

含翼板浮式防波堤消浪性能分析*

赵峰¹ 陈城¹ 朱宏博^{1†} 包艳¹ 韩兆龙¹ 陈新权¹

(1.上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240)

摘要 本文将浮式防波堤结构简化为两自由度的刚体运动,基于黏性不可压缩流体理论,用体积分数方法捕捉自由液面,采用重叠网格技术和有限体积法,使用计算流体力学软件 Star-CCM+建立了二维数值水槽,对新提出的一种含翼板的箱型浮式防波堤和不含翼板的传统箱型浮式防波堤进行了数值模拟,对比分析了两种浮式防波堤的消浪性能、运动响应和流场特性,结果表明:翼型挡板能有效降低浮式防波堤的运动响应;含翼板和不含翼板浮式防波堤运动响应的不对称性是由水下两对不同强度和不同演化形式的旋涡造成的;附加翼型挡板在水下能形成强度更大的旋涡,从而吸收更多的波浪能,能够明显提升箱型浮式防波堤的消浪效果;附加翼型挡板在高性能的浮式防波堤设计中具有巨大潜力。

关键词 浮式防波堤, 消浪性能, 计算流体力学, 体积分数方法

中图分类号:P75

文献标志码:A

Wave Attenuation Performance of Floating Breakwater with Wing Baffles*

Zhao Feng¹ Chen Cheng¹ Zhu Hongbo^{1†} Bao Yan¹ Han Zhaolong¹ Chen Xinquan¹

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract In this paper, the floating breakwater structure is simplified to a rigid body motion with two degrees of freedom, a two-dimensional numerical flume is established using the computational fluid dynamics software Star-CCM+ based on the theory of viscous incompressible fluid, the free surface is captured by the volume fraction method, the overset mesh technique and the finite volume method are used. A new proposed box-type floating breakwater with wing baffles and a traditional box-type floating breakwater without wing baffles are simulated numerically, and the wave attenuation performance, motion response and flow field characteristics of the two types of floating breakwaters are compared and analyzed. The results show that: wing baffles can effectively reduce the motion response of floating breakwater; the asymmetry of the motion response of the floating breakwater with and without wing baffles is caused by two pairs of vortices with different strengths and evolutionary forms underwater; the additional wing baffles can induce stronger vortexes underwater, thus absorbing more wave energy, which can significantly improve the wave attenuation performance of the box-type floating breakwater; the additional wing baffles have a great potential in the design of high performance floating breakwaters.

Key words floating breakwater, wave attenuation performance, computational fluid dynamics, volume fraction method

引言

大型港湾码头的水文气象条件复杂,海浪冲刷岸线,船舶摇晃明显,妨碍船舶的安全停泊和装卸作业,但为了避免妨碍船舶航行,有些开放水域不能建设传统固定式防波堤.因此,要采取新的方法来抵御海浪对港域的侵袭,维持港内水域平稳,保证船舶在港内安全停泊和作业.浮式防波堤具有机动灵活、造价较低、适应性强、对海域影响小以及施工运输方便等优点,在有需求的水域能够代替传统固定式防波堤.近年来,诸多学者对各类浮式防波堤的消浪性能进行了大量的实验研究^[1-4]和数值模拟^[5-10].Matsunaga等^[11]设计了方箱桁架结构浮式防波堤,通过系统的试验给出了计算此种结构透射系数的经验公式.邹志利等^[12]对浮式防波堤在不同吃水深度、周期、波高和入射波波型情况下开展了波浪非线性作用力的研究,试验结果表明波浪力在周期较大时,随着波高的增加,出现一阶力减小、高阶力增大的强非线性现象.Gesraha^[13]在传统的矩形箱式防波堤的基础上向下增加了两块挡板以提升其消浪能力.陈智杰等^[14]在线性化势流理论范围内求解了方箱-水平板浮式防波堤的波浪绕射和辐射问题,从时域角度分析了浮式防波堤的水动力特性.严建国等^[15]采用特征函数法对矩形浮箱式消浪结构的消浪性能进行相关数值分析,分析了浮体与波浪相互作用时波浪的绕射、辐射的一系列情况,并通过分析浮式防波堤的水动力特性来确定其消浪性能.Williams等^[16]利用边界积分方程并结合适当的格林函数方法计算了具有矩形截面的双浮箱结构水动力特性,结果表明波浪的反射性能取决于消浪设施的宽度、吃水、两箱间距及系泊系统刚度.黄衍顺等^[17]以遗传算法为优化手段,以透射系数为目标函数,对给定横剖面面积的浮式防波堤在规则波作用下的消波性能及剖面形状进行了最优化计算研究.

