



OWC-开孔浮式防波堤消浪性能的数值研究^{*}

李佳繁¹, 郑艳娜^{1,2}, 林裕强¹, 陈昌平^{1,2}, 杨杰^{1,2}

(1. 大连海洋大学海洋与土木工程学院 辽宁 大连 116024;

2. 设施渔业教育部重点实验室 辽宁 大连 116024)

摘要: 为了使浮式防波堤在消波的基础上兼具发电功能, 提出一种新型结构形式——OWC(振荡水柱)-开孔浮式防波堤。对其在规则波作用下的消浪性能进行数值研究, 分析了浮堤的间距、开口宽度、锚泊方式、入射角度等因素的影响。结果表明: 1) 在 3 种波高、不同周期波况下, 与普通双浮堤相比, OWC-开孔浮式防波堤的消浪性能较好; 2) 浮堤间距和 OWC 开口宽度越宽, 消浪效果越好; 3) 锚链不拖地的浮堤消浪性能略优于锚链拖地情况, 波浪正向入射比斜向入射时消浪效果好。

关键词: OWC-开孔式; 浮式防波堤; 消浪性能; 透射系数; 数值模拟

中图分类号: U 656. 2+4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0021-08

Numerical study on wave dissipation performance of OWC perforated floating breakwater

LI Jia-fan¹, ZHENG Yan-na^{1,2}, LIN Yu-qiang¹, CHEN Chang-ping^{1,2}, YANG Jie^{1,2}

(1. College of Ocean and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116024, China;

2. Key Laboratory of Environment Controlled Aquaculture, Ministry of Education, Dalian 116024, China)

Abstract: To make the floating breakwater have the function of power generation on the basis of wave dissipation, we propose a new structural form, i. e., oscillating water column(OWC) perforated floating breakwater. We numerically study the wave dissipation performance of the floating breakwater under the action of regular waves and analyze the effects of the spacing, opening width, anchoring mode, incident angle and other factors of the floating breakwater. The results show the followings. 1) Under three wave heights and different periodic wave conditions, the wave dissipation performance of OWC perforated floating breakwater is better than that of the ordinary double floating breakwater. 2) The wider the floating breakwater spacing and OWC opening width, the better the wave dissipation effect. 3) The wave dissipation performance of floating breakwater without anchor chain dragging is slightly better than that with anchor chain dragging, and the wave dissipation effect under normal incidence is better than that under oblique incidence.

Keywords: OWC perforated type; floating breakwater; wave dissipation performance; transmission coefficient; numerical simulation

浮式防波堤具有方便安装、可进行水质交换等优点, 越来越受到广泛的关注。在推进实现全球碳中和的背景下, 波浪能被认为是最佳的清洁能源之一。因此研发具有较好的消浪性能并可以

兼顾波浪能发电等多种功能的浮式防波堤是未来的发展趋势。

近年来的研究表明, 双体浮式防波堤结构具有更好的消浪特性, 国内外学者进行了大量的数值模

收稿日期: 2021-09-31

***基金项目:** 辽宁省教育厅科研项目(LJKZ0717); 海岸及近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP2121), 设施渔业教育部重点实验室开放课题(202206)

作者简介: 李佳繁(1996—), 女, 硕士研究生, 从事波浪与结构物相互作用研究。

通讯作者: 郑艳娜(1978—), 女, 博士, 教授, 从事波浪与结构物相互作用研究。E-mail: zhengyn0506@163.com

拟研究和试验研究。郑艳娜等^[1]、王曦巍等^[2]对双浮箱式防波堤进行了数值模拟,沈雨生等^[3]、Ikesue 等^[4]对双浮箱浮式防波堤进行了物理模型试验研究,讨论了浮堤结构因素对透射系数和反射系数的影响。开孔浮堤可以有效减小透射系数,胡文清等^[5]、刘心媚^[6]对多孔浮式防波堤进行研究,讨论不同的结构参数、孔隙率等因素对消浪性能及系泊受力的影响。在波浪能开发装置中,振荡水柱式(OWC)波浪能发电装置可以利用波浪上下浮动引起腔体内部的水面起伏,内部空气被挤压,通过排气口设置透平装置发电。于定勇等^[7]对振荡水柱装置与防波堤结合的结构消波效果进行了研究。

本文提出一种将 OWC 振荡水柱装置与开孔方箱相结合的双体浮式防波堤,迎浪侧方箱中嵌入 OWC 装置,背浪侧方箱采用开孔结构,旨在消减波浪的同时利用波浪能。本文对这种组合浮堤的消浪特性展开研究,讨论双箱间距、开口宽度、锚泊方式等因素对浮堤透射系数的影响规律,为实际工程应用提供理论基础。

