

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.020

基于 OpenFOAM 的网袋状牡蛎礁消浪特性数值模拟

邵士好^{1,2}, 陶爱峰^{1,2}, 王佑齐³, 田 鹏⁴, 邢金洋⁵, 刘剑浩^{1,2}, 徐 伟⁶,
范 骏^{1,2}, 陈新平⁶, 韩 宇⁷

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院;
3. 河海大学水文水资源学院; 4. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司; 5. 上海勘测设计研究院有限公司;
6. 自然资源部海洋减灾中心; 7. 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院))

摘要: 为了定量评估网袋状牡蛎礁的消浪效能并深入研究礁体粗糙度参数对波能耗散的影响, 基于 OpenFOAM 构建了网袋状牡蛎礁的数值模型, 通过改变相对礁体高度、相对礁顶宽度、入射波陡度和粗糙度等参数, 分析了规则波作用下牡蛎礁的消浪特性。研究表明: 透射系数随各参数的增大而减小, 其中相对礁体高度影响最为显著; 相对礁体高度为 1.0 时, 粗糙度对波浪衰减的影响主要体现在低值范围, 粗糙度从 0 增大到 2.5 时透射系数降低 23.6%, 但继续增大粗糙度透射系数则几乎不再发生变化。基于分析结果, 采用回归分析法拟合了透射系数的预测公式, 可为网袋状牡蛎礁消浪能力评估提供依据。

关键词: 网袋状牡蛎礁; 粗糙度; 波浪衰减; 透射系数; OpenFOAM

中图分类号: TV139.2; P753

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2026)05-0173-08

Numerical simulation of wave attenuation characteristics of oyster shell bags based on OpenFOAM

Shao Shihao^{1,2}, Tao Aifeng^{1,2}, Wang Youqi³, Tian Peng⁴, Xing Jinyang⁵, Liu Jianhao^{1,2}, Xu Wei⁶,
Fan Jun^{1,2}, Chen Xinping⁶, Han Yu⁷

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection (Hohai University), Ministry of Education;

2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University;

3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University;

4. CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd.;

5. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd.;

6. National Marine Hazard Mitigation Service;

7. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design))

Abstract: To quantitatively evaluate the wave attenuation performance of oyster shell bags and further investigate the influence of reef roughness parameters on wave energy dissipation, a numerical model of oyster shell bags was established based on OpenFOAM. By changing parameters including relative reef height, relative reef crest width, incident wave steepness, and roughness, the wave attenuation characteristics of oyster reefs under regular waves were analyzed. The results show that the transmission coefficient decreases with the increase in each parameter, among which the relative reef height has the most significant influence. When the relative reef height is 1.0, the influence of roughness on wave attenuation is mainly reflected in the low-value range; when the roughness increases from 0 to 2.5, the transmission coefficient decreases by 23.6%, but as the roughness continues to increase, the transmission coefficient remains almost unchanged. Based on the analytical results, a prediction formula for the transmission coefficient was fitted using regression analysis, which provides a basis for evaluating the wave attenuation capacity of oyster shell bags.

Key words: oyster shell bag; roughness; wave attenuation; transmission coefficient; OpenFOAM

近一个世纪以来, 全球气候变暖导致海平面持续上升, 风暴潮等海洋自然灾害的规模与频率均显著增加^[1-2]。传统硬质海堤在保障沿海居民生命财产安全方面发挥了关键作用, 但同时也对海岸生态环境造成了一定的负面影响^[3-4]。近年来, 随着 Building with Nature^[5-6]、基于自然的解决方案^[7-9]以及减灾与生态协同增效^[10]等理念的兴起与发展, 基于生态系统的海岸防护逐渐成为一种融合防护功能、经济效益与生态效益的

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3007900); 浙江省水利厅科技计划项目(RC2401)

作者简介: 邵士好(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事海岸防灾减灾研究。E-mail: shihao.shao@hhu.edu.cn

通信作者: 陶爱峰(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事海洋防灾减灾研究。E-mail: aftao@hhu.edu.cn

