



带翼板浮式防波堤消浪性能研究*

张天向¹, 王贯宇¹, 伍磊¹, 谢书刚¹, 涂佳黄^{1,2}

(1. 湘潭大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 佛山大学 交通与土木建筑学院, 广东 佛山 528225)

摘要: 浮式防波堤能够为海洋工程装备提供有效防护, 满足海上设施日益增长的防护需求。使用计算流体力学方法对带翼板浮式防波堤消浪性能进行数值模拟, 分析翼板参数对防波堤消浪效果和涡量分布的影响。研究表明, 当翼板角度过大时翼板尖端产生的漩涡强度变小, 防波堤的消浪性能降低; 当波高较大时, 翼板角度减小使得漩涡脱落时间延长, 从而提升其消浪性能; 翼板长度较短会加速漩涡脱落, 导致其消浪性能减弱。

关键词: 浮式防波堤; 计算流体力学; 透射系数; 涡量特性; 消浪性能

中图分类号: U656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0035-09

Wave dissipation performance of floating breakwater with wing plates

ZHANG Tianxiang¹, WANG Guanyu¹, WU Lei¹, XIE Shugang¹, TU Jiahuang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. College of Transport and Civil Architecture, Foshan University, Foshan 528225, China)

Abstract: Floating breakwaters can provide effective protection for marine engineering equipment and meet the increasing protection needs of offshore facilities. Computational fluid dynamics method is used to numerically simulate the wave dissipation performance of floating breakwater with wing plates, and the influence of wing plate parameters on wave dissipation effect and vortex distribution of the breakwater is analyzed. The research results show that when the angle of the wing plate is too large the strength of the vortex generated at the tip of the wing plate becomes smaller, and the wave dissipation performance of the breakwater is reduced. When the wave height is large, the reduction of the wing plate angle makes the vortex shedding time longer, thus improving its wave dissipation performance. The shorter length of the wing plate accelerates the shedding of vortex, resulting in the reduction of its wave dissipation performance.

Keywords: floating breakwater; computational fluid dynamics; transmission coefficient; vortex characteristics; wave dissipation performance

我国提出的“海洋强国”战略吸引了大量学者和企业投入海洋开发研究, 各类海洋工程对防波堤的需求越来越高。浮式防波堤具有部署方便快捷、建造维护成本低等特点, 近年来得到了广泛应用^[1],

诸多学者对各类浮式防波堤进行了大量的研究。Yuan等^[2]建立黏性数值水池, 通过CFD-FEM耦合方法研究了五阶Stokes波作用下三维浮板的水弹性运动响应, 通过与实验水池的数据进行对比

收稿日期: 2024-09-20

*基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2022JJ50038); 湖南省教育厅科学研究项目(21A0103); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515240077)

作者简介: 张天向(2000—), 男, 硕士研究生, 从事波浪与海洋结构物相互作用研究。

通信作者: 王贯宇(1991—), 男, 博士, 讲师, 从事流固耦合研究。E-mail: wanggy0811@163.com

证明该方法具有良好的精度。周效国等^[3]利用STAR-CCM+建立了二维水槽的数值模型,分析研究多层直立挡板透空式防波堤的透射系数随入射波波要素的变化规律,并通过物理模型试验数据与数值研究结果的对比,验证了数值研究结果的可靠性。张万威等^[4]在对桩基挡板式透空堤进行堤型优化研究中,证明增加挡浪板的入水深度或增加堤顶高程亦或两者同时调整等方式对其消波特性有增强效果。Koraim等^[5]对带有垂直板的浮式防波堤开展一系列模型试验,探究垂直板数量、锚链长度等参数对浮式防波堤透射系数的影响。Liu等^[6]采用光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法模拟一种新型翼箱式浮式防波堤与波浪之间的非线性相互作用,通过研究浮体周围水体的速度场揭示波浪能耗散的机理,并确定翼板最佳的添加位置。

基于上述学者的研究,发现改变浮式防波堤结构参数能影响其消浪性能。为进一步探究带翼板浮式防波堤的结构参数对其消浪性能和流场的影响,本文建立二维数值波浪水槽,探讨在不同工况下带翼板浮式防波堤的消浪性能。

1 数值方法与模型验证

1.1 数值方法

采用雷诺时均的纳维-斯托克斯方程作为基本控制方程,其连续性方程及动量方程分别为:

$$\nabla U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla(\rho U U) = \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla U) + C_k \nabla \alpha - \nabla p_{\text{rgh}} - gh \nabla \rho \quad (2)$$

式中: U 为流体速度; ρ 为流体密度; p_{rgh} 为流体的修正压强(动水压强); μ_{eff} 为考虑分子动力黏性和紊流作用的有效黏性系数; C_k 为流体表面张力系数,一般取为 0.07; α 为体积分数法引入的体积分数^[7]。

使用体积分数法(volume of fluid, VOF)捕捉自由液面,根据体积分数的值,即可区分网格中不同相或流体的存在。体积分数传输方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V \alpha_i dV \right) + \oint_a \alpha_i v da = \int_V \left(S_{\alpha_i} - \frac{\alpha_i}{\rho_i} \frac{d\rho_i}{dt} \right) dV - \int_V \frac{1}{\rho_i} \nabla(\alpha_i \rho_i v_{di}) dV \quad (3)$$

式中: v 为混合物质量平均速度; v_{di} 为第 i 种流体的扩散速度; V 为网格的总体积; ρ_i 为第 i 种流体的密度; S_{α_i} 为自定义的相源项。在气液两相流中, $\alpha=0$ 表示此处为空气, $\alpha=1$ 表示此处为水, $0 < \alpha < 1$ 表示此处为交界面^[8]。