1 计算模型

1.1 模型结构

OWC-开孔浮式防波堤主要有两个方浮箱,结构形式见图 1,迎浪侧为嵌入 OWC 的方箱,背浪侧为开孔方箱,顶部和两侧的小孔尺寸分别为 0.5 m×0.8 m 及 0.5 m×0.5 m,开孔率为 16.7%。单个方箱的尺寸为 18 m×12 m×8 m,吃水深度为 5 m,两方箱用挡板相连,间距为 d ,各部分构件之间刚性连接。锚链采用八字锚泊方式,拖地长度为 l ,系泊浮堤见图 2,浮堤上部结构见图 3。

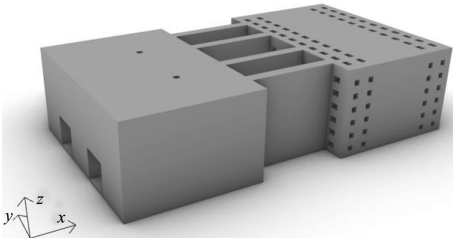


图 1 OWC-开孔式浮式防波堤上部结构模型

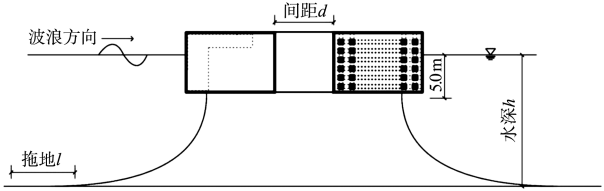


图 2 锚链系泊 OWC-开孔浮式防波堤

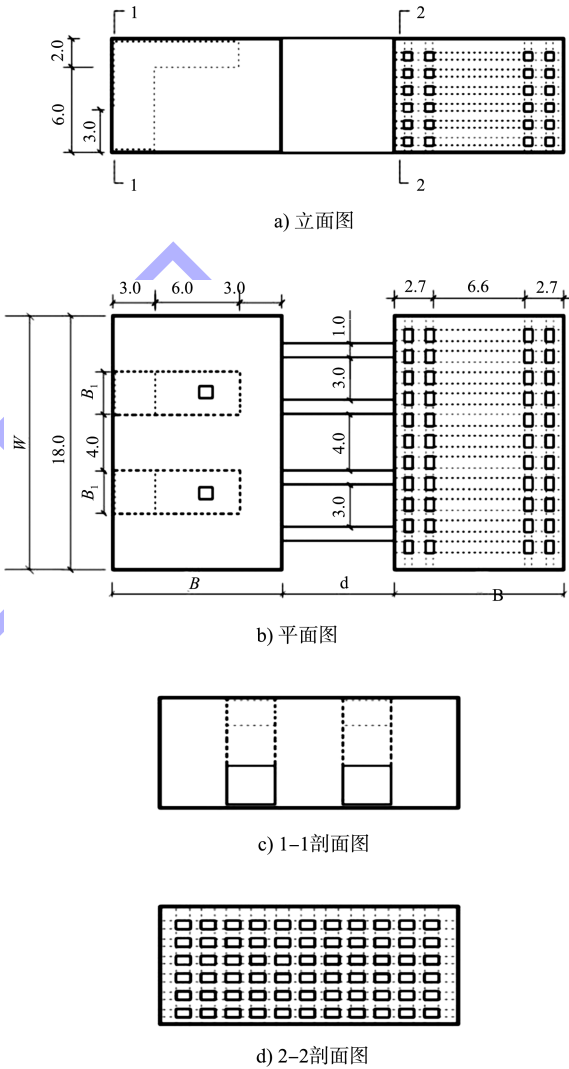


图 3 OWC-开孔浮式防波堤上部结构 (单位: m)

1.2 模拟条件

数值模拟波浪采用规则波,具体计算工况为:锚泊方式分不拖地($l=0$ m)、拖地($l=9$ m)两种,水深 $h=18、25$ m,OWC 开口宽度 $B_1=3、5$ m,波浪入射角 $=0^\circ、30^\circ、45^\circ、60^\circ$,波高 $H=1、3、5$ m,间距 $d=6、8、10、12$ m,波浪周期 $T=5.00、5.82、6.95、8.63、11.40、15.00$ s。