以往对浮式防波堤的数值模拟研究大部分都是基于势流理论,忽略了流体的黏性,而张恒铭等^[18]和Hu等^[19]的研究表明,流体的黏性会对浮式防波堤的运动响应、频域响应和周围流场产生显著影响,进而影响浮式防波堤的消波性能.本文基于黏性不可压缩流体理论,采用计算流体力学(CFD)方法,对新提出的一种含翼板的箱型浮式防

波堤和不含翼板的传统箱型浮式防波堤进行了数值模拟与对比分析.

本文的主要框架如下:首先分别介绍流体和结构的控制方程以及数值求解方法;然后,对含翼板和不含翼板的浮式防波堤的消浪性能、受力情况和运动响应进行对比分析;最后,通过分析浮式防波堤附近的流场演化情况,讨论翼板对消浪性能的影响.

1 模型与方法

所提出的含翼板浮式防波堤如图1所示,其截面形状共由五个参数确定,首先是箱体的宽度和吃水,决定浮式防波堤的主体箱体大小,其次是翼板的宽度、长度和角度,决定附体翼板的形状大小.本文先基于势流理论,采用多目标遗传算法对防波堤截面形式进行优化,得到的最优参数为:宽度13.9m,高度7.05m,吃水4.7m,翼长3.8m,翼角 130° ,翼宽2m.本文采用此组最优参数进行进一步的数值模拟和分析.不含翼板浮式防波堤即为含翼板浮式防波堤的箱型主体.

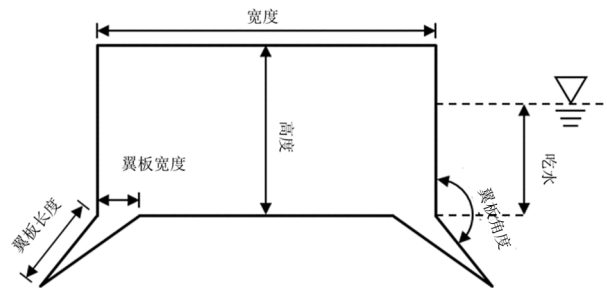


图1 含翼板浮式防波堤

Fig.1 Floating breakwater with wing baffles

不带翼板的和带翼板的箱型防波堤的计算模型如图2所示,其中虚线矩形为含翼板浮式防波堤的箱型主体,也即不含翼板浮式防波堤的结构模型.坐标原点位于防波堤箱型主体左下方的顶点处, x 轴的方向为顺流向, y 轴的方向为横流向,也是重力作用的方向.此两相流的流体域包括位于上方的空气域和位于下方的水域,而水域又分为三个部分,分别是造波区、工作区和消波区,如图2所示,其中 W 是防波堤箱型主体的高度, λ 是入射波的波长.空气域的高度距自由液面上方 $4W$,水域的高度距自由液面下方 $8W$,造波区和消波区的长度均为两倍波长,工作区的范围为距防波堤箱型主体

前后缘三倍的波长,在造波区施加波力以抑制入口边界处表面波的反射对入射波的影响,在消波区施加波阻尼以避免波浪在出口边界的反射.左边界和上下边界均为满足入射波要求的速度入口,右边界为压力出口边界条件.

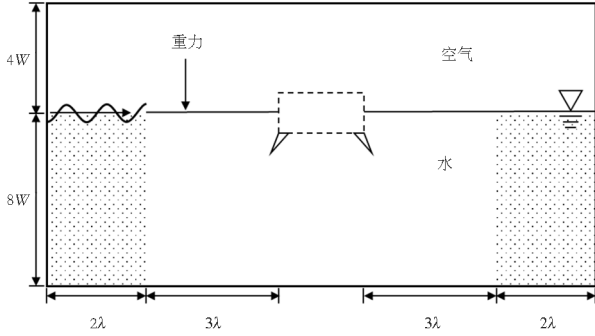


图2 计算域
Fig.2 Computational domain

防波堤在波浪下的运动响应是一个高非线性的流固耦合问题,其中涉及的两相流体,即空气和水,均由连续性方程和雷诺平均的不可压缩纳维斯托克斯方程控制:

$$\nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \bar{U}) = -\nabla \bar{p}_{\text{rgh}} + g + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{U}) - \rho \overline{U'U'} \quad (2)$$