透射系数 K_t 的大小反映了防波堤的消浪性能, K_t 越大浮堤的消浪性能越差。反射系数 K_r 的大小表示反射波浪能量的多少,表达式为:

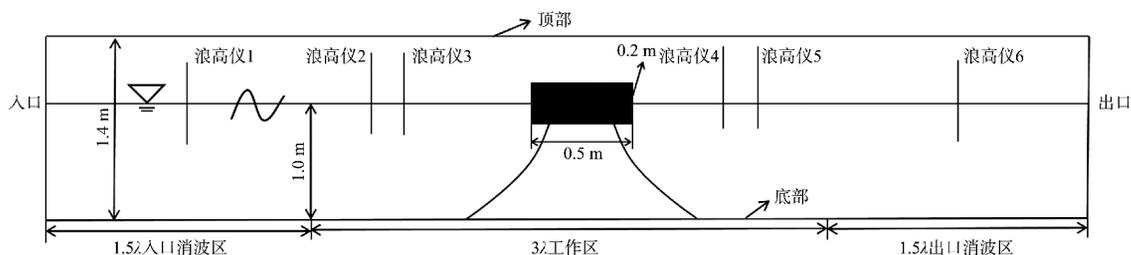
$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (4)$$

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (5)$$

式中: H_t 为防波堤后的透射波高; H_r 为防波堤前的反射波高; H_i 为入射波高。

1.2 模型验证

图1为模型的计算域,其长度设为6倍波长,高1.4 m,计算域前后1.5倍波长范围为消波区,中间3倍波长范围为工作区,计算模型置于中间位置^[9]。



注: λ 为波长。

图1 数值计算域

Fig. 1 Numerical calculation domain

根据文献[10]中物理模型试验进行验证, 防波堤尺寸为 0.5 m×0.2 m (长×高), 防波堤初始位置在计算域中点的静水面上, 锚链长 0.95 m, 入射波参数为: $H_i=0.1$ m, 周期 $T=1.0\sim 2.0$ s。如图 2 所示, 本文计算 K_t 与试验结果吻合较好, 相对误差小于 7%, 说明 CFD 模型满足精度要求。

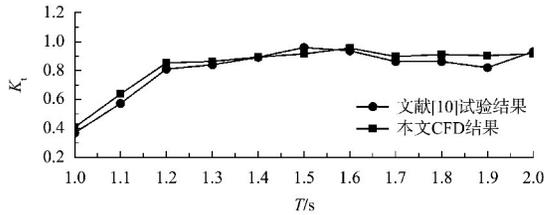


图 2 本文模拟结果与文献[10]试验结果的对比

Fig. 2 Comparison between simulation results in this paper and experimental results in literature [10]

1.3 工况设置

带翼板浮式防波堤模型如图 3 所示, 防波堤主体宽 0.5 m、高 0.2 m、吃水深度 0.1 m, 翼板宽 (翼板外侧与内侧的最大宽度) 0.05 m, 翼板长度 L 为翼板外侧的长度, 翼板角度 θ 为水平线与翼板外侧的夹角, 中间垂直板宽 0.02 m, 高 0.03 m。方箱式防波堤即为带翼板浮式防波堤的箱式主体。

对不同翼板角度、翼板长度的带翼板浮式防波堤进行计算, 模型 A、B、C 翼板角度递增、翼板长度不变, 模型 D、E、F 翼板长度递增、翼板角度不变。为了满足研究的普适性, 对翼板角度

进行研究时选取长度中间值 0.10 m, 对翼板长度进行研究时选取角度中间值 60° , 模型 G 为方箱式的对比模型, 采用主流角度 45° , 参数见表 1。

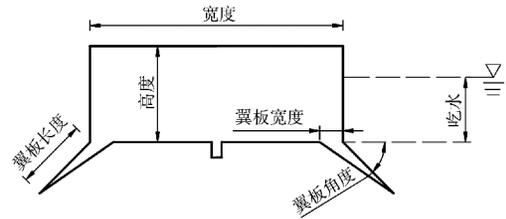


图 3 带翼板浮式防波堤模型

Fig. 3 Model of floating breakwater with wing plates

表 1 带翼板浮式防波堤模型参数

Tab. 1 Model parameters of floating breakwater with wing plates

模型编号	$\theta/(^\circ)$	L/m
A	30	0.10
B	60	
C	90	
D	60	0.05
E		0.10
F		0.15
G	45	0.10

1979—2015 年, 我国南海海域统计的平均波高 H_{avg} 为 0.9~1.8 m, 波浪周期介于 5.6~7.0 s^[11]。根据 Goda 等^[12] 提出的有效波高 H_s 与最大波高 H_{max} 之间的关系确定波浪环境载荷: $H_{max} = 1.8H_s$, $H_s = 1.5H_{avg}$ 。采用 1:20 缩尺模型进行研究, 波浪工况设置见表 2。

表 2 波浪工况设置

Tab. 2 Settings of wave working conditions

工况	水深 h/m	实际波高/m	模拟波高/m	实际周期/s	模拟周期/s
1	1.00	2.00	0.10	4.90, 5.40, 5.80, 6.30, 6.70, 7.20	1.10, 1.20, 1.30, 1.40, 1.50, 1.60
2	1.00	3.00	0.15	4.90, 5.40, 5.80, 6.30, 6.70, 7.20	1.10, 1.20, 1.30, 1.40, 1.50, 1.60

2 结果分析

2.1 方箱式与带翼板浮式防波堤的消浪性能与流场分析

如图 4 所示, 在 $H_i=0.10$ m 条件下, 将带翼板浮式防波堤 ($\theta=45^\circ, L=0.10$ m) 的 K_t 随波周期的变化曲线与方箱式进行对比。带翼板浮式防波