2 数值建模

2.1 应用软件

基于三维势流理论, 主要应用 ANSYS AQWA 软件中 Hydrodynamic Diffraction、Hydrodynamic Response 及 AQWA Graphical Supervisor (AGS) 模块, 得到浮式防波堤后方波浪的波面分布, 并应用平均值法对透射波波面进行数据提取。

2.2 控制方程及边界条件

假定流体为不可压缩的均匀理想流体, 流场速度势的控制方程为 Laplace 方程:

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

运用线性叠加原理, 简谐传播的波浪中具有浮动刚体的流场速度势如下:

$$\phi(x, y, z, t) = \phi_r + \phi_w + \phi_d \tag{2}$$

式中: ϕ_r 为浮体运动产生的辐射势; ϕ_w 为波浪未经浮体扰动的入射势, ϕ_d 为波浪穿过浮体产生的绕射势。

由物质导数和伯努利方程推导可得自由表面运动学和动力学边界条件为:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \nabla \phi \tag{3}$$

$$\frac{d\phi}{dt} = -g\eta + \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi = 0 \tag{4}$$

式中: $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \nabla \phi \cdot \nabla$ 为物质导数; $\mathbf{X}(x, y, z)$ 为瞬时自由水面流体任意质点的位置矢量; η 为自由水面高程; g 为重力加速度。

海底边界条件为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \\ z = -h \end{cases} \tag{5}$$

2.3 浮式防波堤的透射系数

透射系数 K_t 是衡量浮式防波堤消浪特性的指标, 由透射波高和入射波高的比值表示:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \tag{6}$$

式中: H_t 为透射波波高; H_i 为入射波波高。

本文采用平均值方法计算透射波波高 $H_t = \frac{\sum \eta(x, y)}{s}$, 即提取浮式防波堤后方相同区域内的点的波面高度 $\eta(x, y)$ 后取均值, s 为在矩形区

域内选取点的数量。

2.4 数值模拟验证

为了验证本文数学模型计算的准确性, 与双浮箱-双板浮式防波堤的 RAO (response amplitude operator) 与单位入射波高作用下模型的运动高度比较见图 4, 与文献[8]吻合较好; 八字锚链系泊单方箱浮堤的结果见图 5, 与文献[9]吻合较好; 振荡水柱装置的结果与文献[10]的试验结果对比见图 6; 开孔浮堤的验证见图 7, 与文献[6]的试验结果基本一致。