可持续范式^[11]。

牡蛎礁作为海洋生态系统的重要组成部分,由牡蛎不断附着于硬质基底并经多年生长堆积而成,具有结构透空、形态复杂及表面大糙率等典型特征。它们不仅可以净化水质、促进渔业资源增殖、增加生物多样性和生态系统稳定性,还具有消浪弱流、减缓岸线侵蚀等重要功能^[12-16],是实现海岸带防灾减灾与生态修复协同增效的有效途径。与传统硬质防护结构相比,牡蛎礁能够通过牡蛎的持续生长与沉积,动态适应海平面上升,从而增强海岸带防护系统的气候韧性与长期适应性^[17]。

近年来,国内外学者采用多种数值模拟方法对牡蛎礁的消浪效果进行了研究。例如:Hong 等^[18]基于 SWAN 模型构建了中空结构礁体模拟山东滨州沿海牡蛎礁消波过程,分析了不同水位和波向条件下牡蛎礁的消浪性能;Yang 等^[19]利用 OpenFOAM 建立了波浪与多孔牡蛎礁结构相互作用的数值模型,探讨了礁体高度、宽度、孔隙率及布置形式对牡蛎礁消浪效果的影响;岑林等^[20]采用 SWASH 模型,以不透水矩形块体概化牡蛎礁形态,研究了牡蛎礁与红树林的协同消浪特性;Salatin 等^[21]基于 FUNWAVE-TVD 建立了波浪与混凝土块堆叠式的牡蛎礁相互作用模型,并利用美国特拉华湾现场观测数据对其进行了验证;Carter 等^[22]结合路易斯安那州沿海的 Living Shorelines 项目,通过 FLOW-3D 构建了人工牡蛎礁模型,并分析了其波浪衰减能力。上述研究大多通过简化几何形态(如不透水矩形块体、混凝土块堆叠体)初步揭示了牡蛎礁的消浪潜力,然而目前仍缺乏对其消浪效果的定量化评价;与传统潜堤工程主要通过堤顶波浪破碎、反射和越浪过程耗能不同,牡蛎礁潜堤还存在牡蛎附着导致的表面粗糙度所引起的底部摩擦能量耗散。粗糙度作为影响近床流速分布与湍流动能的关键参数(如牡蛎聚集形态与壳体尖锐度可显著改变波能耗散效率),其具体作用机制尚不明确。因此,定量评估牡蛎礁的消浪效能并深入研究礁体粗糙度参数对波能耗散的影响,对提升牡蛎礁潜堤的消浪特性具有重要科学意义与工程应用价值。

针对当前牡蛎礁消浪研究中定量评估不足以及数值模型普遍忽略粗糙度影响的问题,本文基于 OpenFOAM 构建了网袋状牡蛎礁消浪的数值模型,通过系统分析其消浪特性随不同控制因素的变化规律,定量评估了网袋状牡蛎礁地形对消浪效果的影响,揭示了粗糙度对透射系数的影响机制,并采用回归分析法建立了透射系数的预测公式,可为牡蛎礁生态护岸工程设计提供参考。

1 数值模型

1.1 模型构建

OpenFOAM 具有灵活度高、适用性强及能够兼顾计算效率与准确度等优点^[23],已广泛应用于波浪-结构物相互作用的研究中^[24]。模型选用基于 OpenFOAM 的 OlaFlow 求解器,以良好模拟波浪和礁体之间的相互作用。模型通过求解雷诺平均纳维-斯托克斯方程(RANS)来模拟波浪与结构物相互作用下的流场。牡蛎礁消浪工况包括水和空气两相,因此使用 VOF 方法来描述液面运动。

数值模型中水流经过牡蛎礁时,流态会发生强烈变化,故考虑采用湍流模型。 $k-\omega$ SST 模型综合了 $k-\varepsilon$ 模型在远场区域收敛性好的特点与 $k-\varepsilon$ 模型在近壁区分辨率高的优势,能够准确捕捉礁体表面附近的剪切湍流与能量耗散过程。因此本文采用 $k-\omega$ SST 模型作为湍流模型来进行数值模拟。 $k-\omega$ SST 模型表达式如下:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = P_k - \beta^* \omega k \tag{1}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) = \frac{\gamma}{\nu_1} G - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \tag{2}$$

其中 $P_k = \min(G, 10\beta^* k\omega)$ $G = \nu_1 \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ $\nu_1 = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)}$