堤的 K_t 不断减小且数值小于方箱式, 方箱式则是先增大后减小。带翼板浮式防波堤在长周期条件下 K_t 下降较多, 因为翼板在面对较长周期波浪时能够吸收更多的波浪能, 从而具有比方箱浮式防波堤更好的消浪性能。

图 5、6 分别为方箱式与带翼板浮式防波堤

($\theta=45^\circ, L=0.10\text{ m}$) 一个波周期内的涡量分布情况。方箱式防波堤运动过程中 2 个顶角处存在强度较小的涡流，脱落的涡流在顶角附近流动并很快扩散消亡^[13]，下游涡流脱落从图 5b)~5c) 只经过 1/6 周期，涡流消亡从图 5c)~5e) 经过 1/3 周期。值得注意的是，方箱式防波堤的涡流形成慢、消亡快，存在一段真空期，在图 5d)~5e) 中防波堤箱体下游没有形成新的涡流，可能会影响方箱式防波堤的消浪性能。然而，带翼板浮式防波堤的上游翼板尖端在防波堤的运动下会产生一个强度较大的涡流，其脱落周期和入射波基本保持一致，脱落的涡流沿着翼板向防波堤主体运动且强度逐渐减小；下游翼板尖端随着防波堤的运动而形成一对较大的涡流，其脱落后逆时针的涡流慢慢增强，脱落后逆时针的涡流被新产生的涡流吸引，朝防波堤主体运动而向自由液面靠近，随后与自由液面相互作用发生波浪破碎。下游的涡流脱落从图 6a)~6c) 经过 1/2 个周期，涡流消亡速度缓慢，下游顺时针的涡流经过 2/3 个周期尚未完全消失，逆时针的涡流与自由液面发生碰撞后并没有完全消散，随后与防波堤主体碰撞而汇入新产生的逆

时针涡流，加速了新涡流的形成。与方箱式防波堤不同的是，带翼板浮式防波堤的涡流形成快、消亡慢，脱落的涡流还未完全消亡新的涡流就已经产生。

通过涡量场分析得出，2 种防波堤均能起到一定的消浪作用，这是由于涡流吸收了大量波浪能并与自由液面或防波堤碰撞，从而起到消浪的效果。翼板浮式防波堤形成的涡流大小、涡流强度和涡流的脱落时间明显大于方箱式，因此带翼板浮式防波堤消浪性能更好。

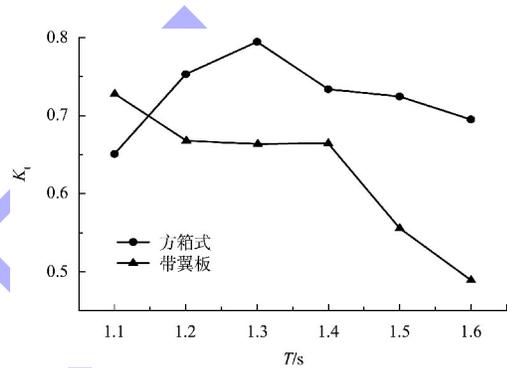
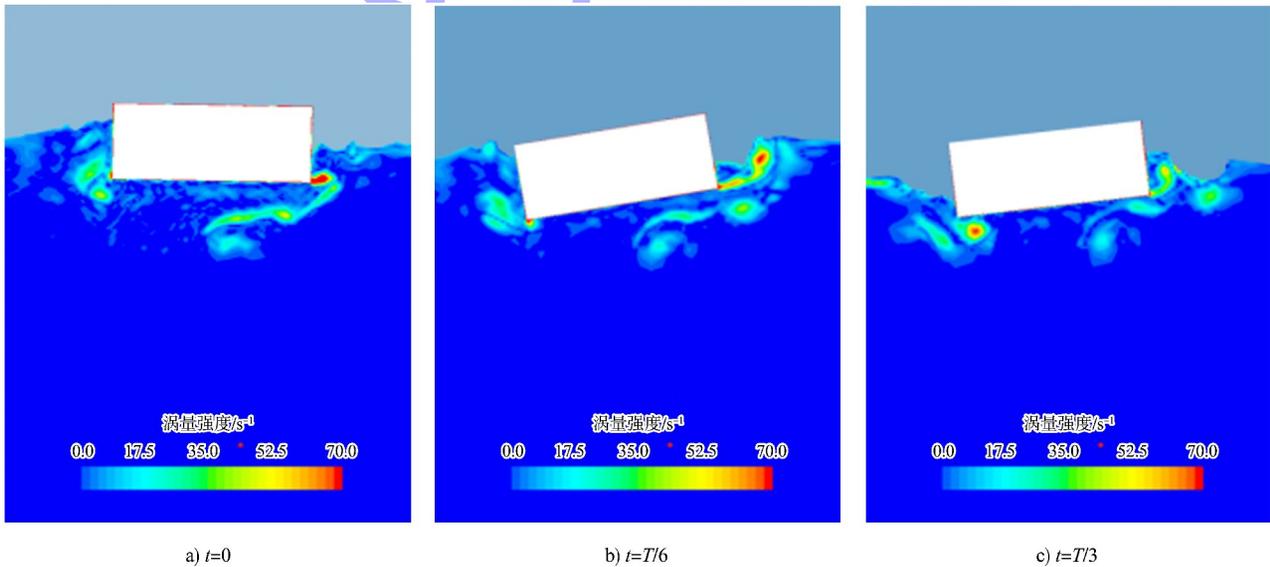


图 4 方箱式与带翼板浮式防波堤 K_t 的变化
 Fig. 4 Variation of K_t of square box type and floating breakwater with wing plates