式中, U 是速度, p_{rgh} 是减去静水压力的压力, μ 是流体的运动黏度, ρ 是流体的密度, g 是重力加速度, 顶线代表一个变量的平均部分, 上标撇代表一个变量的脉动部分. 雷诺应力项 $-\rho \overline{U'U'}$ 由 Boussinesq 假设线性化为:

$$-\rho \overline{U'U'} = \mu_t [\nabla \bar{U} + (\nabla \bar{U})^T] - \frac{2}{3} \rho k I \quad (3)$$

式中, μ_t 是湍流涡黏度, k 是湍动能, I 是单位张量. 本文采用 SST $k-\omega$ 湍流模型来求解湍流涡黏度, 湍动能 k 和指定湍流耗散率 ω 可通过求解相应的输运方程得到, 湍流涡黏度可由下式计算:

$$\mu_t = a_1 \frac{\rho k}{\max(a_1 \omega, b_1 F_2 S)} \quad (4)$$

式中, a_1, b_1 为模型系数, F_2 为混合函数, S 为应变率张量的模量.

本文采用体积分数法 (VOF) 来捕捉自由液面. 当一个计算单元的体积分数 $\alpha = 1$ 时, 意味着这个单元内充满了液体; 当 $\alpha = 0$ 时, 意味着这个单元内

充满了气体; 而当 $0 < \alpha < 1$ 时, 意味着该单元位于气液交界面处. 自由液面的位置即为 $\alpha = 0.5$ 的等高线处. 气液交界面处计算单元的流体密度和动力黏度为关于体积分数的加权平均值:

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a \\ \mu &= \alpha \mu_w + (1 - \alpha) \mu_a \end{aligned} \quad (5)$$

式中, μ 为流体的动力黏度, 下标 w 意味着流体为水, 下标 a 意味着流体为空气. 体积分数可通过求解如下方程得到:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U} \alpha) + \nabla \cdot [U_c \alpha (1 - \alpha)] = 0 \quad (6)$$

式中, U_c 为在交界面法向的人工界面压缩速度.

为简化模型, 本文防波堤的运动只考虑在 y 方向的平动和绕 z 轴转动. 结构的运动方程为:

$$\begin{aligned} m \frac{dv}{dt} &= f \\ M \frac{d\omega}{dt} + \omega \times M \omega &= n \end{aligned} \quad (7)$$

式中, m 为结构质量, f 为作用于结构的合力, v 为质心的速度, M 为惯性矩张量, ω 为刚体的角速度, n 为作用于结构的合力矩.

本文的瞬时数值模拟将结构简化为两自由度的刚体运动, 用雷诺平均的方法处理两相不可压缩流动, 采用标准壁面函数, 用 VOF 方法捕捉自由液面, 采用重叠网格技术和有限体积法, 使用 CFD 软件 Star-CCM+ 进行求解. 空间和时间离散均采用二阶格式, 时间步长为 0.01s, 不含翼板浮式防波堤模拟总时长为 500s, 含翼板浮式防波堤模拟总时长为 1000s.

2 算例分析

2.1 计算网格

由于浮式防波堤在波浪作用下有较大的运动响应, 对于具有相对运动的复杂结构采用重叠网格非常便利、高效. 本文采用的重叠网格划分如图 3 所示, 重叠网格和背景网格均采用切割体网格.

重叠网格的基础网格尺寸为 0.15 m, 近壁面区域进行了边界层网格划分, 壁面第一层网格高度为 0.0001m, 这样计算得到的无量纲壁面距离为 $0.1 < y^+ < 15$, 满足壁面函数对近壁面网格的要

求,重叠网格区域的网格总量为 38648(不含翼板)和 39529(含翼板).背景网格的基础网格尺寸为 2.4m,对多个区域核心流域进行了局部加密,重叠网格区域附近的网格尺寸加密为和重叠网格一致,在防波堤运动区域附近的网格尺度根据与防波堤的距离远近加密到 0.3~1.2m,波浪传播的垂直方向的网格尺度为 0.15m,波浪传播的平行方向的网格尺度为 1.2m,背景网格区域的网格总量为 204851(不含翼板)和 206499(含翼板).

