



波流共同作用下浮式OWC型防波堤的水动力性能研究

王荣泉, 芮凯龙, 宁德志, LiangDongfang

Study on the hydrodynamic performance of an floating OWC-breakwater under the combined wave-current action

Wang Rongquan, Rui Kailong, Ning Dezhi, Liang Dongfang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12284/hyxb20260026>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不规则波作用下岸基式振荡水柱波能装置的水动力性能研究

Hydrodynamic performance study of a land-based OWC under the action of irregular wave

海洋学报. 2024, 46(1): 101–110 <https://doi.org/10.12284/hyxb2024005>

两种型式的波能装置浮式防波堤水动力性能比较研究

Comparison of hydrodynamic performance of two types of wave energy converter–floating breakwater

海洋学报. 2023, 45(6): 122–133 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023065>

透空式梯形礁体对孤立波复杂岛礁水动力特性影响的试验研究

Experimental study on the influence of permeable trapezoidal reef on the hydrodynamic characteristics of solitary wave complex reefs

海洋学报. 2024, 46(10): 88–96 <https://doi.org/10.12284/hyxb2024113>

边缘波研究进展

Progress of edge waves research

海洋学报. 2022, 44(12): 1–8 <https://doi.org/10.12284/hyxb2022167>

波流共同作用下射流稀释特性的动量积分模拟研究

Simulation of a jet under the combined action of waves and currents using a momentum integral model

海洋学报. 2024, 46(2): 1–13 <https://doi.org/10.12284/hyxb2024025>

强海况下波流相互作用对有效波高的影响研究

The study of the influences of wave–current interaction on significant wave height under serious sea conditions

海洋学报. 2023, 45(7): 1–7 <https://doi.org/10.12284/hyxb2023121>

关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王荣泉, 芮凯龙, 宁德志, 等. 波流共同作用下浮式 OWC 型防波堤的水动力性能研究[J]. 海洋学报, 2026, 48(4): 69–80, doi:10.12284/hyxb20260026

Wang Rongquan, Rui Kailong, Ning Dezhi, et al. Study on the hydrodynamic performance of an floating OWC-breakwater under the combined wave-current action[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(4): 69–80, doi:10.12284/hyxb20260026

波流共同作用下浮式 OWC 型防波堤的水动力性能研究

王荣泉¹, 芮凯龙¹, 宁德志^{1*}, Liang Dongfang²

(1. 大连理工大学 海岸与海洋工程全国重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 剑桥大学 工程学院, 英国 剑桥 CB21PZ)

摘要: 针对波流共同作用下 OWC 型防波堤的水动力特性, 建立了波流共同作用下浮式 OWC 型防波堤的二维时域完全非线性数值模型, 并利用物理模型试验数据验证了该模型的可靠性。在此基础上, 系统研究了水流流速、后墙吃水深度和厚度变化对 OWC 型防波堤透射系数、反射系数及水动力效率的影响规律。研究结果表明, 顺流条件下装置的透射系数、反射系数和水动力效率均呈现降低的趋势; 而逆流条件下, 则呈现出相反的变化趋势。增大后墙吃水深度可降低透射系数并提高水动力效率, 对反射系数影响较为有限; 此外, 增大后墙厚度可降低透射系数并提升水动力效率, 对反射系数影响亦不显著。研究结果为 OWC 型防波堤的结构优化及工程设计提供了重要的参考依据。

关键词: 波浪能; OWC 型防波堤; 波流共同作用; 物理模型试验; 数值模拟

中图分类号: P753

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2026)04-0069-12

1 引言

地球表面约 71% 的面积被海洋覆盖, 海浪日夜不息、周而复始, 其持续运动蕴含着极为丰富的能量资源。波浪能作为一种可再生能源, 因其能量密度高、稳定性强且对环境友好, 近年来受到越来越多的关注。自 20 世纪 70 年代以来, 经过多年的研究与技术开发, 波浪能转换技术已经取得了显著进展, 涌现出了多种形式的波浪能转换装置, 包括振荡水柱式 (Oscillating Water Column, OWC)、振荡浮子式和越浪式。其中, OWC 波能转换装置因结构简单、运行可靠且维护便利, 成为目前应用最广、研究投入最多的波浪能开发技术之一, 其工作原理是: 在波浪激励作用下, 气室内的水柱发生上下振荡, 引起气室内空气体积变化, 从而在气孔处形成往复气流, 并进一步驱

动透平发电机, 实现能量转换。尽管波浪能具有巨大的开发潜力, 但其大规模工程化推广仍受到发电成本较高及能量转换效率受海况影响显著等因素的限制。因此, 将波能装置与海工基础结构相结合被认为是提高经济性的重要途径。OWC 型防波堤是将 OWC 波浪能转换装置与传统防波堤集成, 这种集成设计具有显著的优势^[1], 其既能够削弱波浪冲击, 又能够捕获波浪能用于发电。依托“成本分摊”优势, OWC 型防波堤有助于降低建设与运维成本, 提高整体经济效益。

国内外学者已对 OWC 型防波堤装置展开了广泛研究。固定式 OWC 型防波堤这种集成形式通常是将 OWC 装置嵌入到固定的防波堤结构中, 常见于陆基防波堤。Ojima 等^[2]首先进行了将 OWC 型波浪能转换器与固定防波堤相结合 (如图 1) 的基础研究, 这

收稿日期: 2026-01-27; 修订日期: 2026-04-21。

基金项目: 国家自然科学基金 (52571281, W2421072); 中央高校基本科研业务费资助 (DUT24LK006)。

作者简介: 王荣泉 (1989—), 男, 湖南省邵阳市人, 副教授, 主要从事波浪能开发与利用研究。E-mail: rqwang@dlut.edu.cn

* 通信作者: 宁德志, 教授, 从事海洋工程水动力学研究。E-mail: dzning@dlut.edu.cn

一研究为后来的岸基式波浪能转换装置设计奠定了基础。胡晓^[3]通过数值模拟研究了 OWC 型防波堤的水动力特性,发现该装置既可以提高波浪能转换效率,又可以减小防波堤所受的波浪力。Zhuang 等^[4]、庄乾泽和宁德志^[5]对与多孔板集成的固定式 OWC 型防波堤(如图 2)进行了试验和数值模拟研究,结果表明,集成多孔板对装置的水动力效率影响很小,但可显著降低高频波浪载荷。Socrates 等^[6]发现,将 OWC 装置与半圆形防波堤(SCBW)进行集成,相较于二者独立布置,可获得更优的水动力性能。在此基础上,Socrates 等^[7]进一步将两台相同的 OWC 装置集成于同一 SCBW 结构中,结果验证了该多装置耦合系统仍具有良好水动力性能。Zhang 等^[8]指出将圆柱型双气室 OWC 装置与抛物线形聚能防波堤进行集成,可显著提升系统的水动力性能。Xu 等^[9]研究发现主筒截面为圆形的 U-OWC 桩阵结构可同时实现波能提取效率的提升与消波性能的改善。傅磊等^[10]发现在不规则波(JONSWAP 谱)作用下,岸基式 OWC 装置效率较规则波降低且峰值频率偏高。

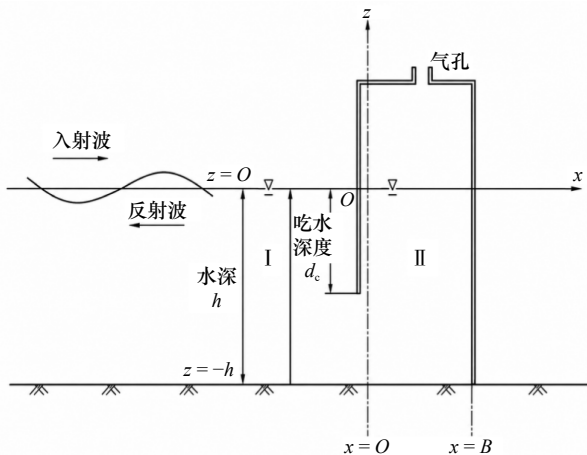


图 1 固定式 OWC 型防波堤^[2]

Fig. 1 Fixed OWC-breakwater^[2]