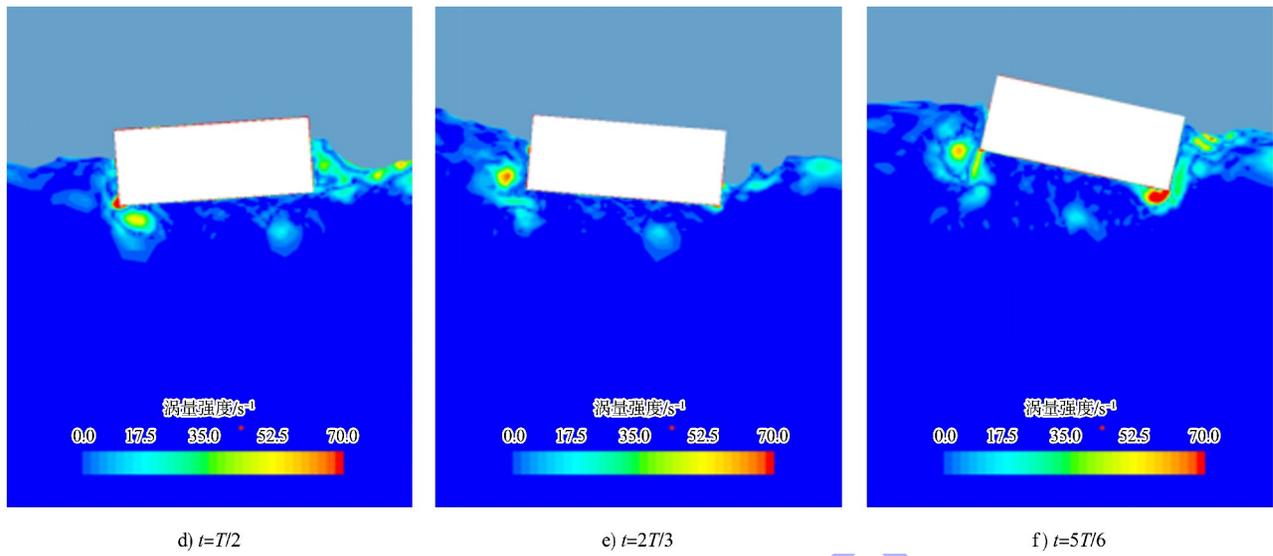


图 5 方箱式防波堤涡量分布
Fig. 5 Vortex distribution of square box breakwaters

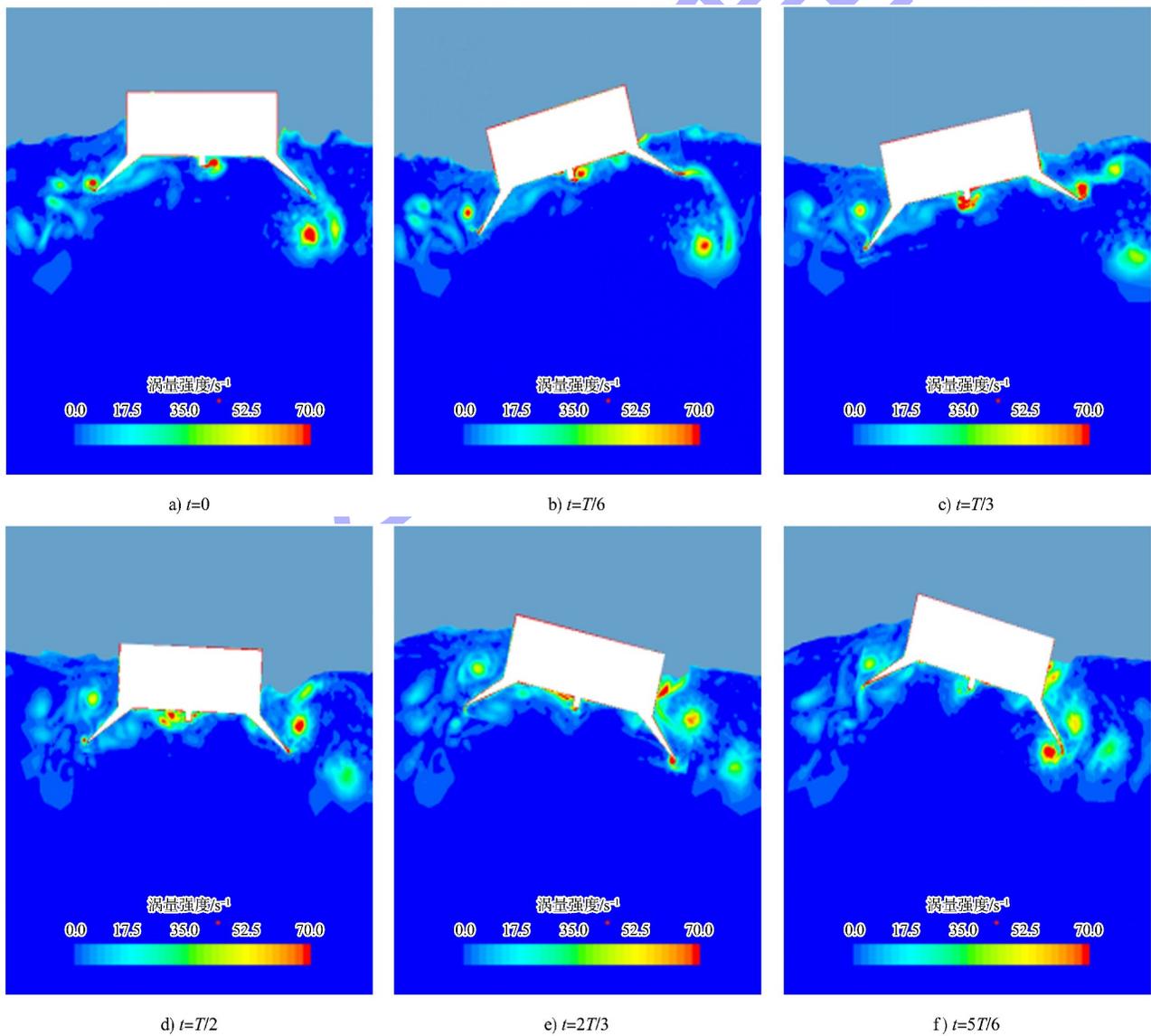


图 6 带翼板浮式防波堤涡量分布
Fig. 6 Vortex distribution of floating breakwaters with wing plates

