



# 翼板浮式防波堤消波性能

陈城<sup>1</sup>, 陈新权<sup>1</sup>, 杨启<sup>1,2</sup>, 吕文亚<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240;

2. 上海交大海洋水下工程科学研究院有限公司, 上海 200231)

**摘要:** 随着近年来海岸工程与海上作业对浮式防波堤的需求不断增加, 提出了一种带翼板的新型浮式防波堤。基于三维势流理论, 对翼板浮式防波堤的消波性能进行了计算分析, 并与传统方箱式浮式防波堤进行对比。证明了在较长周期的波浪中, 翼板浮式防波堤拥有更好的消波能力。翼板浮式防波堤截面参数对消波性能的影响表明: 1) 箱体宽度越大、吃水越深, 防波堤消波效果越好; 翼板长度越长、角度越小, 最优消波效果对应的波浪周期越长。2) 适当调整截面参数, 可以使翼板浮式防波堤适应更多的海浪环境、增加更多的适用场景。

**关键词:** 翼板浮式防波堤; 透射系数; 消波性能; 势流理论

中图分类号: U 653.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0008-07

## Wave suppression performance of wing-plate floating breakwater

CHEN Cheng<sup>1</sup>, CHEN Xin-quan<sup>1</sup>, YANG Qi<sup>1,2</sup>, LYU Wen-ya<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture,

Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Jiao Tong University Underwater Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 200231, China)

**Abstract:** With the increasing demand for floating breakwaters in coastal engineering and offshore operations in recent years, we propose a new type of floating breakwater with wing plates. Based on the three-dimensional potential flow theory, we calculate and analyze the wave suppression performance of the new floating breakwater, and compared it with the common box-type floating breakwater. It is proven that the new floating breakwater has better wave suppression performance for waves of longer periods. The influence of the cross-sectional parameters of the wing plate floating breakwater on the suppression performance shows that: 1) The larger the box width and the deeper the draft, the better the wave suppression performance of the new breakwater. Besides, the longer the wing plate and the smaller the angle, the longer the wave period of best wave suppression performance. 2) Appropriate adjustment of the section parameters can make the floating breakwater with wing plates adapt to more wave environments and add more applicable scenarios.

**Keywords:** wing-plate floating breakwater; wave transmission coefficient; wave suppression performance; potential flow theory

随着近些年海洋工程的进步与发展, 为了减小海洋环境对施工作业流程的影响, 各类海洋工程对防波堤的需求越来越高。相比固定式防波堤,

浮式防波堤虽然消波能力略逊一筹, 但其具有部署方便快捷、建造维护成本低等特点, 近年来得到了广泛应用。

收稿日期: 2022-01-10

作者简介: 陈城(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为浮式防波堤性能。

通讯作者: 陈新权(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为海洋结构物水动力性能、海洋工程装备总体设计。

E-mail: chenxinquan@sjtu.edu.cn

Abul-Azm 等<sup>[1]</sup>的研究表明浮式防波堤对于波浪的反射效果与自身的尺寸(长、宽、高)紧密联系; Koutandos 等<sup>[2]</sup>的试验研究表明对于单个固定的浮式防波堤, 消波效率与相对宽度(防波堤宽度/波长)和相对吃水(吃水/水深)成正比; Loukogeorgaki 等<sup>[3]</sup>对多模块连接式的浮式防波堤开展了三维试验研究, 结果表明浮式防波堤的结构响应主要与入射的波浪周期有关; Christensen 等<sup>[4]</sup>通过试验证明在浮式防波堤上附加翼板可以显著地减小防波堤运动。陈力<sup>[5]</sup>在波浪水槽中研究了固定不动二维浮箱式防波堤的消波情况, 得到了透射系数(wave transmission coefficient)随周期和吃水深度变化的特性; 侯勇等<sup>[6]</sup>通过试验研究了结构相对堤宽(堤宽/堤长)、相对波高(波高/水深)、以及相对吃水(吃水/水深)等对波浪透射系数的影响; 郑艳娜等<sup>[7]</sup>对不规则波作用下方箱浮式防波堤的受力特性进行了研究, 结果表明在防波堤受力中垂向力是主要的; 沈雨生等<sup>[8]</sup>通过物理模型试验, 分析了浮箱宽度、前后浮箱连接方式、前后浮箱间距以及浮箱入水深度等因素对双浮箱式浮式防波堤消波性能的影响。