式中: k 为湍动能; ω 为比耗散率; u_j 为雷诺平均时均速度分量; P_k 为 k 的产生项; G 为湍动能生成项; ν 为运动黏度; ν_1 为湍流的运动黏度; S 为雷诺平均流的平均应变速率; σ_k 为 k 方程的湍流普朗特数; σ_{ω} 、 $\sigma_{\omega 2}$ 为 ω 方程的湍流普朗特数,取自远场 $k-\varepsilon$ 模型的参数集; γ 为 ω 方程产生项系数; β^* 为 SST 常数,取 0.09; β 为 ω 方程湍流衰减系数; α_1 为涡黏限制系数,取 0.31; F_1 、 F_2 为混合函数, F_1 在靠近边壁时为 1,远离边壁时为 0; F_1 、 F_2 表达式如下:

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left\{ \max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 y}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \sigma_{\omega 2} k}{D_{kw} y^2} \right\} \right\}^4 \tag{3}$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \min \left\{ \max \left(\frac{2 \sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 v}{y^2 \omega} \right) \right\}^2 \right\} \tag{4}$$

式中: D_{kw} 为交叉扩散项, $D_{kw} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$; ρ 为流体密度。

1.2 网格划分

在计算域的入口处,采用速度入口边界,通过指定波面和流体速度进行造波。在计算域的入口处和出口处都设置了主动消波边界,以方便消波。水槽底部定义为壁面边界,两侧壁面定义为对称边界。顶部边界施加大气压力条件。计算域采用 blockMesh 生成均匀底网,网格尺寸 0.10 m。利用 snappyHexMesh 对礁体表面和自由液面区域局部加密,礁体表面及自由液面附近网格尺寸细化到 12.5 mm,尖角及高曲率处细化至 6.2 mm,自由表面带设置水平切片加密区以提高波面捕捉精度。共生成 209 万网格,完整网格如图 1(a) 所示。礁体附近网格为远端网格尺寸的 1/2,兼顾计算效率与局部精度。

1.3 礁体粗糙度参数化

本文将网袋状牡蛎礁等效为不透水、无孔隙的简化几何体(如图 1(b) 所示)。通过设置粗糙度常数 C_s 为 0.8 来表示网袋状牡蛎礁表面网眼结构。采用 nut 文件中的 nutkRoughWallFunction 设置无量纲参数等效砂粒粗糙度(K_s ,以下简称“粗糙度”)来量化礁体大糙率表面对流动阻力的影响,本质是将复杂真实粗糙面等效为一层均匀砂粒床,从而把多尺度几何粗糙度简化为单一水力学长度尺度参数,并在壁函数中以“粗糙函数”形式修正对数律截距(体现为近壁速度亏损与摩擦阻力增加)。对于均匀砂粒附着的表面, K_s 可简单定义为表面砂粒突出高度;对不均匀砂粒附着的表面,可用表面砂粒的平均直径表示。当 $K_s = 0$ 时,礁体表面是光滑的, K_s 越大代表礁体表面越粗糙,拥有更大的摩擦阻力与更厚的动量耗散层。

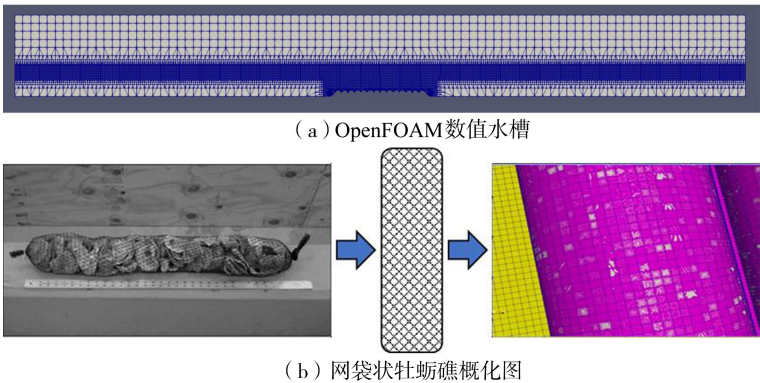


图 1 数值模型
Fig.1 Numerical model

2 模型验证与分析

2.1 计算模型

数值模型布置如图 2 所示,数值水槽长 40 m、宽 0.4 m、高 1 m。牡蛎礁紧密排列布置,单排牡蛎礁宽度为 0.4 m,放置于距造波边界 20 m 处。礁体前后各布置 3 个波高测点,礁后 3 处波高测点间距 1 m,分别监测礁后 1、2、3 m 处波面变化情况,礁前 3 处波高测点则用于波浪入反射分离计算,波高测点位置随组次变化,按照 Mansard 和 Funke 的波浪入反射分离三点法^[25]要求进行布置。波面信息采集使用可变步长形式,初始采集步长为 0.001 s,采集结束后平均步长为 0.003 s,采集时长为 120 s。