2.2 不同翼板角度对带翼板浮式防波堤的影响

2.2.1 消浪性能

翼板角度对 K_l 和 K_r 影响结果见图7。由图7a)可知, $H_i=0.10\text{ m}$ 时, $\theta=30^\circ$ 的 K_l 稍大于 $\theta=60^\circ$, $\theta=90^\circ$ 的 K_l 由 0.34 增加到 0.90, 变化较大。 $H_i=0.15\text{ m}$ 时, 大部分周期内 $\theta=30^\circ$ 的 K_l 最小, 处于 0.62 以下。图7b)中2种工况下 $\theta=30^\circ$ 和 $\theta=60^\circ$ 的 K_r 都较为接近, 且都远大于 $\theta=90^\circ$ 。 $H_i=0.10\text{ m}$

时, $\theta=60^\circ$ 的 K_r 最大, 而 $H_i=0.15\text{ m}$ 时则转变为 $\theta=30^\circ$ 的最大, 进一步佐证了图7a)中对各模型消浪性能的判断。所有模型的 K_r 在大部分周期内会随着波周期的增加而减小, 这是因为模型的一个运动周期约为 1.07 倍波周期, 波浪与模型共同运动时会产生相位差, 波周期增大时, 波浪与模型之间的相位差逐渐变小, 共同运动会导致 K_r 减小, 这一现象与文献[14]的研究结果相同。