目前国内外关于浮式防波堤性能表现的研究已比较丰富, 但在防波堤形式上还有很大的创新空间。笔者提出了一种带倾斜翼板的新型浮式防波堤, 基于三维势流理论对其在波浪上的运动表现与消波性能进行计算分析, 并探讨截面几何参数对防波堤消波性能的影响, 为实际应用提供了借鉴和参考。

1 计算理论

1.1 三维势流理论

基于三维势流理论, 假设流体是无旋无黏的不可压缩理想流体, 在流体域内存在速度势, 速度势满足拉普拉斯方程和边界条件。假设浮体运动是微幅的, 可以将速度势分解成入射势、绕射势、辐射势, 利用源汇分布法和格林函数可以确定速度势。

速度势函数为:

$$\phi(\mathbf{X}, t) = a_w \cdot \varphi(\mathbf{X}) \cdot e^{-i\omega t} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{X}$  为流场中任一点的位置矢量;  $t$  为时间;  $\phi(\mathbf{X}, t)$  为流场速度势;  $a_w$  为入射波波幅;  $\varphi(\mathbf{X})$  为空间速度势;  $\omega$  为波浪圆频率。

基于速度势, 利用伯努利方程可以计算作用在浮体湿表面上的压力:

$$p = -\rho \frac{\partial \phi(\mathbf{X}, t)}{\partial t} \quad (2)$$

式中:  $p$  为水动力压力;  $\rho$  为流体密度。

将水动力压力沿湿表面积分, 可求得作用在浮体上的波浪载荷。根据浮体受到的波浪载荷就可以进一步求解浮体运动。

浮体运动方程为:

$$(\mathbf{M} + \mathbf{a}) \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{b} \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{c} \mathbf{X} = \mathbf{F}_w + \mathbf{F}_{MR} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{M}$  和  $\mathbf{a}$  分别为质量矩阵与附加质量矩阵;  $\mathbf{b}$  为阻尼矩阵;  $\mathbf{c}$  为恢复力矩阵;  $\mathbf{F}_w$  为波浪力;  $\mathbf{F}_{MR}$  为系泊系统提供的约束力;  $\mathbf{X}$ 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}$  分别为浮体运动的位移、速度与加速度。

结合浮体运动与速度势, 可以得到自由面方程。引入微幅波假定, 根据自由表面动力学边界条件, 可以得到波面结果:

$$\zeta = -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (4)$$

式中:  $\zeta$  为波面升高;  $g$  为重力加速度。

根据防波堤后方波面结果即可确定浮式防波堤消波效果。

1.2 透射系数

浮式防波堤的消波性能一般用透射系数来衡量。透射系数定义为防波堤后方透射波浪与防波堤前方入射波浪波高的比值:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (5)$$

式中:  $K_t$  为透射系数;  $H_t$  与  $H_i$  分别为透射波高与入射波高。

2 水动力分析

在传统方箱型的基础上, 新型浮式防波堤在两侧加装具有一定角度的翼板, 增加了浮式防波堤的吃水和垂向挡水面积, 以提高浮式防波堤的

消波效果。新型浮式防波堤截面形式见图 1。初步选定浮式防波堤截面尺寸参数：宽度 12 m，高度 8 m，吃水 3 m，翼板长度 3 m，翼板宽度 2 m，翼板角度 130°。

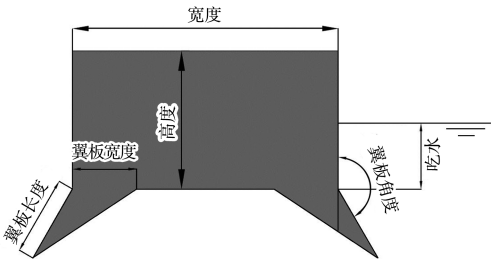


图 1 翼板浮式防波堤截面形式

基于三维势流理论，对箱体尺寸相同的新型浮式防波堤和传统方箱浮式防波堤运动性能进行对比分析，主要考虑两种浮式防波堤的垂荡与横摇运动，计算得到两者的幅值运动响应见图 2。