2.2 工况设置

虽然牡蛎礁的几何空间结构不规则,且随着牡蛎生长会发生动态变化,但礁体的几何形状与传统的潜堤类似,波浪经过牡蛎礁引起的波浪衰减符合经典的潜堤波浪传播理论。因此,关于牡蛎礁消浪的已有研究大都参考了 Seabrook 等^[26]对潜堤消浪效果的研究,使用波浪透射系数 K_t (透射波高 H_t 与入射波高 H_i 的比值)

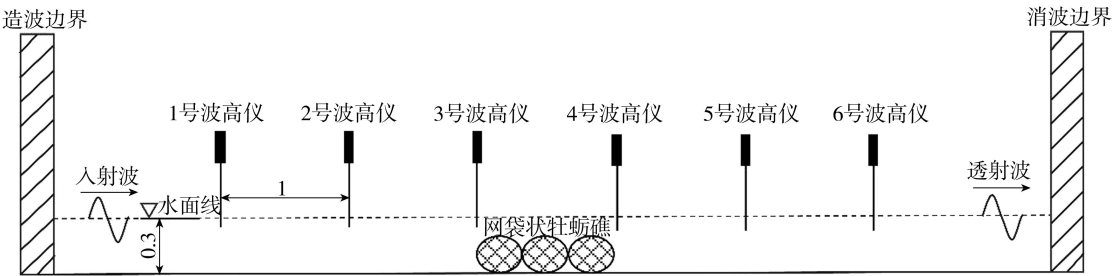


图2 模型布置(单位:m)

Fig. 2 Layout of numerical model (unit: m)

来表示消浪效果。如图3所示(图中 h_s 为礁体高度, d 为水深, B 为礁顶宽度, T_i 、 T_t 分别为入射波周期和透射波周期),本文主要考虑相对礁体高度 h_s/d 、相对礁顶宽度 B/H_i 、入射波陡 H_i/L (L 为入射波长)以及粗糙度 K_s 对牡蛎礁透射系数的影响,通过变化礁体宽度、试验水深以及波要素以达到改变 h_s/d 、 B/H_i 、 H_i/L 等无量纲参数的目的。

计算参数设置如下: $H_i=0.1\text{ m}$, $h_s=0.3\text{ m}$, $d=0.24, 0.3, 0.4, 0.6\text{ m}$,相应 $h_s/d=1.25, 1, 0.75, 0.5$;单排牡蛎礁宽度为 0.4 m ,通过改变礁体排数将礁顶宽度 B 设置为 $0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0\text{ m}$,相应 $B/H_i=8, 16, 24, 32, 40$;通过调整波周期 T 来控制入射波陡 $H_i/L=0.02, 0.03, 0.04, 0.05$;研究粗糙度 K_s 影响时, K_s 分别取 $0, 2.5, 5, 7.5, 10$ 。具体计算工况如表1所示。

2.3 模型验证

通过评估4种不同的计算网格尺寸(表2)的计算精度进行网格收敛性研究。采用更精细的网格划分网袋状牡蛎礁附近和自由液面区域能够以较高的精度捕捉到波浪传播和水动力过程;使用更粗的网格来划分远场,旨在优化计算效率。模拟的初始条件为 $B=2.4\text{ m}$ 、 $d=0.4\text{ m}$ 、 $K_s=5$ 、 $H_i=0.1\text{ m}$ 、 $T=5\text{ s}$ 。以1号波高仪记录的平均波高作为比较各种模拟结果的基准,4种网格模拟得到的平均波高分别为 $0.952, 0.977, 0.996, 0.999\text{ m}$ 。网格4对网格划分做了进一步的细化,得到了与网格3几乎相同的结果。为了在计算时长和精度之间达到一个平衡,选取网格3是合理的。每个数值模拟包括 90 s 的物理持续时间。