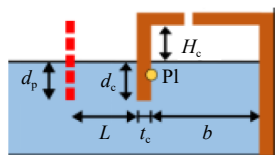


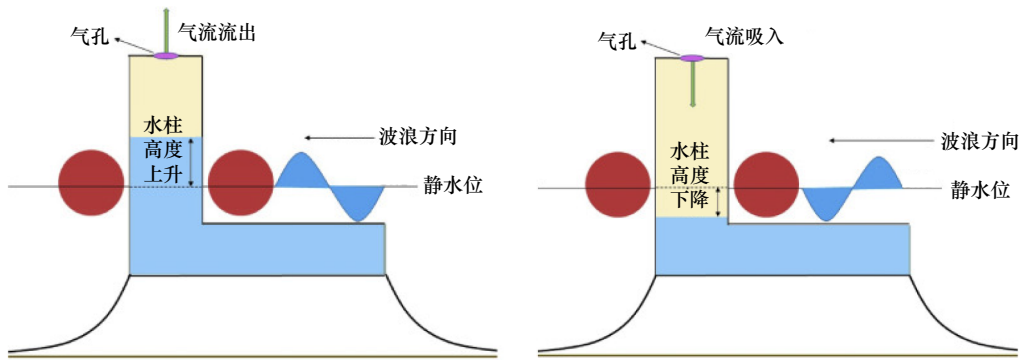
图 2 与多孔板集成的固定式 OWC 型防波堤^[4]

Fig. 2 Fixed OWC-breakwater integrated with a perforated plate^[4]

由于施工便捷、成本低、适用于大水深、生态影响小及可移动复用等优势,学者们对浮式防波堤与 OWC 波能装置集成也开展了大量研究工作。Koo^[11]提出了一种浮式 OWC 型防波堤,基于非线性数值水

槽对该类型结构的水动力研究进行了分析,结果表明,该类型防波堤的消波性能明显优于传统的箱形防波堤。He 等^[12]通过试验研究了规则波作用下具有不对称气室的浮式 OWC 型防波堤,发现不对称气室的浮式 OWC 型防波堤可以同时兼顾海岸保护和波浪能捕获,特别是前气室比后气室窄的设计能够拓宽捕获波浪能量的频率范围。纪巧玲和陈国强^[13]对比了垂直挡板型与三角挡板型两种浮体结构的水动力及波能俘获特性,结果表明两者在近岸不同波周期下各有适用范围;在主体吃水相同(排水量不同)时透射系数差异不大,而在排水量相同(吃水不同)时垂直挡板防波性能更优、三角挡板俘获性能更强。Zhao 等^[14]通过试验研究了浮式多气室 OWC 型防波堤装置的水动力性能,发现通过布置多个气室,可以提高 OWC 型防波堤的水动力效率,且三气室系统的波浪衰减性能优于传统的浮式防波堤。Cheng 等^[15]通过物理试验和数值模拟相结合的方法来研究波浪参数、几何尺寸等对浮式 OWC 型防波堤的影响,得出气室宽度与总宽度之比较大时对波浪衰减有利影响。Zheng 等^[16]基于数值模拟分析了不规则波浪作用下浮式 OWC 型多孔防波堤的消波性能,结果表明其消波效果优于同类结构。Wang 等^[17]研究了一种在 OWC 波能装置与浮式防波堤之间设置间隙的集成系统,结果表明,通过合理优化间隙距离可提高波浪能捕获效率。Harikrishnan 等^[18]研究了 L 型 OWC 装置与浮式圆柱防波堤的集成系统(如图 3),结果表明其几何尺寸及布置形式对系统水动力性能具有显著影响。陈昌润^[19]将“月池”结构引入浮式 OWC 型防波堤装置,提出了一种新型集成系统。研究表明,该系统在一定波长范围内可提高中短波条件下装置的一次能量转换效率,并增强中长波条件下的消波性能。

目前相关研究多集中于纯波浪作用下 OWC 型防波堤的水动力性能。然而,在真实海洋环境中,波浪与水流始终同时存在。Brevik^[20]通过水槽试验研究了波浪相互作用,结果表明水流方向对波浪传播特性具有显著影响:顺流条件下波长增大、波高减小,而逆流条件下波高增大、波长减小。Shi 等^[21]通过数值模拟研究了舟山海域的波浪耦合特性,发现波-流相互作用会引起波能在波谱峰值附近的重新分布,使峰值附近的波能趋于平缓。同时,波-流相互作用的影响会改变波浪能分布,波浪能在涨潮时转移到低频波,而在退潮时转移到高频波。林红星^[22]的研究表明,水流会显著影响潜体附近的波浪演变、高阶谐波特征及结构受力。Hayatdavoodi 和 Li^[23]研究发现,环

图3 L型 OWC 装置与浮式圆柱防波堤集成系统^[18]Fig. 3 Integrated system of an L-shaped OWC device and a floating cylindrical breakwater^[18]

境水流会显著改变浮体在波浪作用下的漂移、纵荡与纵摇响应,而对升沉的影响相对较小。由此可见,水流不仅会改变波浪传播特性和能量分布,还可能进一步影响海洋结构物的水动力响应。对于 OWC 型防波堤而言,其设计通常需要依据特定海域的波高、波浪频率等关键波浪参数,以实现装置特性与外部波浪条件的匹配。然而,当实际海况中存在水流作用时,波浪频率及其能量分布等会发生变化,这可能导致基于纯波浪条件确定的设计参数与实际环境不一致,进而难以实现预期的效果,从而影响结构设计的合理性与运行安全性。

针对目前波流共同作用条件下 OWC 型防波堤水动力性能研究相对不足的问题,本研究基于高阶边界元法建立了二维时域完全非线性数值模型,系统分析了波-流共同作用条件下 OWC 型防波堤的水动力响应特性。首先,通过将数值模拟结果与物理模型试验数据进行对比,验证了所建数值模型的准确性与可靠性。在此基础上,系统揭示了波流共同作用下流速变化对装置透射系数、反射系数及水动力效率的影响规律。并进一步探究了气室后墙吃水深度和后墙厚度对装置透射系数、反射系数及水动力效率的影响特性。研究结果有助于加深对 OWC 型防波堤水动

力特性的理解,为工程实践中的装置设计与优化提供科学依据,同时也为未来 OWC 波能装置的研发提供重要参考依据。

2 物理模型试验

本研究的物理模型试验在大连理工大学海岸与海洋工程全国重点实验室的波流水槽内完成,该水槽长 69 m、宽 2.0 m、深 1.8 m,其造波机可模拟周期范围为 0.5~5.0 s、波高范围为 0.03~0.5 m 的波浪,并能够产生正弦波、椭圆余弦波等规则波及常用不规则波,如图 4 所示。该水槽带有二次反射波主动吸收功能。水槽前端安装了实验室自行研制的液压伺服式不规则波推板式造波机,水槽末端布置了消波区域。水槽两端底部设有入水口与出水口,通过调节循环水泵系统可在水槽内产生满足试验要求的水流。

本研究物理模型采用弗劳德相似准则作为试验缩尺依据,选择几何比尺为 1:20。OWC 型防波堤模型试验布置如图 5 所示,模型由 10 mm 厚的有机玻璃板制成。试验水槽在纵向被钢制薄板分成了 1.2 m 宽和 0.8 m 宽两部分。为实现波浪、水流充分演化,确保模型区域获得均匀稳定的波流共同作用场,模型安装位置距造波机 43 m。试验静水深 h 为 1 m, OWC