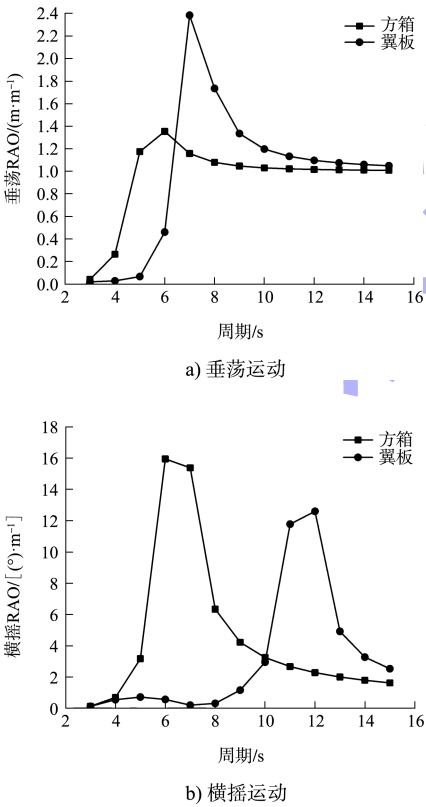


图 2 两种浮式防波堤幅值运动响应

对于垂荡运动，带翼板的防波堤的垂荡响应在短周期波浪中相对较低、在长周期波浪中相对较高，其峰值相对更高，峰值对应的波浪周期更长；对于横摇运动，带翼板的浮式防波堤的响应

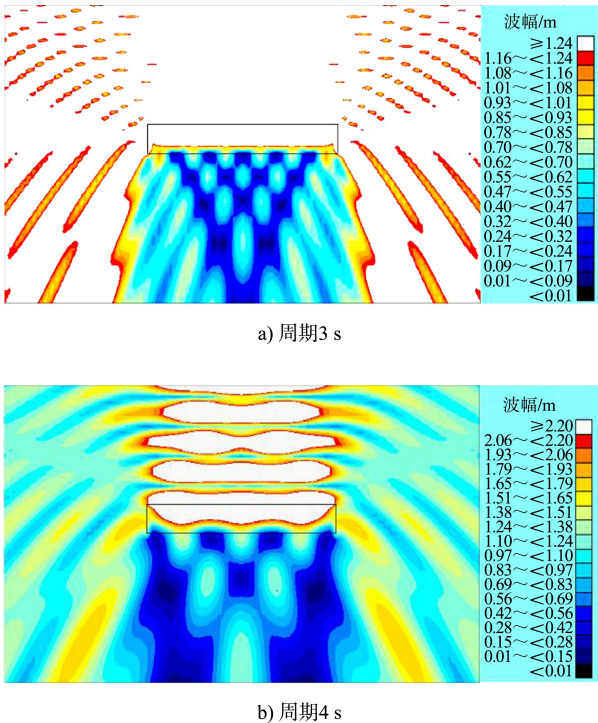
峰值水平较低，且峰值对应的波浪周期较长。相较于方箱式防波堤，新型防波堤下部安装的翼板改变了防波堤垂荡与横摇固有周期，且对横摇有缓和作用，形成了两种浮式防波堤垂荡与横摇运动响应的差别。

3 消波性能对比分析

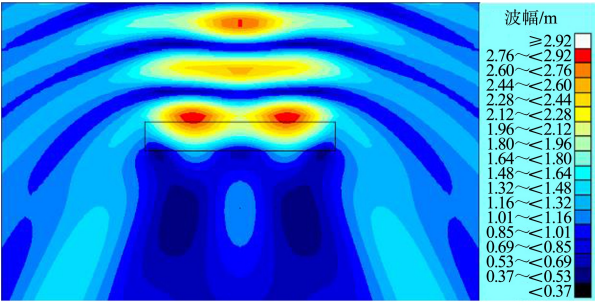
选取周期 3~10 s 的单位波幅规则波，对比分析箱体尺寸相同的翼板浮式防波堤与方箱浮式防波堤的消波性能。