通过复现 Allen 等^[27]于2011年开展的网袋状牡蛎礁消浪特性物理模型试验(物理模型试验使用长 9 m 、宽 0.8 m 的水槽,单个网袋状牡蛎礁长度为 0.76 m ,牡蛎壳平均直径为 76 mm),并对比透射系数 K_t 随礁顶宽度 B 与礁体高度 h_s 变化曲线,以验证本文构建的数值模型在模拟网袋状牡蛎礁消浪效果方面的可行性。试验采用波高 0.1 m 、波周期 1.34 s 的规则波,水深 $d=0.3\text{ m}$ (通过有效波理论计算,数值模拟中使用二阶斯托克斯波理论进行造波),通过改变礁体高度与礁顶宽度构建了36种不同工况。本文根据不同礁体高度、礁顶宽度等因素,挑选1个工况用于参数率定,14个工况用于模型验证,粗糙度 K_s 率定为5,模型验证结果如表3所示。

表3中个别工况(如工况7、11)中数值模拟与试验结果的偏差主要来自物理模型试验的不确定性和边界条件差异,整体趋势与变化规律仍保持一致,说明模型在物理机制上是合理的。图4为本文模型模拟透射系数与物理模型试验中透射系数随礁顶宽度与礁体高度变化曲线对比。由图4可知,随着礁顶宽度增大,透射系数呈现减小趋势;随着礁体高度的增大,礁顶在逐渐接近直至与水面持平的过程中,透射系数呈现先慢后快的减小趋势。同时可以看出本文模型模拟结果与物理试验结果吻合较好,表明该模型可对网袋状牡蛎

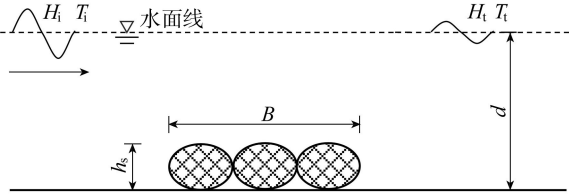


图3 研究参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of research parameters

表1 计算工况

Table 1 Calculation cases

B/m	K_s	T/s
0.8	5	2.24
1.6	5	2.24
2.4	5	2.24
3.2	5	2.24
4.0	5	2.24
2.4	5	2.63、1.83、1.45、1.23
1.6	0、2.5、5、7.5、10	2.24

表2 计算网格参数

Table 2 Computational grid parameters

网格	网格尺寸/mm		网格数量/ 10^6
	远场	牡蛎礁附近和自由液面区域	
1	170	21.3	0.34
2	125	15.6	0.92
3	10	12.5	1.76
4	80	10.0	3.68

礁消浪过程进行模拟。

表 3 模型验证结果
Table 3 Model validation results

序号	B/m	h_s/m	透射系数		
			数值模拟	物理模型试验	相对误差/%
1	0.38	0.08	0.978 9	0.97	0.92
2	0.84	0.09	0.936 6	0.92	1.80
3	1.30	0.08	0.919 5	0.89	3.31
4	1.62	0.09	0.847 1	0.84	0.85
5	1.89	0.09	0.797 8	0.78	2.28
6	0.83	0.16	0.855 1	0.85	0.60
7	1.30	0.16	0.695 2	0.78	10.87
8	0.41	0.24	0.779 7	0.78	0.04
9	0.61	0.23	0.587 2	0.63	6.79
10	0.84	0.24	0.533 2	0.59	9.63
11	1.30	0.23	0.414 5	0.60	30.91
12	1.93	0.23	0.335 0	0.34	1.47
13	0.89	0.31	0.115 7	0.11	5.18
14	1.30	0.30	0.049 3	0.05	1.40

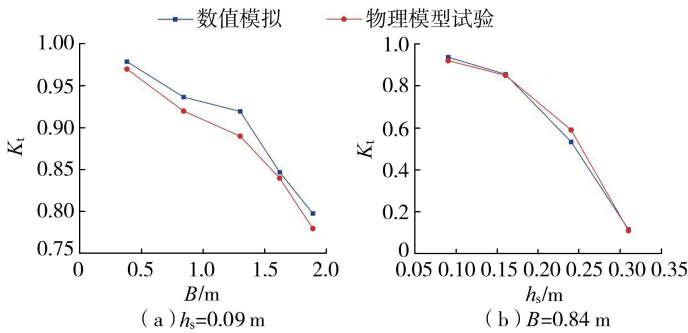


图 4 数值模拟结果与物理模型试验结果对比
Fig. 4 Comparison between numerical and experimental results