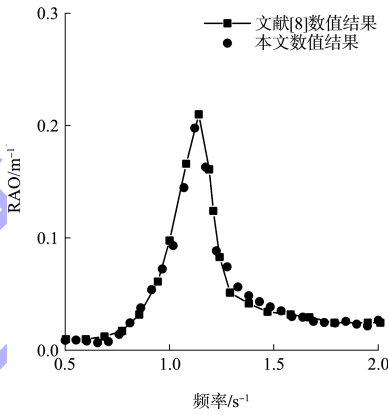


图 4 双箱浮堤纵摇 RAO 的验证

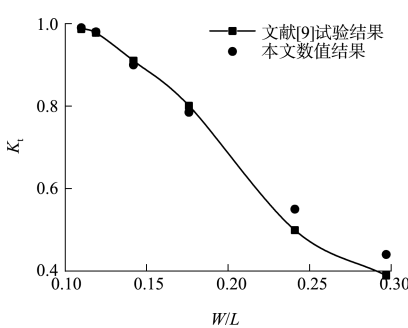


图 5 单方箱-锚链式浮式防波堤透射系数的验证

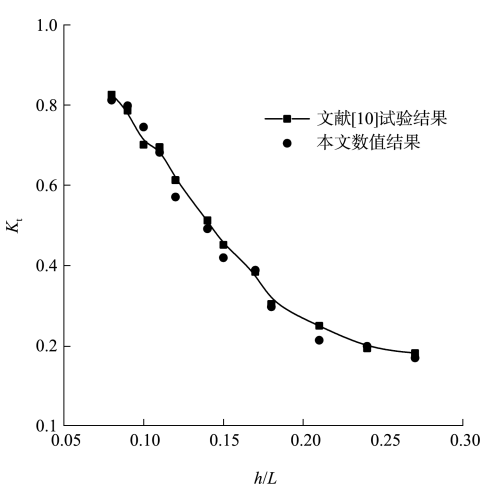


图 6 振荡水柱式防波堤透射系数的验证

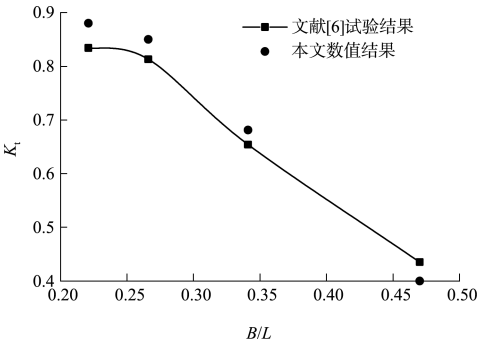


图 7 多孔浮式防波堤透射系数的验证

通过以上算例的验证可以说明，本文的数学模型可以比较准确地模拟 OWC 结构及系泊双体浮堤的运动和周围波浪场的情况，可用于系泊 OWC-开孔浮堤的数值计算。

3 数值模拟结果分析

3.1 结构比选

为了初步了解 OWC-开孔浮堤结构的消浪性能，分别对 4 个模型(表 1)在间距 $d=12\text{ m}$ 时的透射系数进行计算，结果见图 8。通过对比 4 种浮堤的透射系数可以看出，模型 A 和模型 B 的透射系数比较大；模型 D 的透射系数比较小，尤其是长波情况下，透射系数较双箱结构减少 10% 左右，消浪效果比较明显；模型 C 的透射系数介于之间。因此从消浪性能的角度考虑，模型 D(OWC-开孔浮堤)具有较好的消浪性能，同时具有发电的潜力，是一种具有应用潜力的浮式防波堤。

表 1 浮堤上部结构模型

模型	形式	示意图
A	双方箱	
B	OWC 方箱-方箱	
C	方箱-开孔方箱	
D	OWC 方箱-开孔方箱	

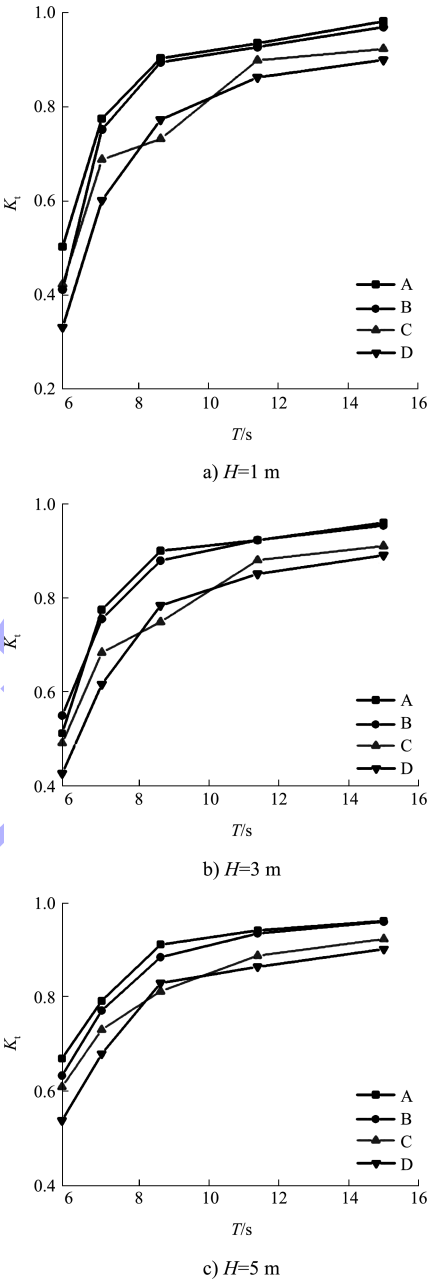


图 8 不同结构浮堤的透射系数

3.2 间距对消浪效果的影响

为了研究间距对结构消波效果的影响，改变双浮堤的间距，即 $d/(2B) = 0.25、0.33、0.42、0.50$ ，锚泊方式采用拖地 $l=9\text{ m}$ ，计算得到水深 $h=25\text{ m}$ 时的透射系数见图 9。

比较图 9a) 中的 4 种间距浮堤的透射系数可以看出，在本文试验条件下的短波波况下，间距越大透射系数越小，随着周期增加，间距对透射系数的影响变小；对于长波情况，不同间距的透射系数相差不大。对比图 9a) ~ c) 可以看出，随着波

高的增大，间距对长周期波浪下透射系数的影响减弱。也就是说增加间距可以明显改善小波高短波的消浪性能，但是对大波高长波的消浪性能影响不大。这是由于增加结构间距相当于增加了整个结构的宽度，波浪穿透防波堤比较困难，并且在两个浮箱之间也会耗散波浪，因此间距越大 OWC-开孔式浮式防波堤的消浪效果越好。但是对于长周期波浪，波能沿水深分布范围较大，即使增加结构宽度，也不能明显消减波浪能量。