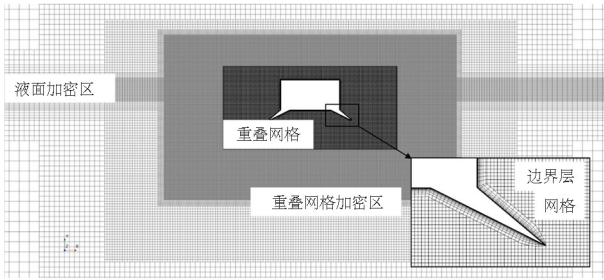


图3 含翼板浮式防波堤网格划分
Fig.3 Mesh of floating breakwater with wing baffles

2.2 造波与消波

此次计算采用的入射波为斯托克斯五阶波,波高 2.0m,水深 30.0m,指定波周期(T)为 9.0s,在此设置下波长(λ)约为 117.14m.

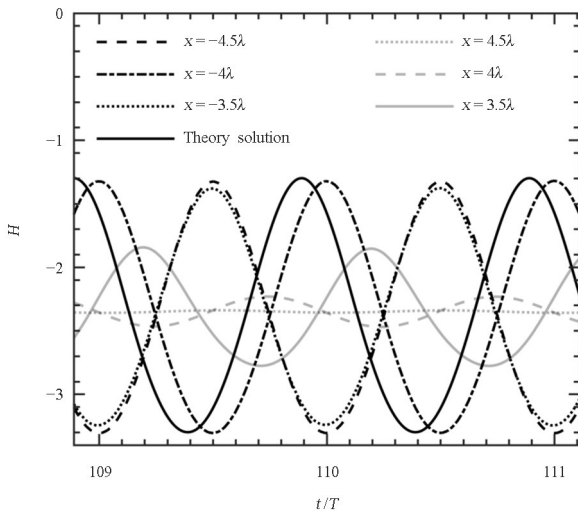


图4 造波区与消波区的波高
Fig.4 Wave height in wave generation and relaxation zones

图 4 给出了造波区与消波区的波高(H),并且绘制了指定波浪的理论波形^[20]作为对比.从图中可以看出,造波区的波浪都维持了稳定的波形并且与

理论波形非常吻合,这也证明了本文所采用的网格的有效性和准确性.消波区的波高随着到出口边界的距离减小而逐渐衰减,波浪在出口边界处基本消失且观察不到明显反射,说明消波区起到了良好的消波作用.

2.3 防波堤消浪性能分析

图 5 展示了含翼板和不含翼板的浮式防波堤在距防波堤箱体前缘 λ 、 1.5λ 和 2λ 位置处的波高随时间的变化曲线,可以看出,不含翼板的箱型浮式防波堤提前出现的波浪具有较大的波高,而含翼板的浮式防波堤提前出现的波浪波高明显小于入射波波高.