3.1 翼板浮式防波堤消波性能

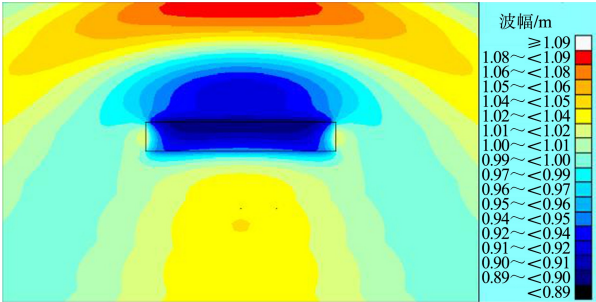
图 3 为翼板浮式防波堤消波过程的波幅云图。在周期 3、4 s 的情况下，透射波浪较少，防波堤运动幅度比较小，后方波浪主要由两端绕射波浪叠加形成，既有消波良好的区域，也有消波不利的区域，呈网状夹杂分布；在周期 5~7s 的情况下，防波堤运动幅度比较大，后方波浪主要由透射波浪和辐射运动产生波浪叠加形成，浮式防波堤后方消波效果良好，大部分区域透射系数介于 0.5~0.7；在周期 8~10 s 的情况下，防波堤随波浪起伏，后方波浪主要为透射波浪，防波堤后方大部分区域波幅与入射波波幅一致，浮式防波堤基本失去了消波的作用。







c) 周期5 s

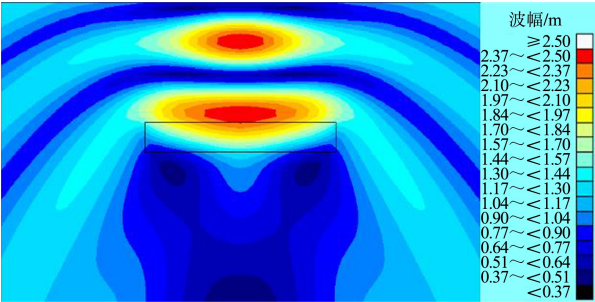


h) 周期10 s

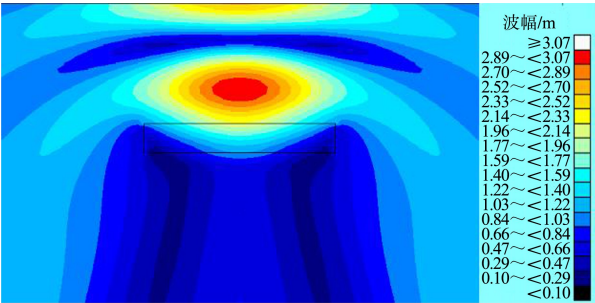
图 3 翼板浮式防波堤消波情况

3.2 方箱浮式防波堤消波性能

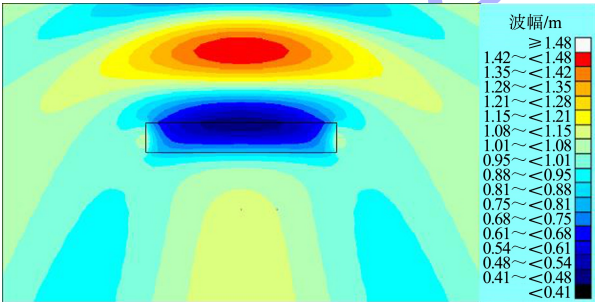
图 4 为方箱浮式防波堤消波过程的波幅云图。在周期 3、4 s 的情况下, 既有消波良好的区域, 也有消波不利的区域, 呈网状夹杂分布; 在周期 5 s 的情况下, 浮式防波堤后方消波效果良好, 大部分区域透射系数介于 0.5~0.7; 在周期 6~10 s 的情况下, 防波堤后方大部分区域波幅与入射波波幅一致, 浮式防波堤基本失去消波的作用。