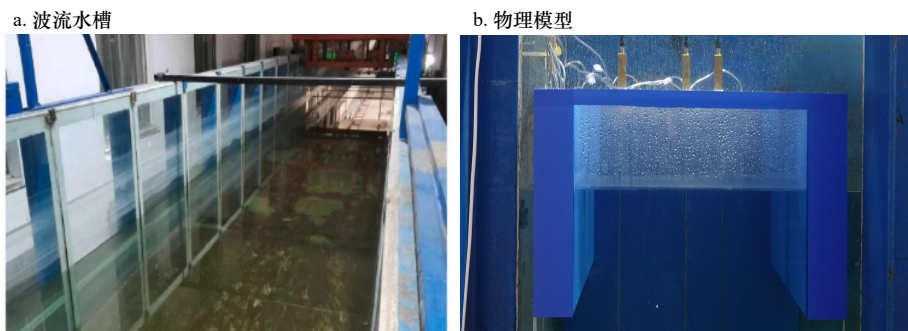


图4 波流水槽和物理模型

Fig. 4 Wave-current flume and physical model

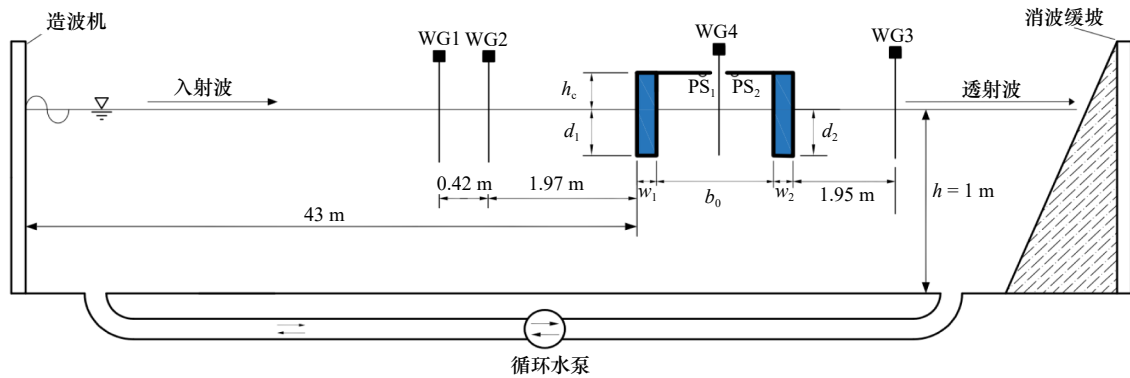


图5 物理模型试验布置

Fig. 5 Schematic of the physical model experiment setup

型防波堤模型沿入射波方向的总长度为 0.8 m , 即 $b_0 + w_1 + w_2 = 0.8 \text{ m}$, 为减少水槽侧壁对试验的影响将垂直于入射波方向宽度设为 0.79 m , 前墙和后墙厚度均为 0.1 m ($w_1 = w_2 = 0.1 \text{ m}$), 气室高度 h_c (室顶与静水面之间的距离) 为 0.2 m , 装置前墙和后墙吃水深度分别用 d_1 和 d_2 表示。在模型上方中间位置设有一个圆形气孔, 气室的开孔率 (气孔面积与气室横截面积之比) 约为 0.66% ^[24]。

试验通过浪高仪 (WG) 和点压力计 (PS) 采集不同位置处波面和气室内气压数据, 并使用专门的数据采集处理系统进行实时收集和存储。浪高仪 WG1 和 WG2 布置在模型迎浪侧, 浪高仪 WG3 布置在模型后。此外, 浪高仪 WG4 布置在 OWC 型防波堤气室中间, 压力传感器 (PS₁ 和 PS₂) 布置在气孔边缘附近距离圆形气孔边缘 2 cm 处。入射波高 H_0 设置为 0.06 m 不变, 入射波周期 T 设置在 $1.2 \sim 2.0 \text{ s}$ 范围内, 相应的无量纲参数 kh 的范围为 $1.20 \sim 2.81$, 表 1 总结了波浪参数的详细信息。水流流速 U_0 设置在 $0 \sim 0.2 \text{ m/s}$ 范

围内, 间隔 0.1 m/s (正值代表顺流, 此时水流与波浪传播方向相同; 负值则相反, 为逆流), 相应的试验工况, 具体见表 2。

3 数值模型

3.1 控制方程

在本研究中, 假定流体为均匀、无黏且不可压缩的理想流体, 并且流体的运动是无旋的。因此, 波浪与 OWC 型防波堤的相互作用问题可以通过势流理论来描述。基于势流理论和高阶边界元方法, 建立了波流联合作用下 OWC 型防波堤的二维完全非线性数值水槽, 如图 6 所示。为了描述方便, 建立笛卡尔坐标系 O_{xz} , 原点 O 位于数值水槽静水面上, x 轴位于静水面并规定水平向右为正, z 轴竖直向上为正。造波源位于 $x = 0$ 处, 水槽起始端和水槽末端设置阻尼层消除反射波和透射波。 B_0 为气孔宽度, 其余几何参数与图 5 中物理模型试验保持一致。 Ω 表示整个流域, Γ_1 表示入射边界, Γ_0 为出流边界, Γ_F 为自由水

表 1 入射波浪条件

Table 1 Incident wave conditions

参数	数值												
H_0/m	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
T/s	1.2	1.3	1.4	1.45	1.5	1.55	1.6	1.65	1.7	1.8	1.9	2.0	
kh	2.81	2.42	2.11	1.99	1.87	1.77	1.68	1.60	1.53	1.4	1.30	1.20	

表 2 模型试验工况

Table 2 Model test conditions

工况	w_1/m	w_2/m	d_1/m	d_2/m	H_0/m	$U_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	T/s
物模工况1	0.1	0.1	0.25	0.25	0.06	0	1.2~2.0
物模工况2	0.1	0.1	0.25	0.25	0.06	0.1	1.2~2.0
物模工况3	0.1	0.1	0.25	0.25	0.06	0.2	1.2~2.0

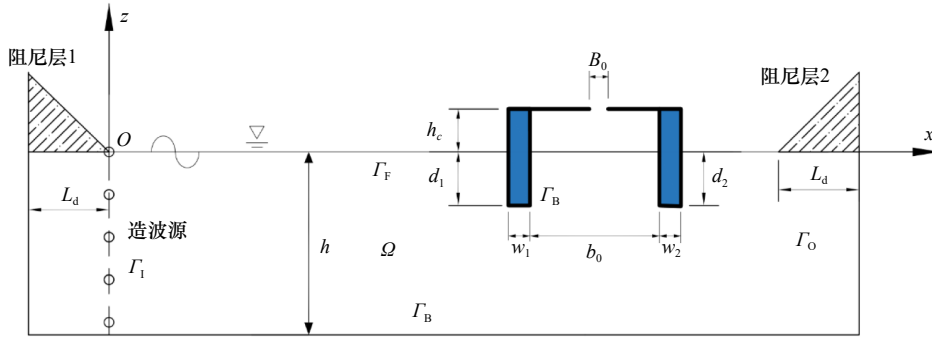


图6 OWC型防波堤二维数值波流水槽模型示意

Fig. 6 Schematic diagram of the 2D numerical wave-current flume model for the OWC-breakwater

面边界, Γ_B 为物面边界和水底边界。

当域内存在均匀水流时, 域内的总速度势 Φ 由波浪速度势与水流势叠加而成, 表达为如下形式:

$$\Phi = U_0 x + \phi(x, z, t), \quad (1)$$

式中, U_0 为均匀流流速, $\phi(x, z, t)$ 表示波浪扰动引起的速度势。

在整个流域中, 总速度势 Φ 及由波浪引起的速度势 ϕ 均满足拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 \Phi = \nabla^2 \phi = 0. \quad (2)$$

本模型采用域内源造波技术, 该技术允许反射波穿过造波面而不影响入射波生成。模型中通过在造波面上游布置阻尼层吸收反射波和出流波浪, 避免波浪在水槽边界发生二次反射影响模拟结果, 因此式(2)拉普拉斯方程中加入造波源项, 控制方程变为泊松方程:

$$\nabla^2 \Phi = \nabla^2 \phi = q^*(x_s, z, t), \quad (3)$$

式中, $q^*(x_s, z, t) = 2u\delta(x - x_s)$ 是造波源强度; $\delta(x - x_s)$ 是狄拉克函数; x_s 是造波源的横坐标(本文取 $x_s = 0$); u 是流体质点的水平速度, 本文给定二阶 Stokes 波在水流影响下的解析解如下式:

$$u = A_e(\omega - kU_0) \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \cos(kx - \omega t) + \frac{3k}{4} A_e^2(\omega - kU_0) \frac{\cosh 2k(z+h)}{\sinh^4 kh} \cos 2(kx - \omega t), \quad (4)$$

式中, ω 为波浪的角频率; k 为波数; A_e 为水流作用下的波幅, 根据波作用量守恒^[25], A_e 可由如下关系式确定:

$$A_e = A_0 \sqrt{\frac{\omega - kU_0}{\omega} \cdot \frac{C_{g0}}{C_g}}, \quad (5)$$

式中, C_g 表示水流影响下波浪的群速度; C_{g0} 和 A_0 分别表示无流条件下波浪的群速度和波幅。

波数 k 可由如下关系式确定:

$$(\omega - kU_0)^2 = gk \tanh kh. \quad (6)$$

3.2 边界条件

在自由水面 Γ_F 上, 运动学边界条件如下:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad (7)$$