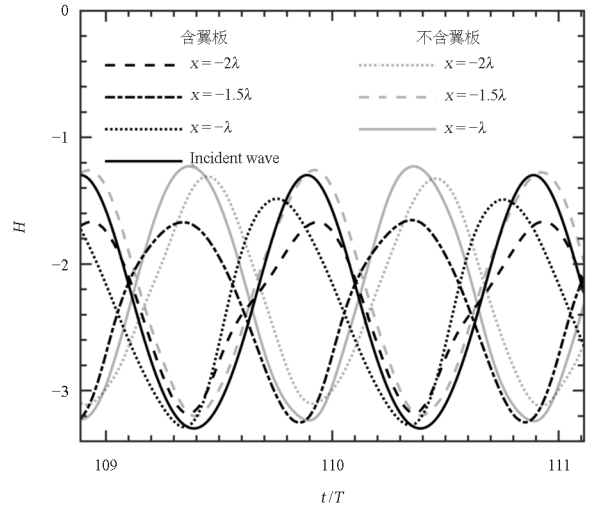


图5 反射波波高
Fig.5 Wave height of the reflected waves

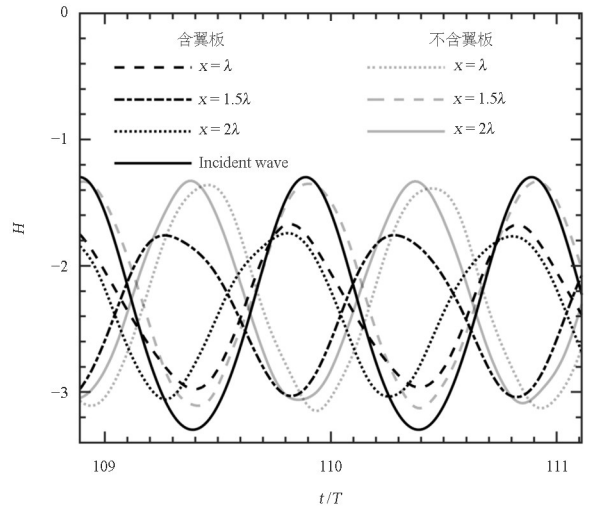


图6 透射波波高
Fig.6 Wave height of the transmitted waves

图 6 展示了含翼板和不含翼板的浮式防波堤在距防波堤箱体后缘 λ 、 1.5λ 和 2λ 位置处的波高

随时间的变化曲线,可以看出,不含翼板的箱型浮式防波堤堤后透射的波浪具有较大的波高,而含翼板的浮式防波堤堤后透射的波浪波高明显小于入射波波高.防波堤的透射系数(K_t)定义为:

$$K_t = H_t / H_i \quad (8)$$

式中, H_t 为透射波波高.计算得到不含翼板和含翼板浮式防波堤的透射系数分别为0.8804和0.6546,含翼板的浮式防波堤的防波效能比不含翼板的浮式防波堤高出26%.

2.4 防波堤受力和运动响应分析

图7给出了含翼板和不含翼板的浮式防波堤在波浪的冲击下的受力随时间变化情况,力的周期与波浪的周期保持一致,浮式防波堤所受沿波浪传播方向的力的幅值明显大于沿垂直方向的力.含翼板和不含翼板的浮式防波堤在 y 方向上的受力幅值相差不大,但 x 方向的受力幅值,含翼板的浮式防波堤比不含翼板的增大了约14%.

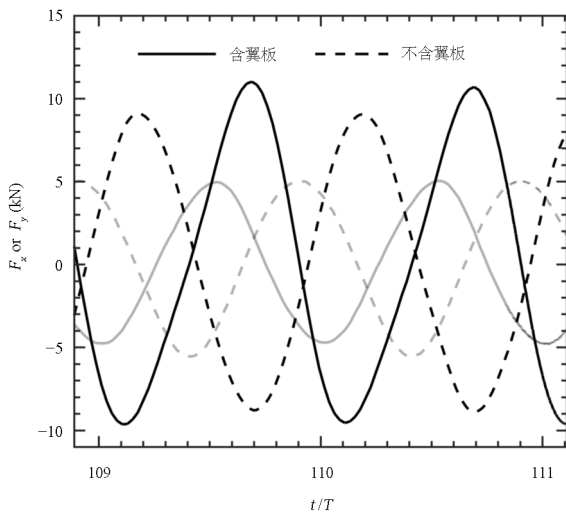


图7 浮式防波堤受力情况.黑色线和灰色线分别为 x 和 y 方向的力
Fig.7 Forces on the floating breakwater. The solid and dashed lines are the forces in the x and y directions, respectively

图8展示了含翼板和不含翼板的浮式防波堤沿 y 轴的平动和绕质心的转动随时间的变化情况,平动和转动的周期均与波浪的周期保持一致.含翼板的浮式防波堤沿 y 轴的平动幅值比不含翼板的降低了13%,两种形式的浮式防波堤的平动均有明显的对称性.含翼板的浮式防波堤沿 z 轴的转动幅值比不含翼板的降低了11%,两种形式的浮式防波堤的转动均有一定程度的非对称性,这种不对称性在含翼板的情况更为明显,顺时针的转动幅度

比逆时针的转动幅度高12%.

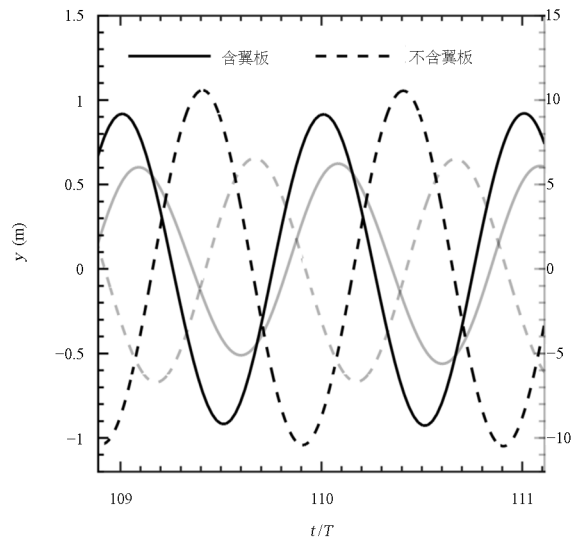


图8 浮式防波堤受力情况.黑色线和灰色线分别为 x 和 y 方向的力

Fig.8 Motion response of the floating breakwater. The solid lines are the displacement in the y -direction and the dashed lines are the angle of rotation around the center of mass

图8 浮式防波堤运动响应.黑色线为 y 方向的位移,灰色线为绕质心的转动的角度.