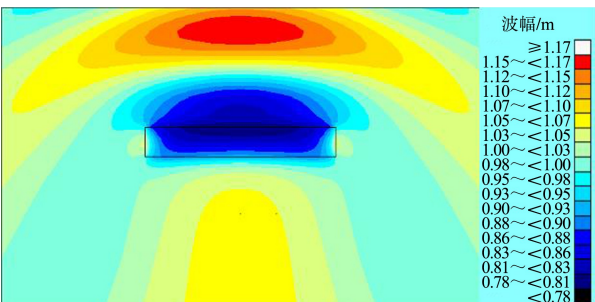
d) 周期6 s



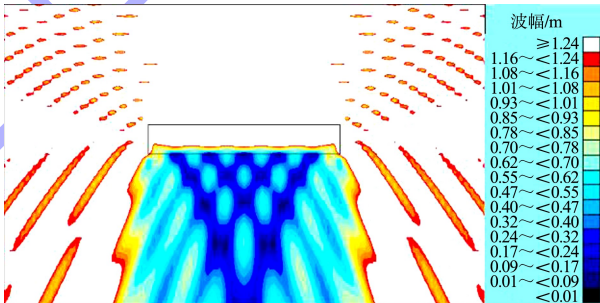
e) 周期7 s



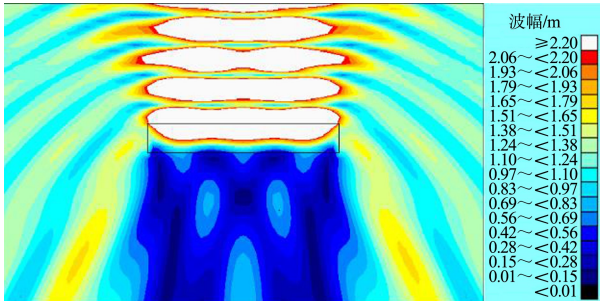
f) 周期8 s



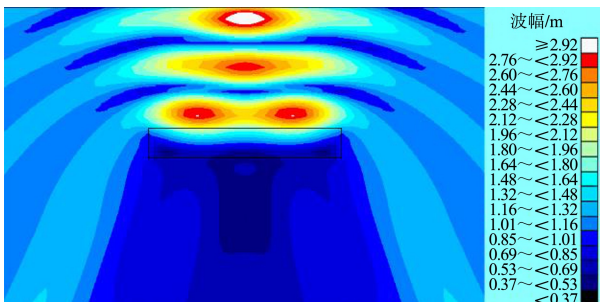
g) 周期9 s



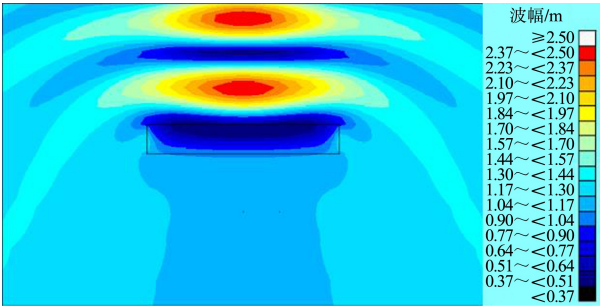
a) 周期3 s



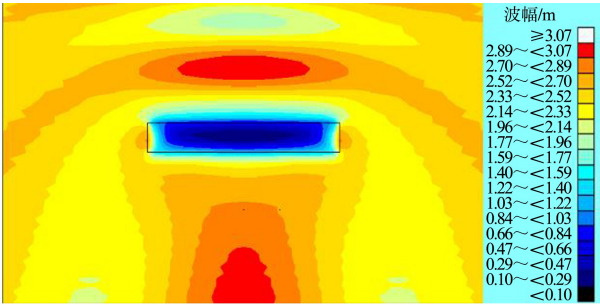
b) 周期4 s



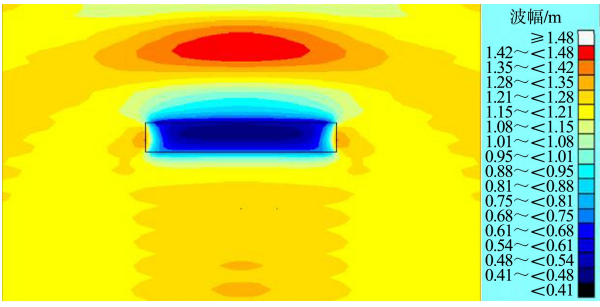
c) 周期5 s



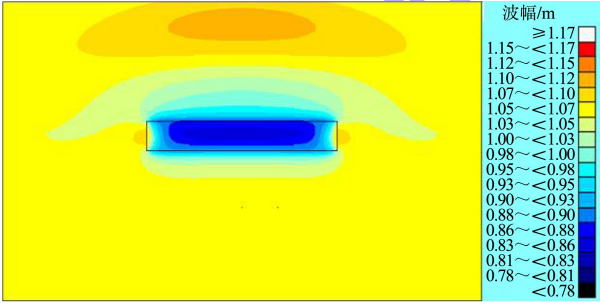
d) 周期6 s



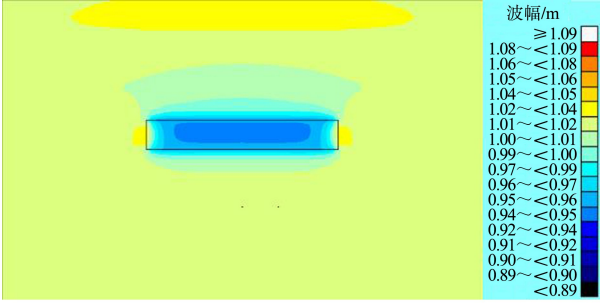
e) 周期7 s



f) 周期8 s



g) 周期9 s

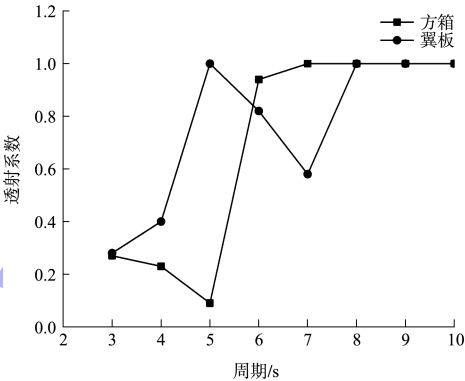


h) 周期10 s