3 网袋状牡蛎礁消浪影响因子分析

3.1 相对礁体高度

图 5 为牡蛎礁附近的波浪场,当相对礁体高度 $h_s/d=1.25$ 时,波浪在礁体附近完全破碎,越浪量很少,接近不透水情况,破碎和越浪过程导致大部分能量耗散;当 $h_s/d=1$ 时,礁体高度与水面持平,波浪在礁体上方的紊动最强烈,消浪效果良好;当 $h_s/d=0.75$ 时,摩擦耗散在消浪过程中占主导,且摩擦耗散能量随着相对礁体高度减小逐渐减小;当 $h_s/d=0.5$ 时,波浪经过牡蛎礁时波形基本无变化,礁体对波浪传播没有影响。

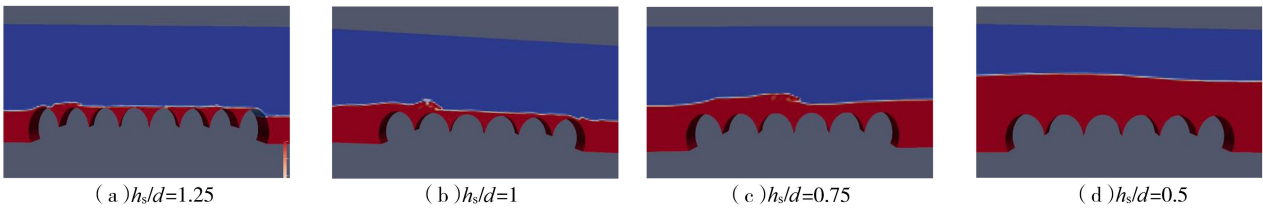


图 5 不同相对礁体高度下牡蛎礁附近波浪场
Fig. 5 Wave field near oyster reefs at different relative reef heights

透射系数 K_t 随礁体相对高度 h_s/d 变化趋势如图 6 所示。总体上, K_t 随 h_s/d 的增大非线性减小,且减小趋势逐渐变缓。在 $h_s/d<1$ 的情况下,礁体处于淹没状态, K_t 随 h_s/d 变化的速率较快,当 $h_s/d=0.5$ 时,礁体接近全透水状态,消浪效果较差。以 $B/H_t=16,24$ 两种工况为例,当 $h_s/d=0.5$ 时,两种宽度的 K_t 接近 1.0,此时波浪几乎不发生衰减;当 $h_s/d=1$ 时, K_t 分别为 0.329、0.229,此时波浪的衰减效果相对较好。

3.2 相对礁顶宽度

图7为透射系数 K_t 随相对礁顶宽度 B/H_i 的变化趋势。总体而言, B/H_i 与 K_t 存在明显的负相关关系。这主要是因为随着 B/H_i 增大,波浪越过礁顶的距离变长,导致波浪破碎更剧烈,从而增强了消浪效果。值得注意的是, B/H_i 对于 K_t 的影响在一定程度上依赖相对礁体高度 h_s/d ,当 $h_s/d=0.5$ 时, K_t 均处于1.0左右, B/H_i 的变化对 K_t 几乎没有影响。当 $h_s/d=1.25$ 时, B/H_i 的变化对 K_t 的影响同样不明显。这是因为:当 $h_s/d=0.5$ 时,礁体完全被淹没,礁体上方波浪几乎不发生衰减, B/H_i 的增大并不会显著增加波能耗散;当 $h_s/d=1.25$ 时,礁体顶部露出水面,波浪以反射、破碎为主,此时宽度变化对消浪贡献有限。以 $h_s/d=0.75$ 、1.25为例,当 $B/H_i=8$ 时, $K_t=0.781,0.154$;当 $B/H_i=40$ 时, $K_t=0.348,0.007$,降幅分别为55.4%、95.5%。

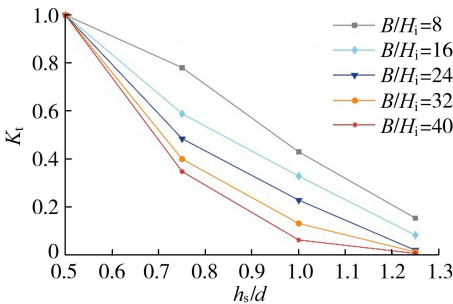


图6 相对礁体高度对透射系数的影响
Fig. 6 Effect of relative reef height on transmission coefficient