2.5 防波堤流场特性分析

图9和图10分别展示了不含翼板和含翼板的防波堤附近在一个波周期内的 z 方向涡量场.从图9可以看出不含翼板的防波堤运动过程中在水下箱体的两个顶角处存在强度较小的旋涡,脱落的旋涡就在顶角附近流动并很快就扩散消亡.从图10可以观察到含翼板的防波堤在来波方向的翼板尖端随着防波堤的运动会上游脱落一对强度较大的旋涡,旋涡脱落周期和入射波基本保持一致,且顺时针的旋涡要强于逆时针的旋涡,脱落的涡对继续沿翼板辐射的方向移动.含翼板的防波堤在下游方向的翼板尖端附近也存在周期性的旋涡脱落,脱落的涡对朝自由液面方向移动,逆时针的旋涡被限制在防波堤的后方的狭窄区域内,形成了一个较大的旋涡,并且与自由液面相互作用导致局部发生波浪破碎,而逆时针的旋涡朝着液面往后上方流动,在靠近液面后逐渐扩散消亡.

不含翼板和含翼板的防波堤在水下均会脱落两对旋涡,但含翼板的防波堤在翼板尖端附近形成的旋涡强度明显大于不含翼板的情况,旋涡吸收了

大量波浪能,从而达到了更好的消浪效果.不含翼板和含翼板的防波堤在水下形成的两对旋涡具有不同的强度和演化形式,从而导致了防波堤转动的不对称性.

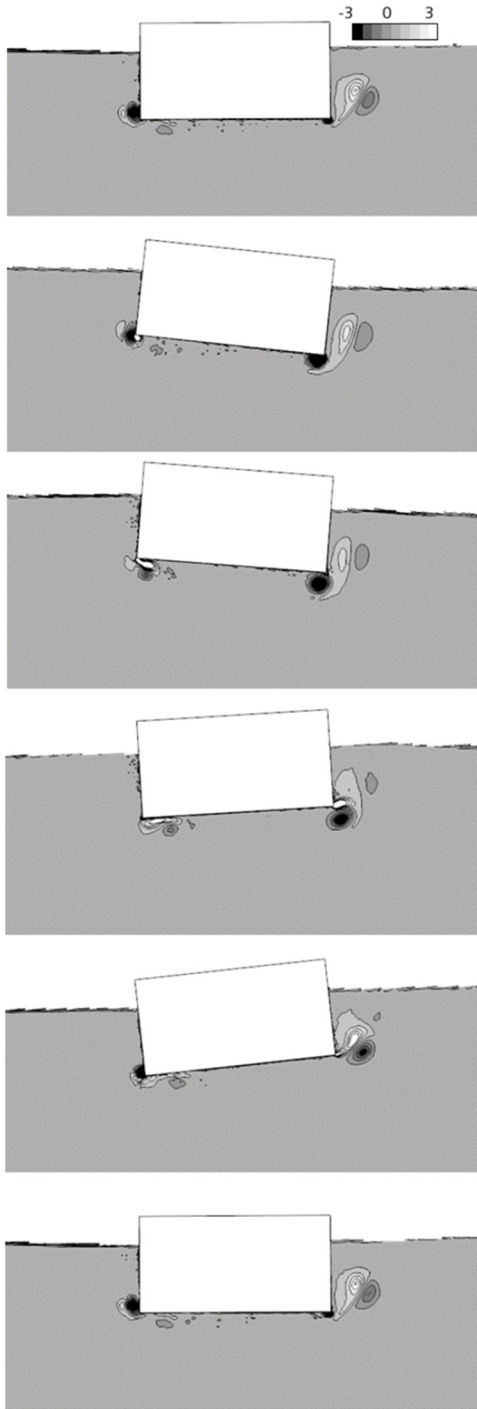


图9 不含翼板浮式防波堤附近的涡量场

Fig.9 Vorticity contours near the floating breakwater without wing baffles

含翼板的传统箱型浮式防波堤进行了数值模拟,对比分析了两种浮式防波堤的消浪效果、运动响应和流场特性,研究总结如下:

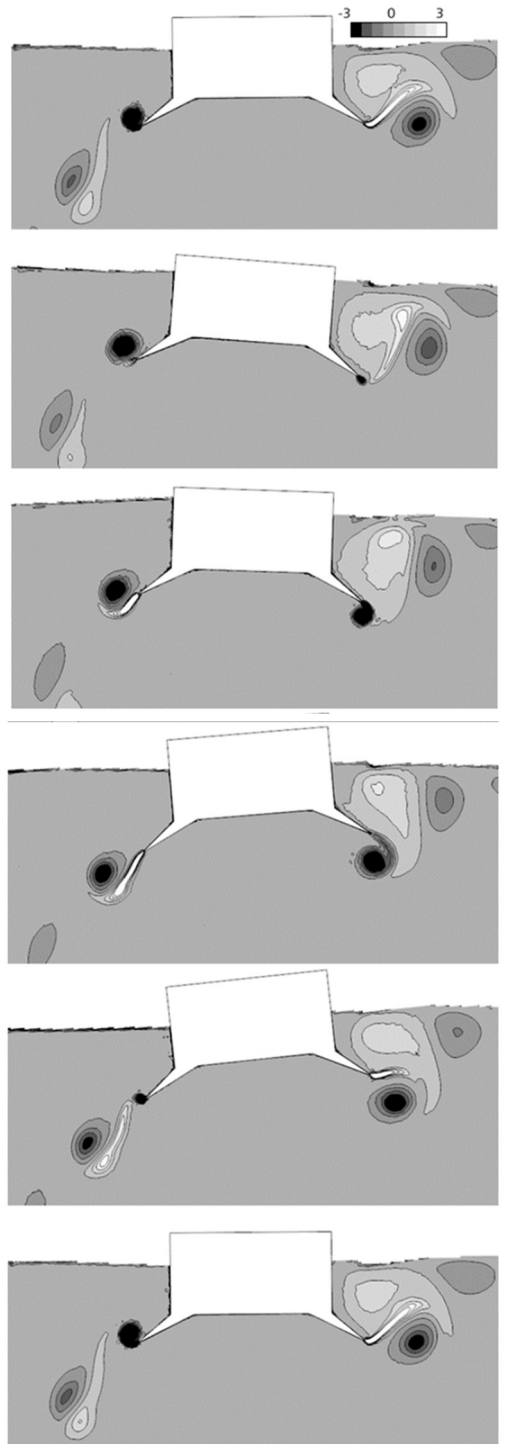


图10 含翼板浮式防波堤附近的涡量场

Fig.10 Vorticity contours near the floating breakwater with wing baffles

3 结论

本文基于黏性流体理论,采用计算流体力学方法,对新提出的一种含翼板的箱型浮式防波堤和不

1)翼型挡板能有效降低浮式防波堤的运动响应,含翼板浮式防波堤的运动响应幅值比不含翼板的降低了10%以上;

2)含/不含翼板浮式防波堤运动响应的不对称性是由水下两对不同强度和不同演化形式的旋涡造成的;