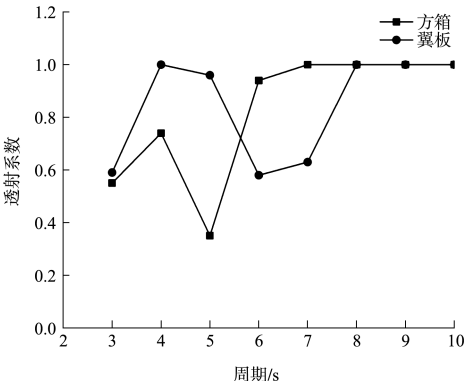
图 4 方箱浮式防波堤消波情况

3.3 消波效果对比

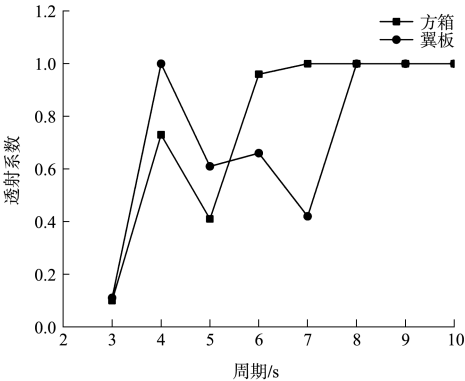
防波堤后方波浪情况复杂，取防波堤后方中轴线上 30、50 m 以及从它们偏离中轴线15 m 处矩形区域 4 个角位置作为参考，综合考虑这 4 个参考位置处的透射系数，对比两种浮式防波堤在不同波浪周期条件下的消波效果，结果见图 5。



a) 堤后30 m



b) 堤后50 m



c) 堤后30 m, 偏心15 m

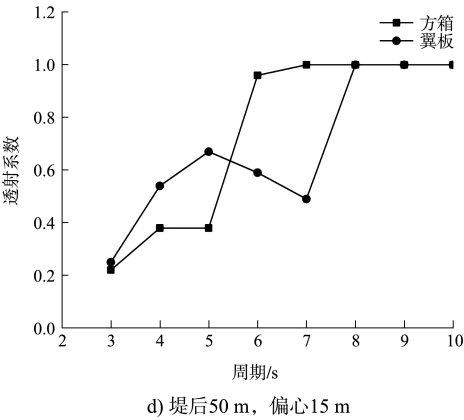


图 5 两种浮式防波堤消波效果对比

在周期 6、7 s 的情况下, 翼板浮式防波堤消波效果更好, 而方箱浮式防波堤在整个防波堤后方没有起到消波的作用。结合两种浮式防波堤运动表现, 翼板浮式防波堤垂荡固有周期在 7 s 附近, 垂荡运动较大, 更多的波能传递给了浮体结构, 所以在周期 6、7 s 的情况下, 消波效果较好<sup>[9]</sup>。可以发现: 加装翼板提高了浮式防波堤垂荡运动的固有周期, 使得带翼板的浮式防波堤在面对较长周期的波浪时, 能够吸收更多的波浪能, 从而能拥有比方箱浮式防波堤更好的消波表现。