式中, $z = \eta(x, t)$ 。

将式(1)代入式(7)可得自由水面运动学边界条件如下:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} - \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + U_0 \right) \frac{\partial \eta}{\partial x}. \quad (8)$$

自由水面动力学边界条件可表示为

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -g\eta - \frac{1}{2} |\nabla \Phi|^2 - \frac{p - p_a}{\rho}. \quad (9)$$

式中, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$; p_a 为大气压强, 在气室外部 $p = p_a$, 即 $p - p_a = 0$, 气室内部的气体压强为 $p_{\text{air}} = p - p_a$ 。

根据扰动速度势 ϕ 与总速度势 Φ 之间的关系, 可进一步得到下式:

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \\ \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 = \frac{1}{2} |\nabla \Phi|^2 + U_0 \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{1}{2} U_0^2. \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\eta - \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 - U_0 \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{1}{2} U_0^2 - \frac{p_{\text{air}}}{\rho} & \text{气室内部,} \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} = -g\eta - \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 - U_0 \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{1}{2} U_0^2 & \text{气室外部.} \end{cases} \quad (11)$$

利用物质导数 $\delta/\delta t = \partial/\partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla$, 可得:

$$\begin{cases} \frac{\delta \eta}{\delta t} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + U_0 \right) \frac{\partial \eta}{\partial x}, \\ \frac{\delta \phi}{\delta t} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + U_0 \right) \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z}. \end{cases} \quad (12)$$

将式(8)和(11)代入式(12)可得:

$$\frac{\delta \eta}{\delta t} = \frac{\partial \phi}{\partial z}, \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{\delta \phi}{\delta t} = -g\eta + \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 - \frac{1}{2} U_0^2 - \frac{p_{\text{air}}}{\rho} & \text{气室内部,} \\ \frac{\delta \phi}{\delta t} = -g\eta + \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 - \frac{1}{2} U_0^2 & \text{气室外部.} \end{cases} \quad (14)$$

结构物反射产生的波浪在传播至入射边界后, 会再次反射回数值水槽内部, 从而对计算结果造成干

扰。因此,本文在数值水槽两端设置人工阻尼层,以削弱边界反射波的影响。此外,在实际水体中,流体是具有一定的黏性效应。因而,波浪进入 OWC 型防波堤气室并与其发生相互作用时,会伴随一定的能量耗散,这种能量损失通常可等效表现为压强损失,本文通过在动力学边界条件中引入修正阻尼系数 μ 等效^[10]。于是,在自由水面上,运动学和动力学边界条件可分别写为如下形式:

$$\frac{\delta\eta}{\delta t} = \frac{\partial\phi}{\partial z} - \mu\eta - v_1(x)(\eta - \eta_e) - v_2(x)\eta \quad (15)$$

$$\begin{cases} \frac{\delta\phi}{\delta t} = -g\eta + \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2 - \frac{p_{\text{air}}}{\rho} - \mu\frac{\partial\phi}{\partial n} & \text{气室内部,} \\ \frac{\delta\phi}{\delta t} = -g\eta + \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2 - v_1(x)(\phi - \phi_e) - v_2(x)\phi & \text{气室外部.} \end{cases} \quad (16)$$

式中, η 为波面高程; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; p_{air} 室内气压; v_i 为阻尼层的阻尼系数,其表达式如下:

$$v_i(x) = \begin{cases} \alpha_d\omega\left(\frac{x-x_i}{L_d}\right)^2 & \left(\begin{array}{l} x < x_1, i=1 \\ x > x_2, i=2 \end{array} \right), \\ 0 & \text{其他,} \end{cases} \quad (17)$$

式中, x_1 和 x_2 分别表示阻尼层 1 和阻尼层 2 的起始位置; α_d 为阻尼层系数,本文中取 1; L_d 表示阻尼层的长度; ϕ_e 、 η_e 表示在无结构物时相同计算条件下的参考值,可由 Baddour 和 Song^[26] 推导的二阶理论来确定。

在本模型中,假定气室内气体不可压缩,则气室内气体体积变化率与气孔处气流速度 U_d 之间的关系如下:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = S_0 U_d(t), \quad (18)$$

式中, ΔV 为气室内水柱经过 Δt 时间的体积变化量; $U_d(t)$ 为气体通过气孔的流速。

假定气室内的气体压强与气孔处的气体流速满足二次关系^[27], 气室气压 p_{air} 可表示为

$$p_{\text{air}} = D_{\text{dm}} U_d(t) |U_d(t)|, \quad (19)$$

式中, D_{dm} 为二次气动阻尼系数。

在数值模型中,数值水槽的长度设为 11 倍无流条件下的入射波波长,其中水槽左、右两端各设置无流影响下波长的 1.5 倍作为阻尼层吸收反射波浪^[28]; 计算时,空间步长和时间步长分别取为 $\Delta x = \lambda/30$ (λ 为入射波长)和 $\Delta t = T/100$, 其中。计算中采用混合欧拉-拉格朗日方法更新自由水面,采用 4R-K 法更新下一时刻的波面和速度势,更详细的求解方法参考文献^[29]。

3.3 数值模拟工况与数据分析

数值模拟所采用的工况如表 3 所示。其中,表 3 中数模工况 1 涵盖了全部物理模型试验工况,主要用于分析流速对 OWC 型防波堤水动力性能的影响,同时其中部分工况还用于模型参数确定及数值模型可靠性验证。数模工况 2 和 3 结合数模工况 1 中 $U_0 = 0$ 的工况用于研究后墙吃水深度变化对装置水动力性能的影响;数模工况 4 和 5 同样结合工况 1 中的 $U_0 = 0$ 的工况用于研究后墙厚度变化对装置水动力性能的影响。

表 3 数值模拟工况

Table 3 Numerical simulation conditions

工况	w_1/m	w_2/m	d_1/m	d_2/m	H_0/m	$U_0/(m \cdot s^{-1})$	T/s
数模工况1	0.1	0.1	0.25	0.25	0.06	-0.1/0/0.1/0.2/0.3	1.2~2.0
数模工况2	0.1	0.1	0.25	0.375	0.06	0	1.2~2.0
数模工况3	0.1	0.1	0.25	0.5	0.06	0	1.2~2.0
数模工况4	0.1	0.2	0.25	0.25	0.06	0	1.2~2.0
数模工况5	0.1	0.3	0.25	0.25	0.06	0	1.2~2.0

透射波幅 K_t 和反射系数 K_r 分别表示如下:

$$\begin{cases} K_t = \frac{H_t}{H_0}, \\ K_r = \frac{H_r}{H_0}, \end{cases} \quad (20)$$

式中, H_0 为入射波高; H_t 为透射波高; H_r 为反射波高,采用 Goda 和 Suzuki^[30] 提出的两点分离法求得。

基于线性波理论,纯波浪时沿波峰方向单位宽度内的平均波能流为 $P_{\text{in}0}$,其表达式如下:

$$P_{\text{in}0} = \frac{1}{2} \rho g A_0^2 \frac{\omega}{2k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh kh} \right). \quad (21)$$

水流影响下沿波峰方向单位宽度内的平均波能流用 P_{in} 来表示,其表达式如下:

$$P_{\text{in}} = \frac{1}{2} \rho g A_e^2 \cdot (C_{\text{gr}} + U_0), \quad (22)$$

$$C_{\text{gr}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{g \tanh kh}{k} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right), \quad (23)$$

式中, C_{gr} 为波浪相对水流的群速度。

在入射波作用下,气室内水柱发生往复运动,进

而在气孔处形成往复气流, 装置捕获波能的功率即气流的瞬时功率 P_{abs} , 由下式求得:

$$P_{\text{abs}} = p_{\text{air}}(t) \cdot U_d(t) \cdot S_0, \quad (24)$$

式中, $p_{\text{air}}(t)$ 为气室内气压; S_0 为气孔横截面积。

单个波周期内, OWC 型防波堤捕获的平均波能 P_c

$$P_c = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p_{\text{air}}(t) \cdot U_d(t) \cdot S_0 dt. \quad (25)$$