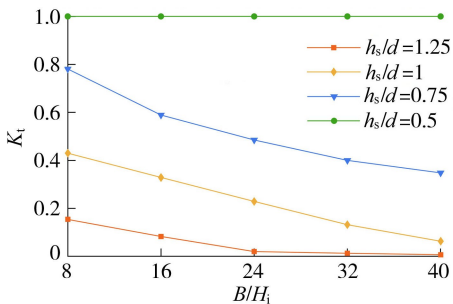


图7 相对礁顶宽度对透射系数的影响
Fig. 7 Effect of relative reef crest width on transmission coefficient

3.3 入射波陡

入射波陡是影响波浪破碎形态的重要因素。由图8可知,透射系数 K_t 随入射波陡 H_i/L 的增大而逐渐减小,这是因为在相同条件下, H_i/L 越大,波浪更易发生反射,透射系数会因此降低。在4种不同相对礁体高度条件下,当 $H_i/L=0.02$ 时, $K_t=1.000,0.726,0.638,0.191$;当 $H_i/L=0.05$ 时, $K_t=0.674,0.299,0.104,0.005$,分别降低了32.6%、58.8%、83.7%、97.4%。

3.4 粗糙度

图9为透射系数 K_t 随粗糙度 K_s 的变化情况。总体而言, K_t 随 K_s 增大而减小,减小趋势逐渐减弱。在牡蛎礁表面由光滑到粗糙转变的初期阶段, K_t 下降较为明显;随着 K_s 进一步增大, K_t 下降速率逐渐减缓,最终趋于稳定。此外, K_s 对于 K_t 的影响在一定程度上取决于相对礁体高度 h_s/d ,当 $h_s/d=1$ 时, K_s 的增强显著增加底部摩擦与湍流耗散,当 $h_s/d=0.5$ 时,底部摩擦效应较弱, K_s 变化对 K_t 影响有限;而 $h_s/d=1.25$ 时,礁体顶端出水,波浪主要通过反射耗散, K_s 的作用同样不明显。当 $h_s/d=0.5,1.25$ 时, K_s 对 K_t 的影响并不显著,因此这两种情况下不纳入后续定量分析。

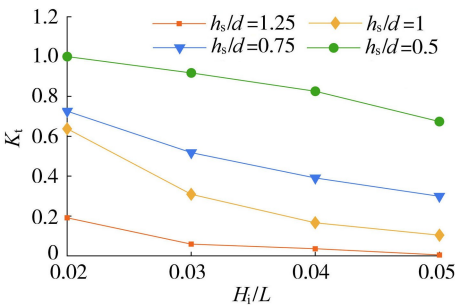


图8 入射波陡对透射系数的影响

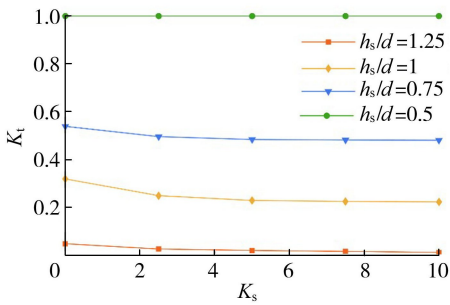


图9 粗糙度对透射系数的影响

当 $B/H_i=16$ 、 $h_s/d=0.75,1$ 时, $K_s=0$ 时 $K_t=0.559,0.339$, $K_s=2.5$ 时 $K_t=0.506,0.259$,分别降低了9.5%和23.6%。由此可见,当 h_s/d 一定(如0.75~1)时,粗糙表面的牡蛎礁潜堤相比光滑潜堤可显著增强波能耗散,消浪效果约提高9%~24%。随着 K_s 的进一步增大,当 $K_s=10$ 时, $K_t=0.481,0.223$,仅分别降低了0.025、0.036,继续增加礁体 K_s 对于 K_t 的影响已经非常小。

3.5 网袋状牡蛎礁消浪拟合公式

参考 Allen 等^[27]的研究,网袋状牡蛎礁消浪公式拟合形式为:

$$K_t=a_1\frac{h_s}{d}+b_1\exp\left(0.1\frac{B}{H_i}\right)+c_1\sqrt{\frac{H_i}{L}}+d_1\exp(d_2K_s)+e_1$$

(5)