4 翼板浮式防波堤参数影响分析

在防波堤后方中轴线上 30、50 m 处设置参考点, 以上述两个参考点处透射系数为指标, 分析截面设计参数对翼板浮式防波堤消波效果的影响。选取的截面设计参数包括箱体宽度、箱体吃水、翼板长度、翼板角度。

4.1 箱体宽度的影响

箱体宽度对透射系数影响结果见图 6。透射系数随周期增大呈现先增加后减小再增加的变化趋势, 在周期 7 s 左右出现了局部极小的情况。波浪周期较短时, 后方波浪主要由两端绕射波浪叠加形成, 宽度的影响比较明显, 透射系数差距较大; 而在波浪周期较长时, 宽度的变化范围相比于波长较小, 消波效果变化不大, 透射系数差距很小。在周期 8 s 的条件下, 宽度 20 m 的浮式防波堤透射系数在 0.4 以下, 是因为此种情况下辐射波浪与透射波浪由于相位原因抵消一部分, 所以消波效果较好。

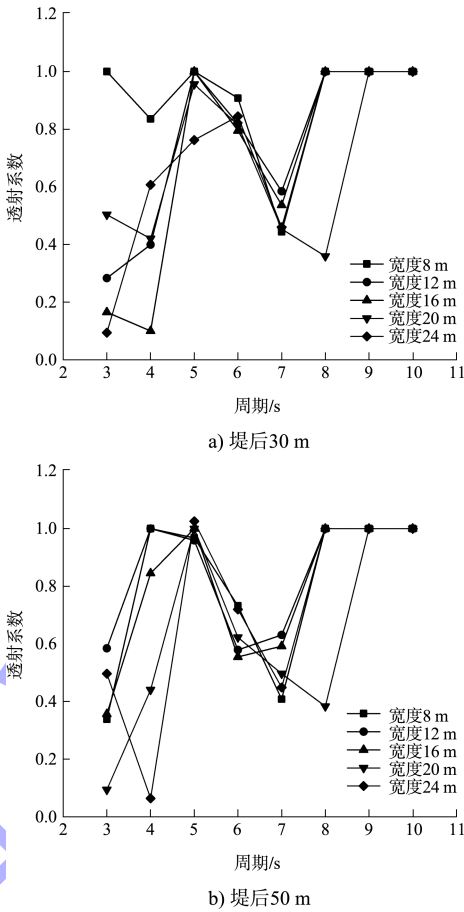
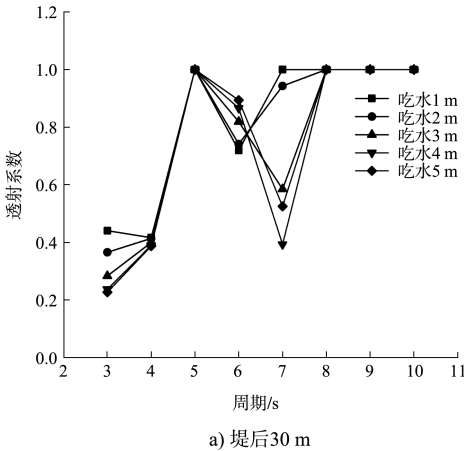


图 6 箱体宽度对消波效果的影响

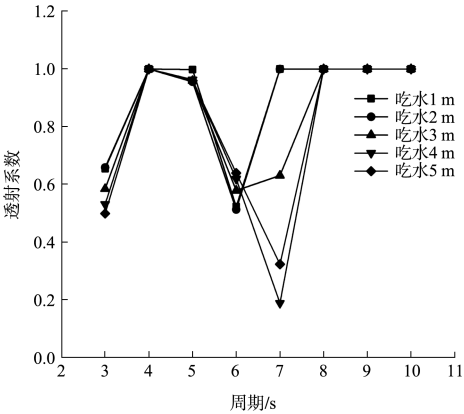
4.2 箱体吃水的影响

箱体吃水对透射系数的影响结果见图 7。透射系数随周期增大呈现先增加后减小再增加的趋势。在周期 7 s 左右时, 透射系数出现了局部极小的情况。在大多数情况, 吃水变化对防波堤透射系数影响不大, 但在波浪周期靠近垂荡固有周期时, 吃水对透射系数影响明显。说明在垂荡固有周期附近, 吃水对防波堤垂荡运动幅值有较大影响, 消耗波能情况不同、消波效果有较大差距。