在波流共同作用下, 入射波能流 P_{in} 不仅与波况有关, 还会随着流速发生变化。水动力效率的变化会同时受到气室平均做功 P_c 变化和入射波能流速变化的影响。为了更好地区分效率变化究竟由装置参数变化引起, 还是由流速导致入射波能流变化所致, 并保证不同流速工况之间的可比性, 本文首先采用无流条件下的入射波能流 $P_{\text{in}0}$ 作为分母定义水动力效率。因而, OWC 型防波堤装置的水动力效率 $\xi_{\text{in}0}$ 可以通过如下表达式求得:

$$\xi_{\text{in}0} = \frac{P_c}{P_{\text{in}0}}. \quad (26)$$

与此同时, 为更全面地评价 OWC 型防波堤装置在波流共同作用下的能量转换性能, 本文进一步采用波流共同作用下的入射波能流 P_{in} 作为效率表达式的分母, 用于反映装置对入射波能的利用水平。因此, OWC 型防波堤装置的水动力效率 ξ_{in} 可通过如下表达式求得:

$$\xi_{\text{in}} = \frac{P_c}{P_{\text{in}}}. \quad (27)$$

4 结果与讨论

需要说明的是, 物理模型试验数据仅用于 3.1 节

中的模型验证; 本章其余部分关于各参数影响规律的分析均基于数值模拟结果展开。

4.1 数值和模型试验结果对比分析

为验证本文所建模型在不同波流条件下的适用性, 本文选取 3 组具有代表性的流速与周期组合工况进行对比分析。入射波高均取 $H_0 = 0.06$ m, 吃水深度取 $d_1 = d_2 = 0.25$ m。流速分别为 $U_0 = 0, 0.1$ m/s 和 0.2 m/s, 对应的波浪周期分别选为 $T = 1.9$ s、 1.5 s 和 1.2 s, 由此, 所选验证工况不仅考虑了不同流速条件, 也兼顾了不同周期范围下的波浪作用。数值计算中, 二次气动阻尼系数和修正阻尼系数的取值分别为 $D_{\text{dm}} = 1.6$ 和 $\mu = 1400$ 。图 7 分别给出了 $U_0 = 0, T = 1.9$ s, $U_0 = 0.1$ m/s, $T = 1.5$ s 以及 $U_0 = 0.2$ m/s, $T = 1.2$ s 3 种工况下, 气室中心波面高程和气室内气压的数值结果与试验结果对比。总体来看, 数值模拟结果与试验结果吻合较好, 表明本文建立的数值模型具有较高的精度与可靠性。需要说明的是, 在气室中心的波面曲线方面, 数值模拟结果较为光滑, 而试验曲线存在高频短波成分。这是由于吸气过程中, 气流在气室自由水面上吹出了高频短波, 该现象难以通过现有数值模型复现。对于气室内气压而言, 其主要由气室内波面的平均变化率决定, 气流引发的高频短波对气室气体整体变化的影响可忽略不计, 因此数值模型仍能准确模拟气压的变化规律^[24]。

4.2 流速的影响

为系统揭示水流对 OWC 型防波堤水动力性能的影响规律, 本研究设置了 5 种流速, 即 $U_0 = -0.1 \sim 0.3$ m/s, 间隔 0.1 m/s。入射波高取 $H_0 = 0.06$ m, OWC 型

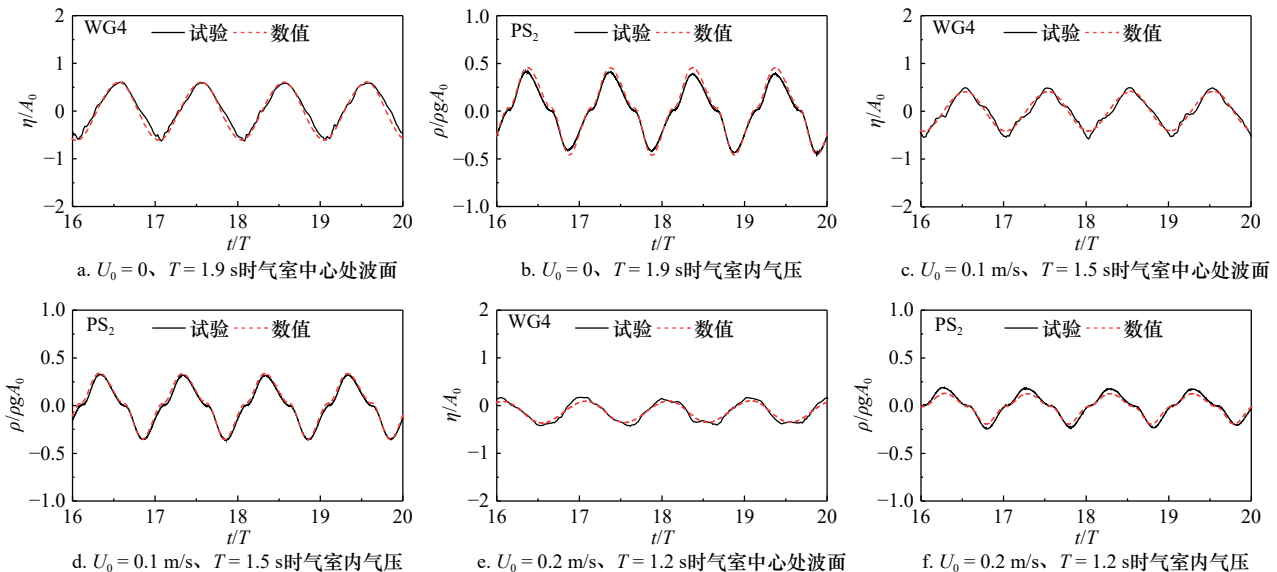


图 7 气室中心波面和气室内气压时程曲线

Fig. 7 Time histories of the wave surface elevation at the chamber center and the air pressure inside the chamber

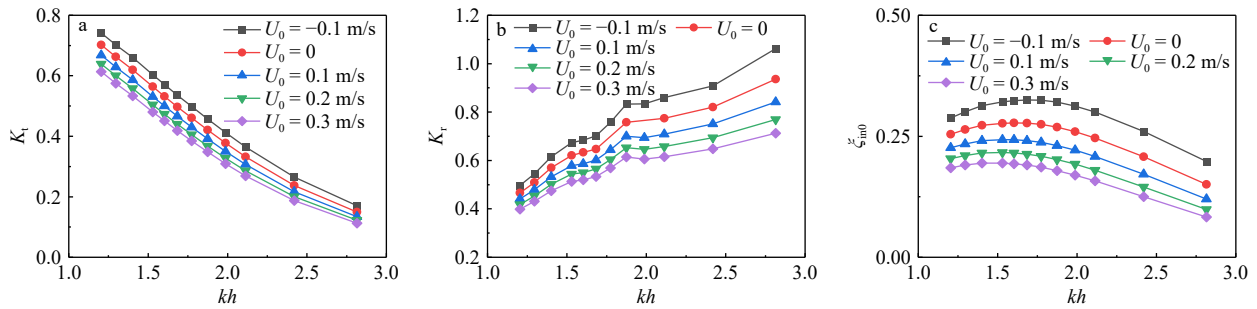


图 8 水流影响下 OWC 型防波堤的透射系数 K_t (a)、反射系数 K_r (b) 和水动力效率 ζ_{in0} (c)

Fig. 8 Hydrodynamic performance of the OWC-breakwater under the influence of current: transmission coefficient K_t (a), reflection coefficient K_r (b), and hydrodynamic efficiency ζ_{in0} (c)

防波堤的前墙与后墙吃水深度均设为 0.25 m, 即 $d_1 = d_2 = 0.25$ m。

图 8a、b 和 c 展示了波流共同作用下 OWC 型防波堤的透射系数 K_t 、反射系数 K_r 以及以无流条件下入射波能流 P_{in0} 为分母定义的水动力效率 ζ_{in0} 随无量纲参数 kh 的变化规律。从图中可以看出, 水流对上述 3 个参数随 kh 变化趋势的影响很小, 其主要影响各参数的数值大小。与无流情况下相比, 在顺流条件下, OWC 型防波堤的透射系数、反射系数以及水动力效率均出现不同程度的减小; 而在逆流作用下, 上述参数则相应增大。