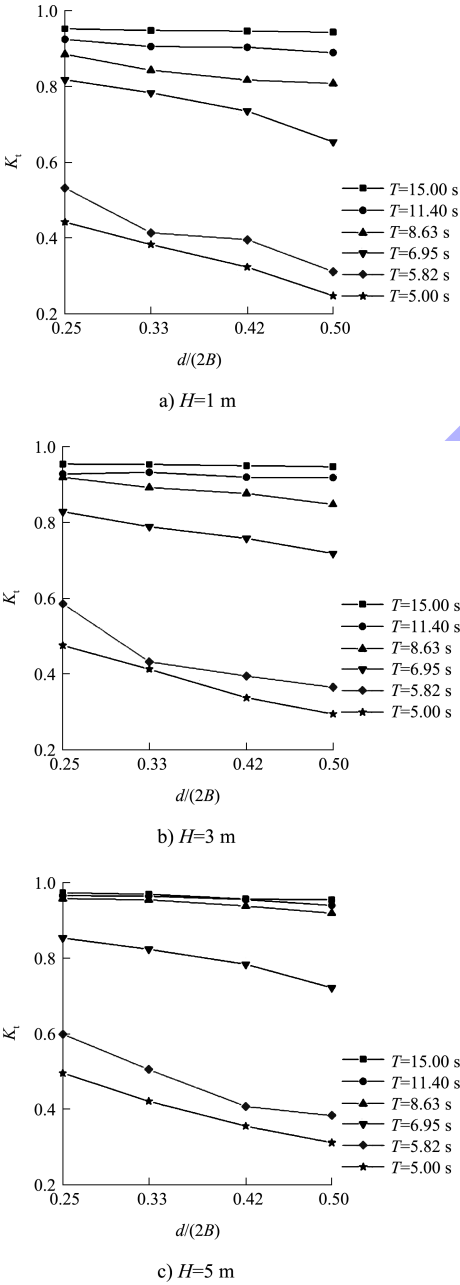
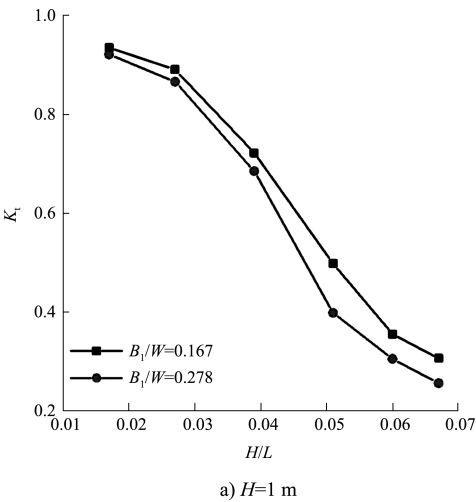
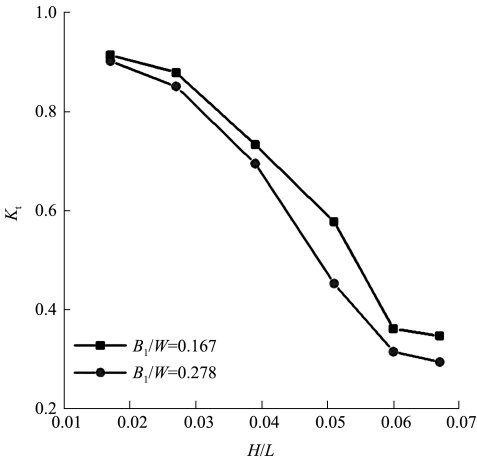