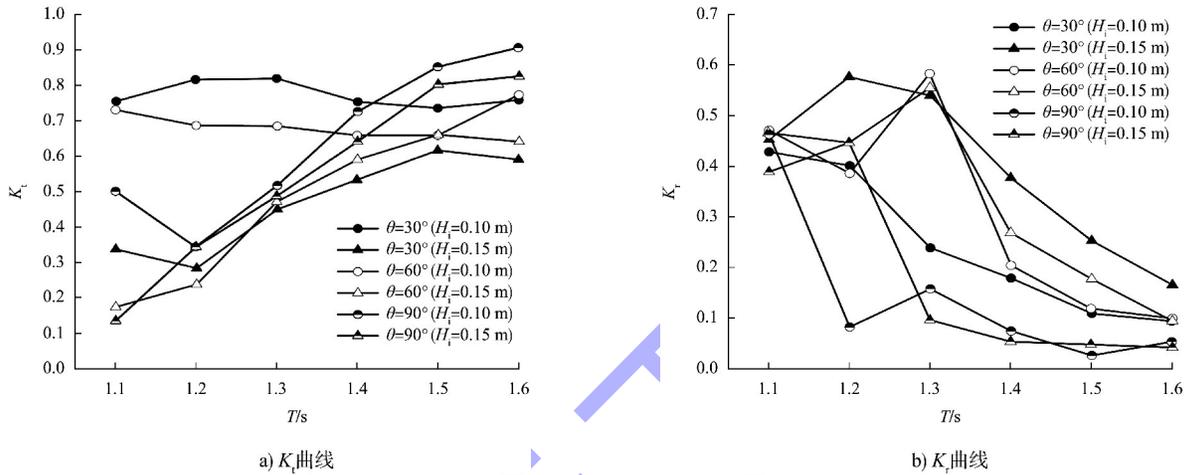


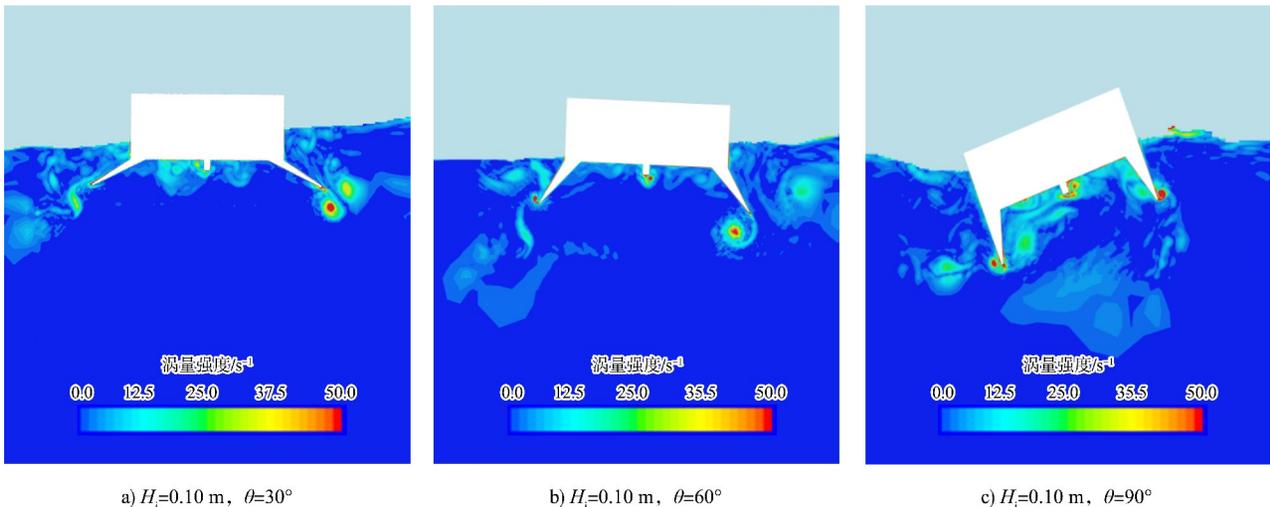
图7 翼板角度对防波堤消浪性能的影响

Fig. 7 Effect of wing plate angle on wave dissipation performance of breakwaters

2.2.2 流场分析

通过2.2.1节分析可知, 当 $H_i=0.10\text{ m}$ 时 $\theta=60^\circ$ 消浪性能最佳, 而当 $H_i=0.15\text{ m}$ 时 $\theta=30^\circ$ 消浪性能最佳。图8分别为不同模型同一时刻的涡量分布情况, 对比可知 $H_i=0.10\text{ m}$ 时 $\theta=90^\circ$ 的漩涡大小远远小于 $\theta=30^\circ$ 和 $\theta=60^\circ$, 且 $\theta=60^\circ$ 的漩涡稍大于 $\theta=30^\circ$, 使得 $\theta=30^\circ$ 的 K_l 稍大于 $\theta=60^\circ$, 如图7所示。 $\theta=90^\circ$ 时涡量分布情况与方箱式类似, 漩涡强度也较小, 在波

周期短时其 K_l 较小, 可能是由于 90° 翼板角度增加了波浪与防波堤的碰撞体积, 但随着波周期的增大形成的漩涡强度较小, 对后续的消浪效果作用不大, 导致模型 $\theta=90^\circ$ 的 K_l 逐渐增大。 $H_i=0.15\text{ m}$ 时 $\theta=30^\circ$ 与 $\theta=60^\circ$ 的漩涡大小强度比较接近, 但 $\theta=60^\circ$ 产生的漩涡比 $\theta=30^\circ$ 更早脱落, 而更长的脱落时间表示漩涡可吸收更多的波浪能, 当漩涡与自由液面或者防波堤碰撞时所消耗的波浪能就越多。



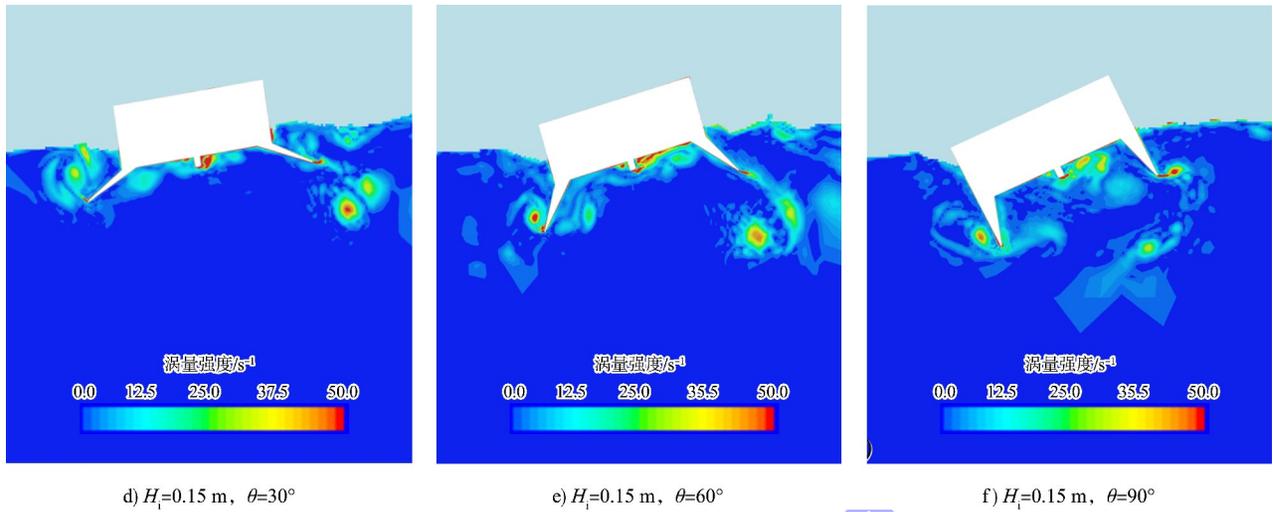


图 8 不同模型防波堤的涡量分布
Fig. 8 Vortex distribution of breakwaters with different models

2.3 不同翼板长度对于带翼板浮式防波堤的影响

2.3.1 消浪性能

由图 9a)可知, $H_i = 0.10\text{ m}$ 时 $L = 0.15\text{ m}$ 的 K_r 稍大于 $L = 0.10\text{ m}$, $L = 0.05\text{ m}$ 的 K_r 由 0.42 增加到 0.91, 变化较大, 所以 $L = 0.10\text{ m}$ 的消浪性能最稳定。 $H_i = 0.15\text{ m}$ 时所有模型的 K_r 均有随着

波周期的增大而增大的趋势, $L = 0.15\text{ m}$ 与 $L = 0.05\text{ m}$ 、 $L = 0.10\text{ m}$ 相比, K_r 平均分别小 17% 与 36%。另一方面, $H_i = 0.10\text{ m}$ 时 $L = 0.10\text{ m}$ 的 K_r 最大, $H_i = 0.15\text{ m}$ 时 $L = 0.15\text{ m}$ 的 K_r 最大, 比 $L = 0.10\text{ m}$ 平均大 7%, 如图 9b)所示。