如图 8a 所示, 透射系数在顺流条件下减小, 在逆流条件下增大。其主要原因在于水流与波浪传播方向的相对关系: 在顺流条件下, 水流与波浪同向传播, 使波长增大、波幅减小, 导致传播至结构处的有效入射波高降低, 透射波高随之减小, 且流速越大, 这种减小趋势越明显, 从而使透射系数也随流速增加而减小^[20]。相反, 在逆流条件下入射波高相对增大, 透射波高随之提高, 因此透射系数呈增大趋势。如图 8b 所示, 反射系数在顺流条件下减小, 而在逆流条件下增大。这一现象可从入射波高变化与波形特征改变两方面解释。其一, 顺流与波浪同向传播, 使到达结构处的有效入射波高相对降低; 波浪遇到结构时会发生反射, 反射波波高与入射波强度密切相关, 因此入射波高减小会导致反射波高随之降低, 从而使反射系

数下降。其二, 顺流作用使波陡减小、等效波长增大, 从而使波浪非线性特征减弱, 结构对波浪的散射作用随之降低, 进一步促使反射系数减小。逆流条件下上述效应相反, 因此反射系数相应增大。

如图 8c 所示, 以无流条件下入射波能流 P_{in0} 为分母定义的水动力效率 ζ_{in0} 在顺流条件下随流速增加而减小, 而在逆流条件下则呈增大趋势。对此可从两个方面加以理解。一方面, 从装置内部水动力响应来看, 顺流作用下入射波幅减小、波长增大, 使进入气室内部的波浪扰动减弱, 气室内水柱振荡响应随之减弱, 进而导致气室平均做功 P_c 降低, 因此 ζ_{in0} 减小; 逆流条件下则相反, 逆流使入射波幅增大、气室内水柱振荡增强, 装置平均做功提高, 从而使 ζ_{in0} 增大。为了更好地说明流速对装置能量转换过程的影响, 本文依据图 8c, 选取了 $kh = 1.20$ 、1.68 和 2.81 三个具有代表性的工况进行分析。其中 $kh = 1.68$ 取自 $U_0 = 0$ 时水动力效率峰值附近的工况, 而 $kh = 1.20$ 和 2.81 分别对应较小和较大的 kh 范围。由图 9 可以看出, 在不同 kh 条件下, P_{abs} 均呈明显的周期性变化特征, 且其大小规律与水动力效率的变化规律一致, 即顺流条件下瞬时功率减小, 逆流条件下则增大。需要注意的是, P_{abs} 在 1 个周期内会出现两个大小不同的峰值, 这主要是由气室在吸气和吐气过程中气流运动特征的差异所引起的。这进一步说明, 水流通过改变入射波特性和气室内水柱振荡响应, 影响了装置的瞬时能量

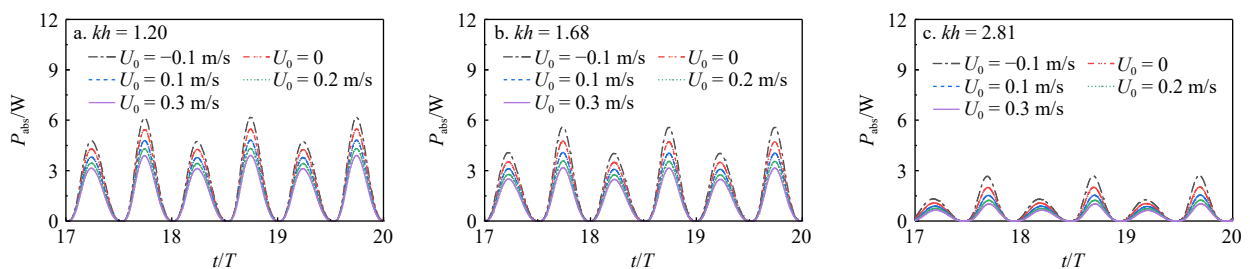


图 9 不同流速条件下瞬时功率 P_{abs} 时程曲线

Fig. 9 Time histories of instantaneous power P_{abs} under different current velocities

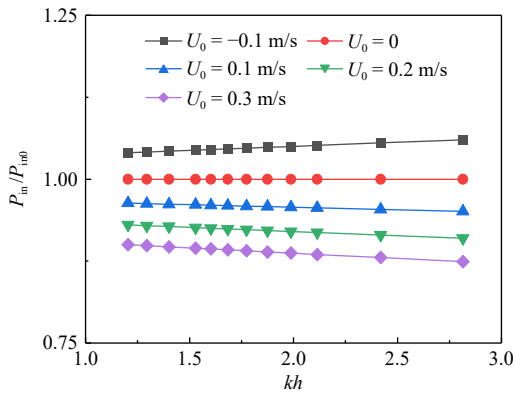


图 10 相对波能流

Fig. 10 Relative wave energy flux

转换过程,并最终导致装置水动力效率的变化。另一方面,从入射波能流变化来看,水流存在时的入射波能流 P_{in} 受入射波幅 A_e 与能量输运速度 $(C_{gr}+U_0)$ 的共同影响。如图 10 所示,顺流条件下,尽管 $(C_{gr}+U_0)$ 整体增大,但波幅会减小,导致 P_{in} 总体降低;逆流条件下则相反,入射波能流整体提高。综上,水流对 OWC 型防波堤水动力效率的影响主要体现在装置内部响应变化和入射波能流变化两个方面。

在此基础上,为进一步反映装置在波流共同作用

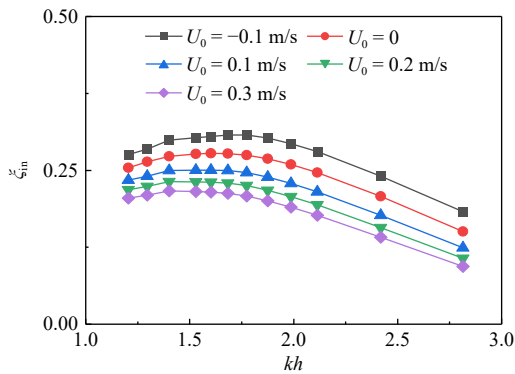


图 11 水流影响下 OWC 型防波堤的水动力效率 ζ_{in}

Fig. 11 Hydrodynamic efficiency ζ_{in} of the OWC-breakwater under the influence of current

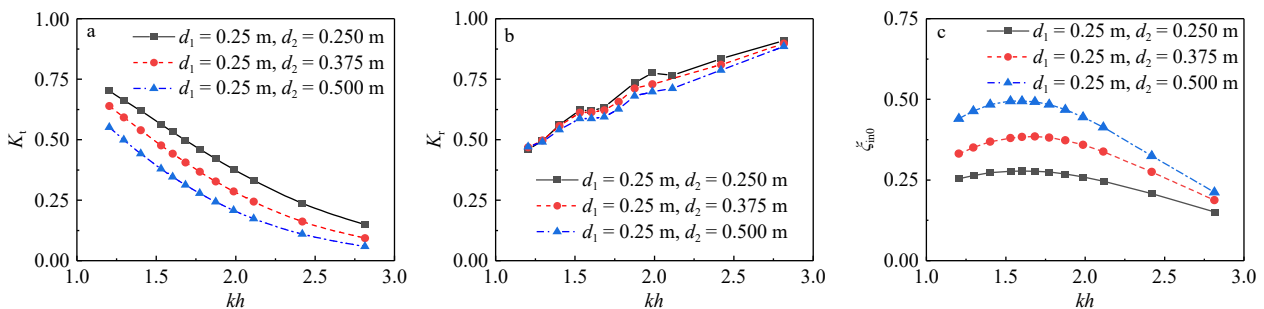


图 12 后墙吃水深度变化下 OWC 型防波堤的透射系数 K_t (a)、反射系数 K_r (b) 和水动力效率 ζ_{in0} (c)

Fig. 12 OWC-breakwater under different rear wall drafts: transmission coefficient K_t (a), reflection coefficient K_r (b), and hydrodynamic efficiency ζ_{in0} (c)