图 9 不同间距的透射系数

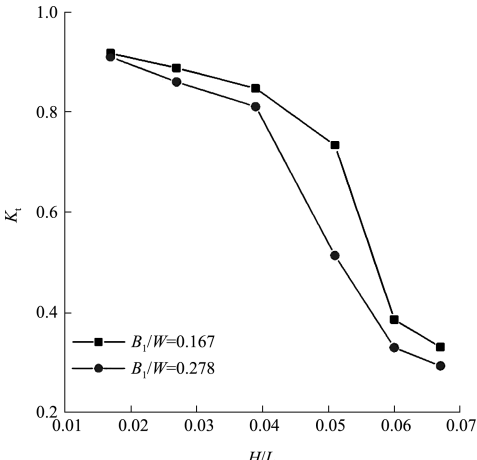
3.3 开口宽度对消浪效果的影响

迎浪侧 OWC 浮箱通过迎浪侧的开孔使入射波进入内部气室，进而压缩气室内空气进行发电，因此迎浪侧开口的尺寸对消浪和发电均有影响，本文重点讨论对消浪的影响。开口在垂向 z 方向的尺寸为 3 m ，调整 y 向的开口宽度 B_1 (图 3)，讨论其对透射系数的影响。两种水深 $h=18、25\text{ m}$ 波况下，两种开口宽度 $B_1=3、5\text{ m}$ ($B_1/W=0.167、0.278$) 的透射系数变化曲线分别见图 10、11。由图 10 可以看出，两条曲线的变化趋势基本一致，在本文试验条件下，增大开口宽度后，透射系数普遍减小，但是变化幅度不大，平均减小 6%。这是由于增大 OWC 装置的开口宽度，更多的波浪进入 OWC 中，相当于装置吸收了更多的波浪，使透过浮堤的波浪减少，从而达到更好的耗散波浪的效果。由图 11 可以看出，水深增加以后，增加开口宽度同样使透射系数减小，但是两条曲线的变化趋势略有不同。当周期 $T=6.85\text{ s}$ 时，两种开口宽度的透射系数相差明显增大。原因在于开口宽度变化会导致 OWC 浮堤结构的自振频率改变，当某一波浪频率接近结构的自振频率时，会引起气室内水体及整个浮堤的剧烈振荡，从而导致能量耗散增加，使透射系数显著变化。在结构设计时需要重点考虑这一因素。

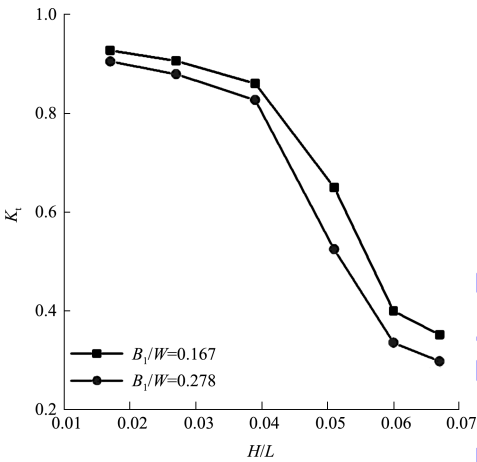




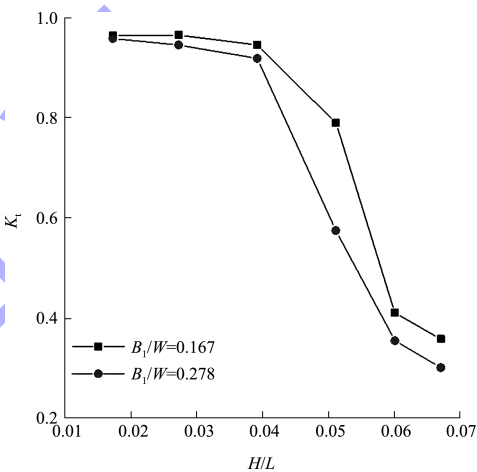
b) $H=3\text{ m}$



b) $H=3\text{ m}$



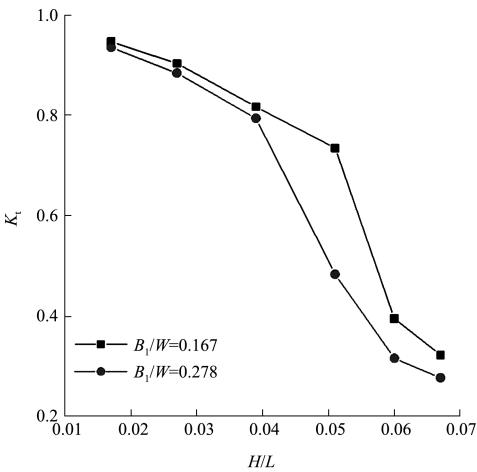
c) $H=5\text{ m}$



c) $H=5\text{ m}$

图 11 $h=25\text{ m}$ 时不同 OWC 开口宽度的透射系数

图 10 $h=18\text{ m}$ 时不同 OWC 开口宽度的透射系数



a) $H=1\text{ m}$

3.4 锚泊方式对消浪效果的影响

为了研究锚链拖地长度对浮堤的消浪性能的影响，对 $H=1\text{ m}$ 时锚链拖地 ($l=9\text{ m}$) 和不拖地 ($l=0\text{ m}$) 两种锚泊方式下的透射系数进行比较，结果见图 12。可以看出在本文试验条件下，锚链拖地情况下的透射系数普遍较大。这是由于锚链不拖地时，长度较短，锚链处于绷直状态，对浮堤的约束作用比较强，同时也会使锚链受力增加，容易发生锚链断裂崩开的情况。比较两种锚泊情况下的透射系数差值在 $0.5\% \sim 8.6\%$ ，相差不大，因此，从安全稳定的角度考虑，建议采用锚链拖地的系泊方式。