3)附加翼型挡板在水下能形成强度更大的旋涡,从而吸收更多的波浪能,比不含翼板的浮式防波堤提升了26%的消浪效果。

参考文献

- [1] BAYRAM A. Experimental study of a sloping float breakwater [J]. *Ocean Engineering*, 2000, 27(4): 445—453
- [2] 陈力. 浮式防波堤的实验研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
CHEN L. Experimental study of floating breakwater [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008 (in Chinese)
- [3] 寇雨丰, 肖飞龙, 刘建辉, 等. 新型超大型浮式海上基地消浪室方案试验研究 [J]. *船舶力学*, 2016, 20(7): 833—840.
KOU Y F, XIAO L F, LIU J H, et al. Experimental study of a new ultra-large floating offshore base wave elimination chamber scheme [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2016, 20(7): 833—840 (in Chinese)
- [4] 胡崑, 李大鸣, 秦崇仁. 浅水区域浮箱式防波堤结构形式的试验研究 [J]. *中国港湾建设*, 2007, 5: 38—41.
HU M, LI D M, QIN C R. Experimental study on the structural form of floating box breakwater in shallow water area [J]. *China Harbour Engineering*, 2007, 5: 38—41.(in Chinese)
- [5] 刘鹏飞, 郑永红, 王利生. 淹没矩形防波堤透反射系数特性研究 [J]. *海洋学报*, 2006, 28(5): 138—144.
LIU P F, ZHENG Y H, WANG L S. Characterization of transmission and reflection coefficients of submerged rectangular breakwaters [J]. *Haiyang Xuebao*, 2006, 28(5): 138—144.(in Chinese)
- [6] 劳国昇, 冯宏. 浮式防波堤性能理论计算 [J]. *海洋工程*, 1993, 11(2): 89—97.
LAO G S, FENG H. Theoretical calculation of floating breakwater performance [J]. *The Ocean Engineering*, 1993, 11(2): 89—97.(in Chinese)
- [7] ZHENG Y H, SHEN Y M, YOU Y G, et al. Wave radiation by a floating rectangular structure in oblique seas [J]. *Ocean Engineering*, 2006, 33: 59—81.
- [8] ABULAZM A G, GESRAHA M R. Approximation to the hydrodynamics of floating pontoons under oblique waves [J]. *Ocean Engineering*, 2000, 27: 365—384.
- [9] 李向红, 崔文良, 曹庆杰. 倒置数学摆在海洋发电中的应用研究 [J]. *动力学与控制学报*, 2009, 7(3): 252—257.
LI X H, CUI W L, CAO Q J. The study on the applications of an inverted pendulum in ocean wave generating [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2009, 7(3): 252—257.(in Chinese)
- [10] 陈建兵, 孙涛, 黄凯, 等. 大型海上风力发电高塔系统一体化分析建模研究 [J]. *动力学与控制学报*, 2017, 15(3): 268—278.
CHEN J B, SUN T, HUANG K, et al. Study on integrated numerical modeling of offshore wind turbine tower systems [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2017, 15(3): 268—278.(in Chinese)
- [11] MATSUNAGA N, HASHIDA M, UZAKI K, et al. Performance of wave absorption by a steel floating breakwater with truss structure [C]. *Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Kitakyushu, Japan, 2002: 768—772.
- [12] 邹志利, 王大国, 李光伟. 浮式防波堤非线性波浪力实验研究 [J]. *海洋工程*, 2003, 21: 61—69.
ZHOU Z L, WANG D G, LI G W. Experimental study of nonlinear wave forces on floating breakwaters [J]. *The Ocean Engineering*, 2003, 21: 61—69.(in Chinese)
- [13] GESRAHA M R. Analysis of II shaped floating breakwater in oblique waves [J]. *Ocean Engineering*, 2000, 27: 445—453.
- [14] 陈智杰, 董华洋, 曾志, 等. 波浪作用下方箱-水平板浮式防波堤时域水动力分析 [J]. *台湾海峡*, 2012, 31(1): 114—120.
CHEN Z J, DONG H Y, ZENG Z, et al. Time domain hydrodynamic analysis of box-horizontal plate floating breakwater under wave action [J]. *Taiwan Strait*, 2012, 31(1): 114—120. (in Chinese)
- [15] 严建国, 戴小平, 孙芦忠. 矩形浮箱式防波堤消浪特性分析 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 6(1): 67—70.
YAN J G, DAI S P, SUN L Z. Analysis of wave dissipation characteristics of rectangular floating box

- type breakwater [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2005, 6(1): 67–70. (in Chinese)
- [16] WILLIAMS A N, LEE H S, HUANG Z. Floating pontoon breakwaters [J]. Ocean Engineering, 2000, 27: 221–240.
- [17] 黄衍顺, 林莉, 胡云昌. 基于遗传算法的浮式防波结构物形状最优化设计 [J]. 海洋工程, 1999, 17(4): 102–106.
- HUANG Y S, LIN L, HU Y C. Genetic algorithm based shape optimization design of floating wave protection structures [J]. The Ocean Engineering, 1999, 17(4): 102–106. (in Chinese)
- [18] 张恒铭, 胡俭俭, 周斌珍, 等. 波能装置与浮式防波堤集成系统的水动力性能 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(8): 1117–1122.
- ZHANG H M, HU J J, ZHOU B Z, et al. Hydrodynamic performance of integrated system composed of wave energy converter and floating breakwater [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(8): 1117–1122. (in Chinese)
- [19] HU J J, ZHOU B Z, VOGEL C, et al. Optimal design and performance analysis of a hybrid system combing a floating wind platform and wave energy converters [J]. Applied Energy, 2020, 269: 114998.
- [20] FENTON J D. A fifth-order Stokes theory for steady waves [J]. Journal of Waterway Portcoastal and Ocean Engineering, 1985, 111(2): 216–234.