下对实际入射波能的利用水平,本文进一步分析了以波流共同作用下的入射波能流 P_{in} 为分母定义的水动力效率 ζ_{in} ,结果如图 11 所示。可以看出, ζ_{in} 随 kh 的变化趋势与 ζ_{in0} 基本一致,均随 kh 先增大后减小,不同流速条件下的大小规律亦保持一致,即逆流条件下效率较高,无流次之,顺流条件下效率较低,且顺流流速越大,效率下降越明显。但与 ζ_{in0} 相比, ζ_{in} 对流速变化的敏感性有所减弱。这是因为 ζ_{in} 采用实际入射波能流 P_{in} 作为分母,在顺流条件下,入射波高减小,使装置实际捕获的能量降低,但入射波能流本身也随之减小,从而在一定程度上抵消了水动力效率的下降幅度;而在逆流条件下,入射波高增大,装置实际捕获的能量随之增加,但入射波能流也同步增大,因此会在一定程度上降低效率的上升幅度。上述结果表明, ζ_{in} 更适用于反映装置在波流共同作用下对实际入射波能的利用水平,而 ζ_{in0} 则更适合用于比较不同流速条件下装置自身水动力性能的变化规律。

4.3 吃水深度的影响

为研究后墙吃水深度对 OWC 型防波堤水动力性能的影响,本文设置了 3 种后墙吃水深度,分别为 $d_2 = 0.25\text{ m}$ 、 0.375 m 和 0.5 m ,入射波高 $H_0 = 0.06\text{ m}$ 及前墙吃水深度 $d_1 = 0.25\text{ m}$ 保持不变。

图 12a、b 和 c 分别展示了不同后墙吃水深度下 OWC 型防波堤的透射系数 K_t 、反射系数 K_r 和水动力效率 ζ_{in0} 随无量纲参数 kh 的变化情况。由图 12a 可见,透射系数随后墙吃水深度 d_2 的增大呈下降趋势。这是因为在前墙吃水深度保持不变的情况下,后墙吃水增加进一步阻挡了波浪向下游的传播,使更多波能被困在气室内部,从而导致透射到防波堤后方的能量降低,即透射系数随后墙吃水深度增加而下降。而对于反射系数,从图 12b 可见,不同后墙吃水深度对其影响甚微,尤其是在低频长波区域。其主要原因在于,迎浪侧的前墙在波浪反射的过程中起主导作

用。由于本研究中气室前墙吃水深度保持不变,其对波浪的反射作用相对稳定。相比之下,后墙位于结构的背浪侧,其主要作用更偏向于影响气室内水体振荡与透射波的传播特性,对迎浪侧反射波的直接影响相对较弱。因此,在本研究取值范围内,后墙吃水深度 d_2 对反射系数的影响不明显。

由图12c可见,水动力效率随着后墙吃水深度 d_2 的增加呈明显上升趋势。这主要是因为后墙吃水深度增加后,增强了对进入气室波能的阻挡与反射,导致透射到下游的波浪能量进一步降低,从而使更多的波能被滞留在气室内部。这些能量通过水柱的往复振荡被有效转换为空气动能,进而提升了装置的水动力效率。此外,从图中还可以看出,在高频短波区域,水动力效率 ζ_{in0} 的提升并不明显。这是因为高频短波的透射能力较弱,其大部分波能在到达前墙时即被反射,无法进入气室内部。因而,即便后墙吃水深度变大,由于气室内原本捕获的波能就较少,水动力效率的提升幅度也非常有限。

4.4 后墙厚度的影响

在探讨了后墙吃水深度对OWC型防波堤装置水动力性能的影响之后,本节进一步探讨了后墙厚度变

化对装置水动力性能的影响。研究中设置了3种后墙厚度,分别为 $w_2 = 0.1\text{ m}$ 、 0.2 m 和 0.3 m ,同时,前墙厚度 $w_1 = 0.1\text{ m}$,入射波高 $H_0 = 0.06\text{ m}$,流速 $U_0 = 0$ 保持不变。此外,前后墙吃水条件保持一致,均设为 $d_1 = d_2 = 0.25\text{ m}$,且OWC型防波堤气室宽度在上述工况中保持不变。

图13a、b和c分别给出了不同后墙厚度条件下,OWC型防波堤的透射系数 K_t 、反射系数 K_r 及水动力效率 ζ_{in0} 随无量纲参数 kh 的变化规律。由图13a可见,随着OWC型防波堤后墙厚度 w_2 的增加,透射系数 K_t 逐渐减小。这是由于在前墙几何参数保持不变的情况下,透射进入气室的波浪能量基本保持不变;而增加后墙厚度相当于增加了整个防波堤的宽度,后墙对波浪的有效阻挡范围扩大。具体表现为,气室内水体向背浪侧的流动路径加长,使波浪更难透射至装置后方,从而导致透射波波幅降低,即透射系数 K_t 随后墙厚度增大而降低。如图13b所示,后墙厚度变化对反射系数的影响并不明显。这主要是因为反射特性主要由装置迎浪侧的几何参数主导,而本研究中仅改变了后墙厚度 w_2 ,前墙几何参数保持不变,因此对迎浪侧波浪场的扰动较小。

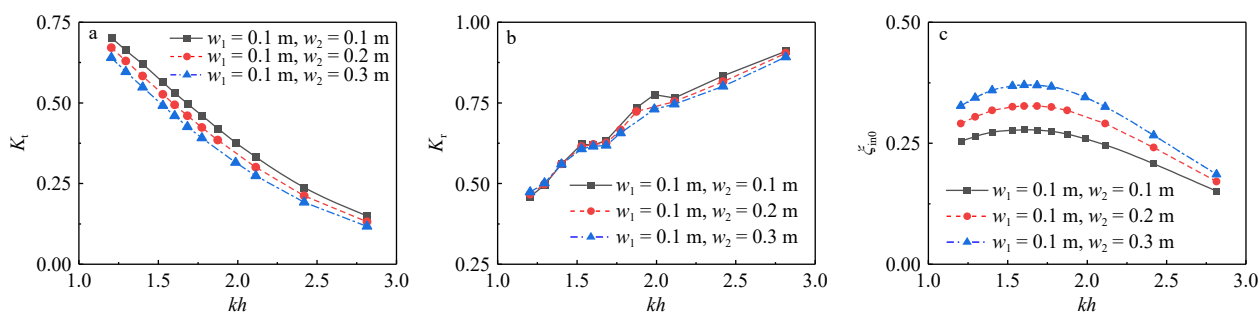


图13 后墙厚度变化下OWC型防波堤的透射系数 K_t (a)、反射系数 K_r (b)和水动力效率 ζ_{in0} (c)

Fig. 13 OWC-breakwater under the influence of rear wall width: transmission coefficient K_t (a), reflection coefficient K_r (b), and hydrodynamic efficiency ζ_{in0} (c)

由图13c可见,OWC型防波堤的水动力效率 ζ 随后墙厚度的增加而明显提高。在前墙厚度及气室宽度均保持不变的情况下,透射进入气室的波浪能量整体变化不大;与增加后墙吃水同理,增大后墙厚度增强了波浪在气室内部的反射与能量滞留,使更多能量参与气室内能量转换,从而使装置的水动力效率提高。在高频短波区,由于波能难以有效进入气室,波浪与气室的耦合作用减弱,导致后墙厚度对装置的水动力效率的影响减弱。

5 结论

本文通过物理模型试验和基于势流理论的HOBEM

时域模型,对二维OWC型防波堤装置在波流共同作用下的水动力特性进行了系统研究,重点分析了水流流速、后墙吃水深度及后墙厚度对装置透射系数、反射系数以及水动力效率的影响规律,主要结论如下:

(1)水流对OWC型防波堤水动力性能有显著影响。与无流条件相比,在顺流情况下OWC型防波堤透射系数、反射系数和水动力效率均减小;反之,在逆流条件下,上述参数则呈增大趋势。

(2)OWC型防波堤后墙吃水深度是影响装置波能捕获能力的关键因素。随着后墙吃水的增加,系统的透射系数呈下降趋势,反射系数变化不明显,而水动力效率则显著提升。但在高频短波条件下,由于波

能难以有效进入气室,增加后墙吃水深度对装置水动力效率的提升效果并不显著。

(3)后墙厚度对OWC型防波堤的水动力性能的影响与后墙吃水深度类似。即后墙厚度增加可减小透射系数并提高水动力效率,而反射系数对该结构参数不敏感。同样,在高频短波区,增加后墙厚度并不会显著提高装置的水动力效率。