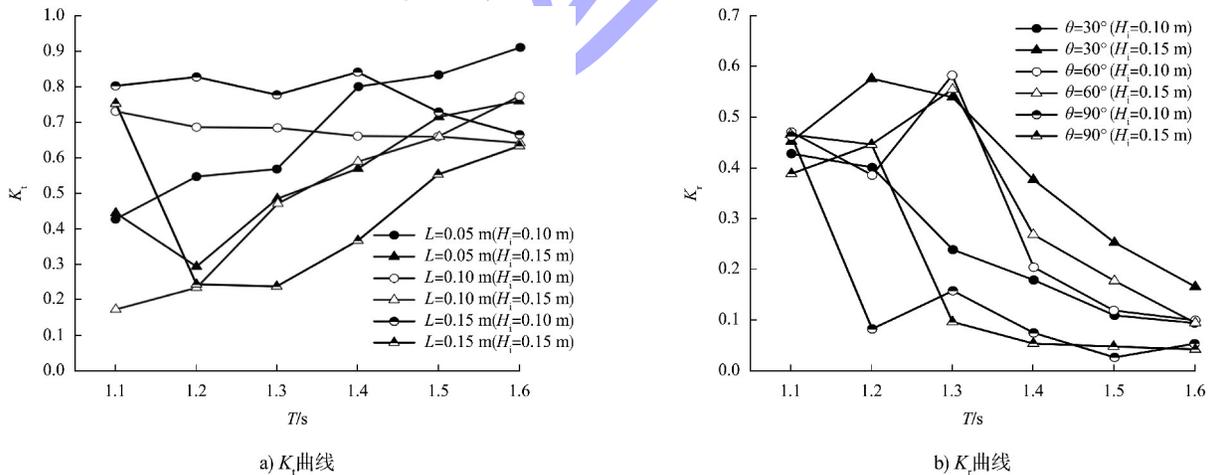


图 9 翼板长度对防波堤消浪性能的影响
Fig. 9 Effect of wing plate length on wave dissipation performance of breakwaters

2.3.2 流场分析

由 2.3.1 节分析可知, 当 $H_i = 0.10\text{ m}$ 时 $L = 0.10\text{ m}$ 消浪性能最佳, 当 $H_i = 0.15\text{ m}$ 时 $L = 0.15\text{ m}$ 消浪性能最佳。图 10 为各模型同一时刻的涡量分布情况, 对比可得 $H_i = 0.10\text{ m}$ 时 $L = 0.05\text{ m}$ 与 $L = 0.15\text{ m}$

的漩涡强度比 $L = 0.10\text{ m}$ 小, $L = 0.05\text{ m}$ 形成的漩涡虽然更大, 但是漩涡的脱落时间较短。观察 $H_i = 0.10\text{ m}$ 时 $L = 0.05\text{ m}$ 的下游翼板发现产生的一对漩涡已经脱落, 而 $H_i = 0.15\text{ m}$ 时 $L = 0.05\text{ m}$ 漩涡的脱落时间更短, 后者的下游翼板区域存在

2 对漩涡，由于脱落时间短使得上次产生的漩涡还未远离防波堤就已形成新的漩涡。对比下游翼板的漩涡位置发现， $H_i = 0.15 \text{ m}$ 时 $L = 0.15 \text{ m}$ 的漩