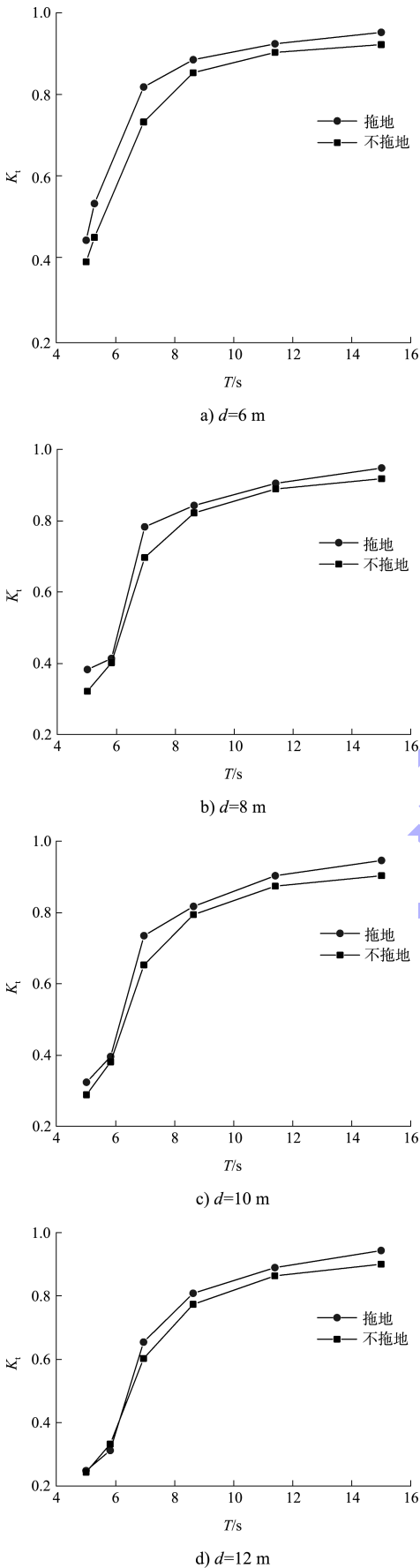


图 12 不同锚泊方式的透射系数

3.5 入射波角度对消波效果的影响

实际海况下, 经常会出现斜向入射的波浪, 需要了解波浪入射角度对透射系数的影响。当波浪沿着 x 轴正向传播时(图 1), 定义入射波角度为 0° ; 波浪沿着 y 轴正向传播时, 入射波角度为 90° 。间距 $d=10\text{ m}$ 、波高 $H=1\text{ m}$ 时, 不同入射角度波浪作用下 OWC-开孔浮堤的透射系数见图 13。

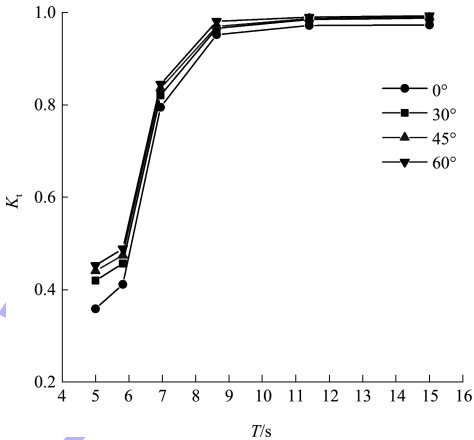


图 13 不同入射波角度的透射系数

由图 13 可以看出, 在本文试验条件下, 正向入射(角度为 0°)时透射系数最小, 随着波浪斜向入射角度的增大透射系数略有增加。这是由于波浪正向入射时, 反射波能较多, 因此透射系数较小; 当斜向入射时, 反射波消耗的能量减少则透射系数有所增加。3 种波高、不同周期波况下斜向入射时透射系数与正向入射透射系数的差值见表 2, $T_1 \sim T_6$ 分别对应从小到大的 6 个周期。可以看出波浪斜向入射时透射系数增大幅度不大, 平均增幅 3.9% 左右。因此可以说 OWC-开孔浮堤对斜向入射波浪的消减作用略有下降。