需要说明的是,尽管本文以OWC型防波堤为研究背景,但为突出波流共同作用下装置的水动力响应

特征,数值模型对实际工程结构进行了适当简化,未进一步考虑防波堤整体结构、空气透平系统及其他附属构件等因素。在此基础上,模型保留了装置气室、前墙及后墙等主要结构,用于分析波流共同作用下装置的水动力响应规律。因此,本文所得结果主要反映的是波流共同作用下装置的水动力响应特征,对于实际工程中完整OWC型防波堤整体性能的评价仍具有一定局限,后续尚需结合更完整的结构模型、物理试验及实测资料进一步研究。

参考文献:

- [1] Mustapa M A, Yaakob O B, Ahmed Y M, et al. Wave energy device and breakwater integration: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 77: 43–58.
- [2] Ojima R, Suzumura S, Goda Y. Theory and experiments on extractable wave power by an oscillating water-column type breakwater caisson[J]. *Coastal Engineering in Japan*, 1984, 27(1): 315–326.
- [3] 胡晓. 一种基于防波堤的振荡水柱式的波浪能发电装置的水动力研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
Hu Xiao. An oscillating water column type wave energy power generation device based on a breakwater hydrodynamic study of the turbine[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.
- [4] Zhuang Qianze, Ning Dezhi, Mayon R, et al. Experimental and numerical investigation of a land-fixed breakwater-type wave energy converter: an OWC device and a porous plate[J]. *Coastal Engineering*, 2024, 194: 104614.
- [5] 庄乾泽, 宁德志. 集成透空板的振荡水柱式防波堤水动力性能模拟研究[C]//第二十一届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 青岛: 中国海洋学会海洋工程分会, 2024: 177–181.
Zhuang Qianze, Ning Dezhi. Numerical study on hydrodynamic performance of an oscillating water column breakwater integrated with perforated plates[C]//Proceedings of the 21st China Ocean Engineering Symposium. Qingdao: the Marine Engineering Branch of the Chinese Ocean Society, 2024: 177–181.
- [6] Socrates S S, Sriram V, Sundar V. Numerical investigations on the hydrodynamic performances of an isolated OWC and its integration with a semi-circular breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 302: 117686.
- [7] Socrates S S, Sriram V, Sundar V. Experimental investigation on an array of OWCs integrated with Semi-circular breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 331: 121323.
- [8] Zhang Xiangyu, Mayon R, Zhou Feng, et al. Experimental and numerical investigation on a novel dual-chamber OWC-WEC integrated with an energy-focusing breakwater[J]. *Coastal Engineering*, 2025, 201: 104814.
- [9] Xu Conghao, Yang Jiwei, Yao Yu, et al. Performance of a closely-spaced array of circular U-OWC devices for wave power extraction and breakwater applications[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 324: 120654.
- [10] 傅磊, 宁德志, 王荣泉, 等. 不规则波作用下岸基式振荡水柱波能装置的水动力性能研究[J]. *海洋学报*, 2024, 46(1): 101–110.
Fu Lei, Ning Dezhi, Wang Rongquan, et al. Hydrodynamic performance study of a land-based OWC under the action of irregular wave[J]. *Haiyang Xuebao*, 2024, 46(1): 101–110.
- [11] Koo W. Nonlinear time-domain analysis of motion-restrained pneumatic floating breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(9/10): 723–731.
- [12] He Fang, Huang Zhenhua, Law A W K. An experimental study of a floating breakwater with asymmetric pneumatic chambers for wave energy extraction[J]. *Applied Energy*, 2013, 106: 222–231.
- [13] 纪巧玲, 陈国强. 两种型式的波能装置-浮式防波堤水动力性能比较研究[J]. *海洋学报*, 2023, 45(6): 122–133.
Ji Qiaoling, Chen Guoqiang. Comparison of hydrodynamic performance of two types of wave energy converter-floating breakwater[J]. *Haiyang Xuebao*, 2023, 45(6): 122–133.
- [14] Zhao Xuanlie, Zhang Lidong, Li Mingwei, et al. Experimental investigation on the hydrodynamic performance of a multi-chamber OWC-breakwater[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 150: 111512.
- [15] Cheng Yong, Fu Lei, Dai Saishuai, et al. Experimental and numerical investigation of WEC-type floating breakwaters: a single-pontoon oscillating buoy and a dual-pontoon oscillating water column[J]. *Coastal Engineering*, 2022, 177: 104188.
- [16] Zheng Yanna, Li Jiafan, Mu Yingna, et al. Numerical study on wave dissipation performance of OWC-perforated floating breakwater under irregular waves[J]. *Sustainability*, 2023, 15(14): 11427.
- [17] Wang Chen, Ma Teng, Zhang Yongliang. Semi-analytical study on an integrated-system with separated heaving OWC and breakwater: structure size optimization and gap resonance utilization[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 245: 110319.
- [18] Harikrishnan T A, Manu, Rao S. Experimental investigation on L-Oscillating Water Column wave energy converter integrated with float-

- ing cylindrical breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 315: 119806.
- [19] 陈昌润. 含月池浮式防波堤与振荡水柱式波浪能转换装置集成系统的水动力性能分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2024.
Chen Changrun. Analysis of hydrodynamic performance of integrated system of floating breakwater with moonpool and oscillating water column wave energy converter[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024.
- [20] Brevik I. Flume experiment on waves and currents II. Smooth bed[J]. *Coastal Engineering*, 1980–1981, 4: 89–110.
- [21] Shi Xueli, Li Shaowu, Liang Bingchen, et al. Numerical study on the impact of wave-current interaction on wave energy resource assessments in Zhoushan sea area, China[J]. *Renewable Energy*, 2023, 215: 119017.
- [22] 林红星. 波流与潜体相互作用的非线性数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2014
Lin Hongxing. Nonlinear numerical simulation of wave-current interaction with a submerged obstacle[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [23] Hayatdavoodi M, Li Shuijin. Wave-current-floating body interactions: experiments and modelling[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2026, 142: 104498.
- [24] Ning Dezhi, Wang Rongquan, Zou Qingping, et al. An experimental investigation of hydrodynamics of a fixed OWC Wave Energy Converter[J]. *Applied Energy*, 2016, 168: 636–648.
- [25] 邹志利. 水波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Zou Zhili. Water Wave Theories and Their Applications[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [26] Baddour R E, Song S W. Interaction of higher-order water waves with uniform currents[J]. *Ocean Engineering*, 1990, 17(6): 551–568.
- [27] Dimakopoulos A S, Cooker M J, Bruce T. The influence of scale on the air flow and pressure in the modelling of Oscillating Water Column Wave Energy Converters[J]. *International Journal of Marine Energy*, 2017, 19: 272–291.
- [28] Tanizawa K. Long time fully nonlinear simulation of floating body motions with artificial damping zone[J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1996, 1996(180): 311–319.
- [29] Ning Dezhi, Shi Jin, Zou Qingping, et al. Investigation of hydrodynamic performance of an OWC (oscillating water column) wave energy device using a fully nonlinear HOBEM (higher-order boundary element method)[J]. *Energy*, 2015, 83: 177–188.
- [30] Goda Y, Suzuki Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments[C]/Proceedings of the 15th Coastal Engineering Conference. Honolulu, Hawaii, 1976: 828–845.

Study on the hydrodynamic performance of an floating OWC-breakwater under the combined wave-current action

Wang Rongquan¹, Rui Kailong¹, Ning Dezhi¹, Liang Dongfang²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge CB21PZ, UK)

Abstract: The hydrodynamic performance of a floating oscillating water column (OWC) breakwater under the co-action of waves and currents is numerically investigated. A time domain two-dimensional (2D) fully nonlinear numerical model was established for the OWC-breakwater, and its reliability was validated using experimental data. The effects of the current speed, the rear wall draft, and the rear wall thickness on the transmission coefficient, the reflection coefficient, and the hydrodynamic efficiency are numerically analyzed. The results indicate that under following current conditions, the transmission coefficient, reflection coefficient, and hydrodynamic efficiency of the device all exhibit a decreasing trend; whereas under opposing current conditions, the opposite trends are observed. Furthermore, increasing the rear wall draft reduces the transmission coefficient and improves the hydrodynamic efficiency, with a limited effect on the reflection coefficient. Besides, increasing the rear wall thickness also decreases the transmission coefficient and enhances hydrodynamic efficiency, while its influence on the reflection coefficient is insignificant. The findings of this study provide important references for the structural optimization and engineering design of OWC breakwaters.

Key words: wave energy; OWC-breakwater; combined wave-current action; physical model test; numerical simulations