涡脱落时间更长，代表漩涡吸收的波浪能更多，进而表现为更好的消浪效果。

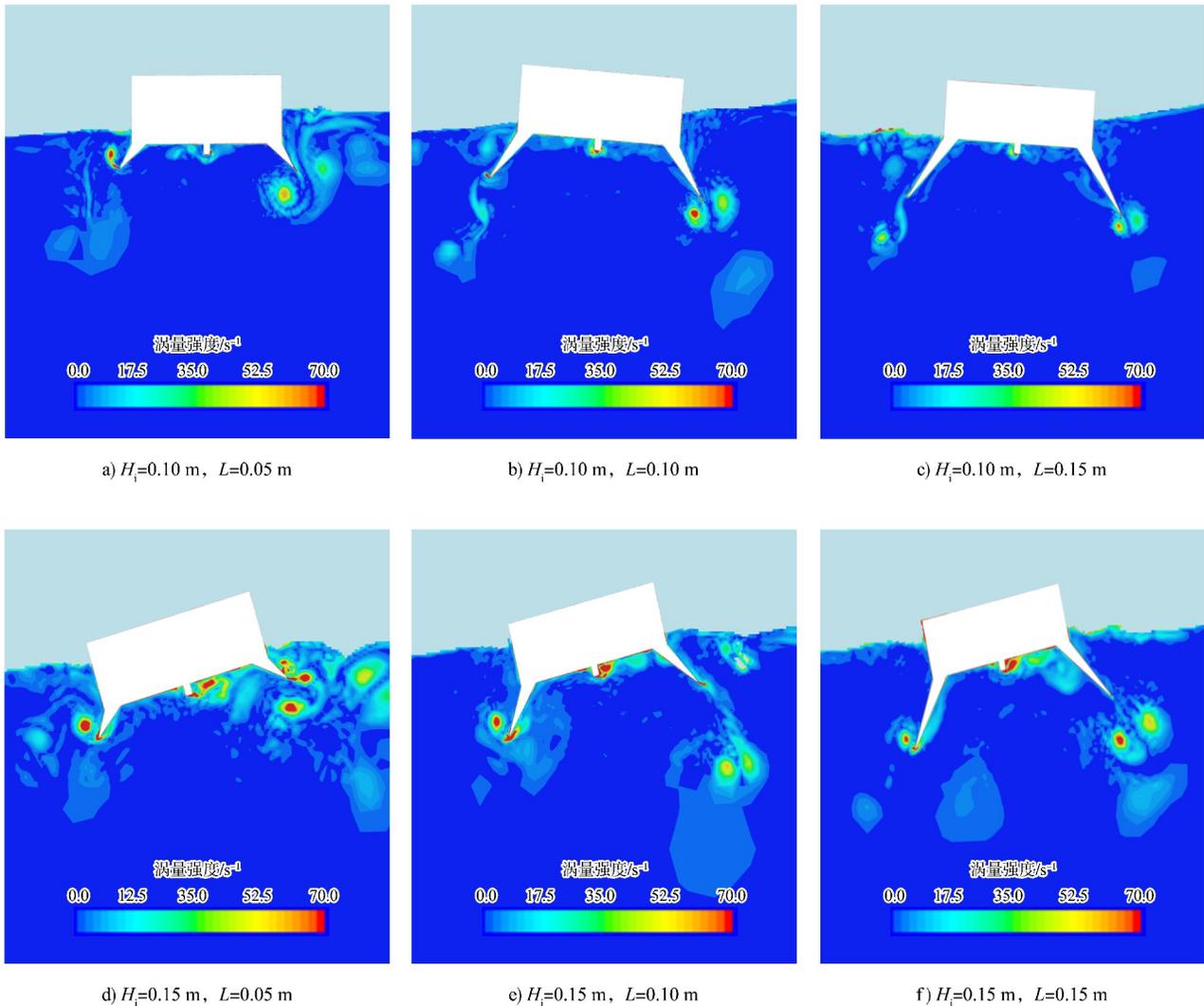


图 10 不同翼板长度防波堤的涡量分布

Fig. 10 Vortex distribution of breakwaters with different wing lengths

3 结论

1) 带翼板浮式防波堤的翼板尖端能产生强度更大的漩涡，漩涡吸收波浪能后与自由液面碰撞使波浪破碎，从而达到更好的消浪效果。

2) 改变翼板角度能影响带翼板浮式防波堤的消浪性能，当入射波高为 0.10 m 时翼板角度为 60° 消浪性能最佳，而当入射波高为 0.15 m 时翼板角度为 30° 消浪性能最佳。根据不同的海浪环境

适当调整翼板角度，可以使带翼板浮式防波堤增加与波浪的碰撞体积，延迟漩涡脱落，从而具有更好的消浪性能。

3) 调整翼板长度会改变漩涡的脱落速度，进而影响带翼板浮式防波堤的消浪性能。总的来看，翼板太短会加速漩涡脱落，从而减弱带翼板浮式防波堤的消浪效果。

参考文献:

- [1] 陈城, 陈新权, 杨启, 等. 翼板浮式防波堤消浪性能[J]. 水运工程, 2022(9): 8-14, 85.
CHEN C, CHEN X Q, YANG Q, et al. Wave suppression performance of wing-plate floating breakwater[J]. Port & waterway engineering, 2022(9): 8-14, 85.
- [2] YUAN Z, ZHANG L, ZHOU B Z, et al. Analysis of the hydrodynamic performance of an oyster wave energy converter using star-CCM+[J]. Journal of marine science and application, 2019, 18(2): 153-159.
- [3] 周效国, 曹凤龙, 李丁丁. 多层直立挡板透空式防波堤消浪效果数值研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2020, 34(5): 15-20.
ZHOU X G, CAO F L, LI D D. Numerical simulation of wave elimination effect of a multi-layer vertical baffle permeable breakwater[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (natural science edition), 2020, 34(5): 15-20.
- [4] 张万威, 陈国平, 严士常, 等. 单挡板桩基透空堤的透浪系数物理模型试验[J]. 水运工程, 2022(6): 9-16, 28.
ZHANG W W, CHEN G P, YAN S C, et al. Physical model test of wave transmission coefficient of permeable dike with single-baffle pile foundation [J]. Port & waterway engineering, 2022(6): 9-16, 28.
- [5] KORAIM A S, RAGEH O S. Effect of under connected plates on the hydrodynamic efficiency of the floating breakwater[J]. China ocean engineering, 2014, 28(3): 349-362.
- [6] LIU Z Q, WANG Y Z. Numerical studies of submerged moored box-type floating breakwaters with different shapes of cross-sections using SPH [J]. Coastal engineering, 2020, 158: 103687.
- [7] 金哲飞, 张金凤, 张庆河, 等. 波浪作用下锚链系泊浮式防波堤动力响应的数值模型研究[J]. 海洋工程, 2021, 39(1): 21-31.
JIN Z F, ZHANG J F, ZHANG Q H, et al. Study on numerical model of hydrodynamics of mooring line floating breakwater under wave actions [J]. The ocean engineering, 2021, 39(1): 21-31.
- [8] 徐伟桐. 畸形波对三维板式结构物砰击作用的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
XU W T. Numerical simulation of the slamming effect of freak wave on three-dimensional plate structure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [9] LIU Z Q, WANG Y Z, WANG W, et al. Numerical modeling and optimization of a winged box-type floating breakwater by Smoothed Particle Hydrodynamics [J]. Ocean engineering, 2019, 188: 106246.
- [10] CUI J, LI Q, CHENG Y, et al. Addition of dynamic mooring line force based on lumped-mass method in SPH[J]. Ocean engineering, 2019, 182: 90-101.
- [11] 易风, 冯卫兵, 曹海锦. 基于 ERA-Interim 资料近 37 年南海波浪时空特征分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(1): 44-51.
YI F, FENG W B, CAO H J. Wave analysis based on ERA-Interim reanalysis data in the South China Sea[J]. Marine forecasts, 2018, 35(1): 44-51.
- [12] GODA Y, SUZUKI T. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments [C]// Proceedings of 15th Conference on Coastal Engineering. Honolulu, Hawaii: American Society of Civil Engineers, 1976: 828-845.
- [13] 赵峰, 陈城, 朱宏博, 等. 含翼板浮式防波堤消浪性能分析[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(6): 47-54.
ZHAO F, CHEN C, ZHU H B, et al. Wave attenuation performance of floating breakwater with wing baffles[J]. Journal of dynamics and control, 2023, 21(6): 47-54.
- [14] 郑艳娜. 波浪与浮式结构物相互作用的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
ZHENG Y N. The study of the wave interaction with floating structure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.