a) 堤后30 m

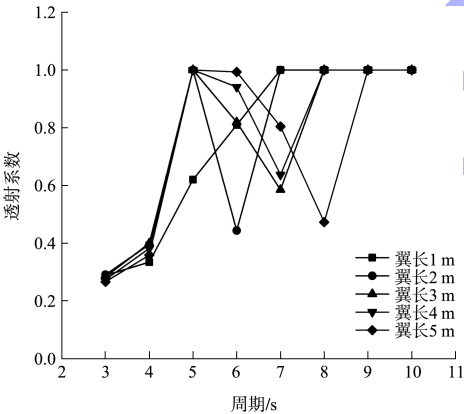




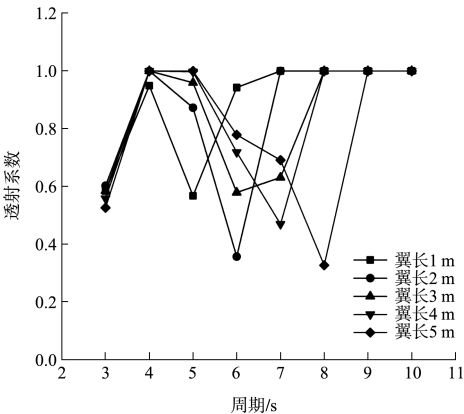
b) 堤后50 m  
图 7 箱体吃水对消波效果的影响

4.3 翼板长度的影响

翼板长度对透射系数影响结果见图 8。透射系数随周期增大呈现先增加后减小再增加的趋势。对于短周期波浪，后方波浪主要由两端绕射波浪叠加形成，翼板长度对消波效果无明显影响。而增加翼板长度，增加了防波堤垂向挡水面积，垂荡固有周期也有所增加，所以极小值对应的波浪周期随翼板长度增加而增加。



a) 堤后30 m

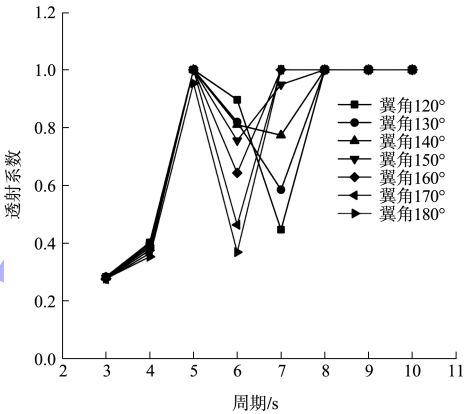


b) 堤后50 m

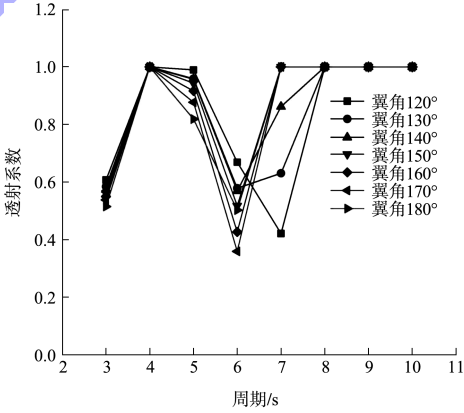
图 8 翼板长度对消波效果的影响

4.4 翼板角度的影响

翼板角度对透射系数影响结果见图 9。透射系数随周期增大也是呈现先增加后减小再增加的趋势。对于短周期波浪，后方波浪主要由两端绕射波浪叠加形成，翼板角度对消波效果无明显影响。而增加翼板角度，减少了防波堤挡水面积，垂荡固有周期也有所减小，所以极小值对应的波浪周期随翼板角度增加而减小。



a) 堤后30 m



b) 堤后50 m

图 9 翼板角度对消波效果的影响

5 结论

1) 通过数值模拟证明加装翼板可以提高浮式防波堤垂荡运动的固有周期，使得带翼板的浮式防波堤在面对较长周期的波浪时，能够吸收更多的波浪能，从而能拥有比方箱浮式防波堤更好的消波表现。

2) 箱体宽度对翼板浮式防波堤消波效果的影响主要体现在短周期波浪中，箱体吃水的影响主要体现在垂荡固有周期附近，总的看来，箱体宽度越大，吃水越深、消波效果越好。