表 2 斜向入射时透射系数差值 Δ

H/m	入射角/ ($^\circ$)	$\Delta/\%$					
		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
1	30	3.6	1.4	3.5	2.3	2.0	1.4
	45	5.2	2.9	4.4	3.5	4.2	2.5
	60	7.9	4.4	8.4	5.7	4.4	3.4
	平均	3.9					
3	30	5.2	3.3	1.8	1.1	1.6	0.5
	45	7.1	5.1	3.6	3.9	2.6	1.3
	60	9.1	6.3	4.6	4.9	3.4	1.3
	平均	3.7					

续表2

H/m	入射角/ (°)	Δ/%					
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
5	30	6.2	4.8	2.5	1.4	1.3	0.4
	45	8.2	6.6	4.3	2.9	2.1	1.1
	60	9.1	7.5	5.7	3.1	3.9	1.6
	平均	4.0					

注：Δ=(K_{t斜向}-K_{t正向})/K_{t正向}。

4 结 论

- 1)相较于相似结构，OWC-开孔结构的浮式防波堤消浪效果较好，尤其对长波有一定的改进。
- 2)在本文试验波况下，增加双浮堤间距可以明显改善小波高短波的消浪性能，但是对大波高长波的消浪性能影响不大。
- 3)增大开口宽度可以减小透射系数，但是变化幅度不大；开口宽度变化会导致 OWC 浮堤结构的自振频率改变，使透射系数变化显著。浮堤间距较宽时、OWC 开口宽度较宽时消浪效果较好。
- 4)在大多数情况下，锚链不拖地的浮堤消浪性能略优于锚链拖地情况，但相差不大。
- 5)波浪正向入射浮堤时，因反射波能较多，消浪性能较好、浮堤对斜向入射波浪的消减作用略有下降。

参考文献：

[1] 郑艳娜,姚云鹏,董国海,等. 波浪对双箱式浮式防波堤作用

[8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[9] 殷福安.挡板式透空堤透浪特性研究[D].南京: 河海大学, 2005.

[10] 王伟.单挡板透空式防波堤透浪系数和波浪力研究[D].南京: 河海大学, 2011.

[11] 邵杰,陈国平,严士常,等.不规则波作用下垂直挡板式透空堤透浪系数试验研究[J].海洋工程, 2016,

堤作用的时域数值模拟[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(中).北京: 海洋出版社, 2011: 162-167.

[2] 王曦巍,李军,陈嘉禹,等.长周期波浪下双浮箱浮式防波堤消浪性能[J].水运工程, 2021(8): 8-12.

[3] 沈雨生,潘军宁,周益人,等.双浮箱与不同形式板组合的浮堤消浪性能试验[J].水运工程, 2018(7): 20-25.

[4] IKESUE S, TAMURA K, SUGI Y, et al. Study on the performance of a floating breakwater with two boxes[C]//The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. Mountain View: ISOPE, 2002.

[5] 胡文清,余炜光,詹杰民,等.一种三维多孔结构的消波特性研究[C]//第十届全国流体力学学术会议论文摘要集.北京: 中国力学学会流体力学专业委员会, 2018: 185-186.

[6] 刘心媚.多孔型浮式防波堤物理模型试验研究[D].大连: 大连海洋大学, 2019.

[7] 于定勇,曲铭,谢雨嘉.一种集成 OWC 气室的桩基防波堤方案设计与试验研究[J].太阳能学报, 2021, 42(10): 379-386.

[8] 王铁涛,刘祚秋.双浮箱-双水平板浮式防波堤的数值模拟[J].水运工程, 2016(3): 46-50.

[9] 侯勇.单方箱—锚链式浮防波堤水动力特性试验研究[D].大连: 大连理工大学, 2008.

[10] 王鹏.带水平底板的多功能振荡水柱装置水动力特性的实验研究[D].杭州: 浙江大学, 2019.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 16 页)

34(1): 50-57.

[12] 交通运输部天津水运工程科学研究所.水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.

[13] 李严, 琚烈红, 冯卫兵.桩基透空堤上部结构形式对防浪特性影响[J].水运工程, 2015(5): 77-83.

[14] 符家英,潘桓本,刘宪博.挡浪板入水深度对桩基透空式防波堤的关键作用[J].水运工程, 2020(7): 81-87.

(本文编辑 王璁)