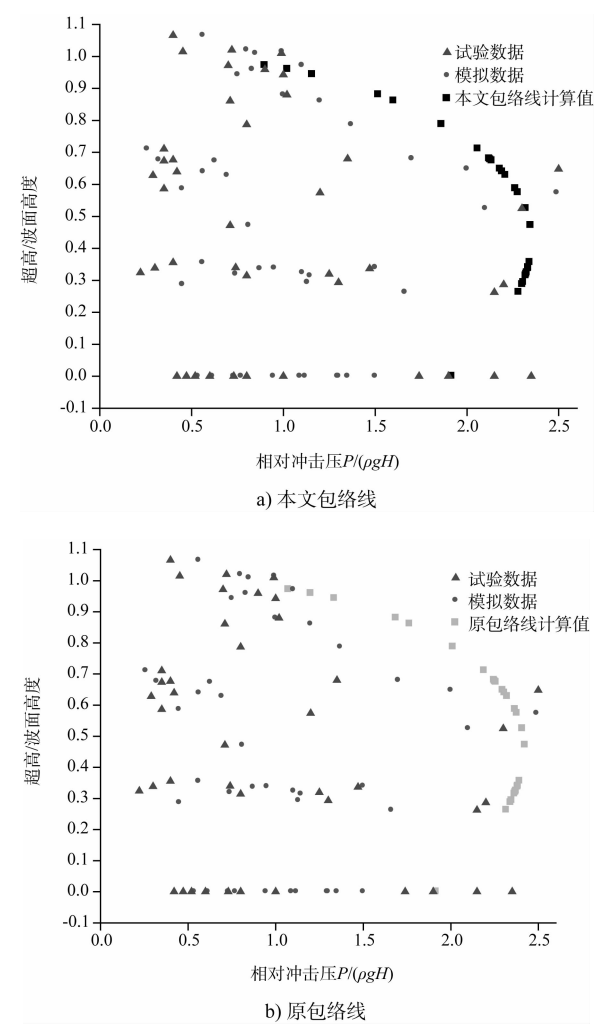


图 9 最大相对冲击压包络线

由公式(1)、(6)可知, 本文对于规则波下有梁面板最大压强计算公式调整不大, 说明数值模拟和试验结果较为一致。由图 9 可见, 数模和试验数据都比较离散, 两个拟合的包络曲线基本上数模和试验数据都能包括在内, 区别在于本文曲线在大超高时压强随超高收缩加快, 且最大压强值有所减小。说明通过数值模拟结果验证了原公式可行, 但其计算值偏于保守, 修正后的公式在安全适用的同时, 又在一定程度上进一步提高了计算精度。

5 结语

1) 本文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, 统计的峰值平均值表现较稳定, 可以作为分析波浪冲击有梁面板特性的指标。

2) 波陡对板底最大相对冲击压的影响为: 波高不同时, 在周期比较大且波陡较小情况下, 冲击压易出现峰值; 超高的影响为: 当波浪动力比较小时, 冲击压随超高增大而减小, 峰值出现在相对超高为 0 处, 当波浪动力增大, 冲击压峰值多出现在超高较大之处; 板宽的影响为: 超高比较大时冲击压会增大, 而超高较小时冲击压变化较平缓。

3) 联合数值模拟和试验结果, 对原计算板底最大压强公式进行了修正, 认为原公式计算值偏于保守, 修正后的公式更加合理可行。

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] 合田良实. 構造物に働く波力[C]. 1967 年度水工学に関する夏期研修会講義集, B. 海岸港湾コース, 1967.

[2] Wang H. Water wave pressure on horizontal plate [J]. Journal of the Hydraulics Division: ASCE, 96 (10): 1 997-2 017.

[3] 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.

[4] 过达, 蔡保华. 透空式建筑物面板波浪上托力计算[J]. 华东水利学院学报, 1980(1): 14-33.

[5] Ren B, Wang Y X. Spectral analysis of irregular wave impact on the structure in splash zone[C] //Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Oslo: OMAE, 2002: 149-154.

[6] 任冰, 王永学. 不规则波对浪溅区结构物冲击作用的试验研究一频域分析[J]. 海洋工程, 2003, 21(4): 53-60.

[7] 任冰, 王永学. 不规则波对透空式建筑物上部结构冲击作用时域分析[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(6): 818-824.

[8] 任冰. 随机波浪对不同接岸形式码头上部结构的冲击作用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.

[9] Bradner C. Large-Scale Laboratory Observations of Wave Forces on a Highway Bridge Superstructure [D]. USA: Oregon State University, 2008.

[10] 孟艳秋, 陈国平, 严士常. 码头面板尾部开缝和面板上开孔对波浪上托力的影响[J]. 河海大学学报, 2009, 37(6): 736-740.

[11] 孟艳秋, 陈国平, 严士常. 离岸式高桩码头面板上托力试验及分析[J]. 解放军理工大学学报, 2010, 11(1): 72-78.

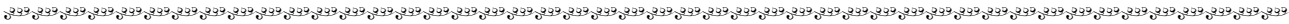
[12] 孟艳秋, 陈国平, 严士常. 不规则波作用下码头结构对波浪上托力的影响[J]. 港工技术, 2009, 46(5): 1-4.

[13] 严士常, 陈国平, 李元青. 斜向规则波作用下离岸式高桩码头上部结构总上托力[J]. 中国港湾建设, 2010(S1): 119-122.

[14] 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.

[15] 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)



征订通知

2016 年《水运工程》杂志征订工作已经开始, 订阅方式请登录《水运工程》杂志社官方网站: www.sygc.com.cn, 首页下载中心下载 2016 年《水运工程》征订通知单, 有关要求和反馈信息一应俱全。