式中: a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 d_2 、 e_1 为待定参数。由数据分析可知,当 $h_s/d>1$ 时,透射系数受 4 类无量纲参数的影响较小,不参与表达式拟合。拟合过程中,各参数选取范围分别为:相对礁体高度取 0.50~1.00,相对礁顶宽度取 8~40,入射波陡取 0.02~0.05,礁体粗糙度取 0~10。

回归分析拟合参数参考值及 95% 置信区间如表 4 所示。拟合结果与数值模拟结果的拟合优度 $R^2=0.909$,显著性小于 0.05,表明本文分析的 4 个变量显著影响透射系数,且在 90% 以上程度决定透射系数大小。

将表 4 中参数参考值代入式(5)可得网袋状牡蛎礁透射系数拟合公式如下:

$$K_t=-0.931\frac{h_s}{d}-0.005\exp\left(0.1\frac{B}{H_i}\right)-4.567\sqrt{\frac{H_i}{L}}+0.094\exp(-0.160K_s)+2.055$$

(6)

图 10 为拟合公式预测值和数值模拟试验以及 Allen 等^[27]开展的物理模型试验结果的对比,可以看出拟合公式预测值和试验值吻合较好。

4 结 论

a. 透射系数随相对礁体高度的增大而逐渐减小。当相对礁体高度为 0.5 时,礁体接近全透水状态;在淹没状态下,随着水深减小,波浪由基本不破碎逐渐转为破碎状态,且受相对礁体高度的影响增强;当礁体处于不完全淹没状态时,波浪在其附近完全破碎,能量主要通过反射、破碎以及越浪过程耗散。

b. 透射系数随相对礁顶宽度的增大而逐渐减小,但其影响随水深增加而逐渐减弱;当相对礁体高度为 0.5 时,透射系数几乎不随相对礁顶宽度发生变化。

透射系数随入射波陡的增大亦呈下降趋势,原因在于入射波陡增大增强了波浪反射。

c. 牡蛎礁粗糙度对透射系数的影响显著依赖于相对礁体高度,在相对礁体高度为 1 时最为明显。透射系数随牡蛎礁粗糙度的增大而逐渐减小,当相对礁体高度为 1 时,粗糙度由 0 增大至 2.5 时透射系数降低 23.6%,但若粗糙度进一步增大,透射系数几乎不发生改变。

d. 综合考虑相对礁体高度、相对礁顶宽度、入射波陡、粗糙度等因素,通过多元非线性回归分析,建立了网袋状牡蛎礁透射系数的拟合公式。公式预测值与数值模拟结果及物理模型试验结果相关性良好,该公式可为网袋状牡蛎礁消浪能力评估提供依据。

参考文献:

[1] Shi Jian,Feng Xiangbo,Toumi R,et al. Global increase in tropical cyclone ocean surface waves[J]. Nature Communications, 2024,15(1):174.

[2] 左军成,左常圣,李娟,等. 近十年我国海平面变化研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):442-449. (Zuo Juncheng,Zuo Changsheng,Li Juan,et al. Advances in research on sea level variations in China from 2006 to 2015[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciencss),2015,43(5):442-449. (in Chinese))

[3] Bilkovic D M,Roggero M M. Effects of coastal development on nearshore estuarine nekton communities[J]. Marine Ecology Progress Series,2008,358(1):27-39.

表 4 拟合参数参考值及 95% 置信区间
Table 4 Reference values and 95% confidence intervals of fitting parameters

拟合参数	参考值	置信区间下限	置信区间上限
a_1	-0.931	-0.980	-0.882
b_1	-0.005	-0.006	-0.004
c_1	-4.567	-5.013	-4.022
d_1	0.094	0.005	0.183
d_2	-0.160	-0.056	-0.264
e_1	2.055	1.877	3.352

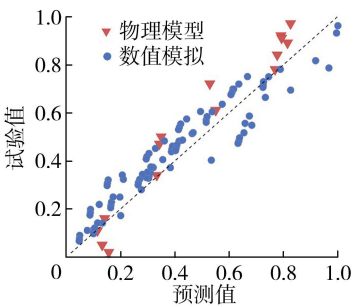


图 10 试验值与拟合公式预测值比较

Fig. 10 Comparison between experimental values and predicted values of fitting formula

[4] 刘晓建,侯棚,陈文龙,等.生态海堤多级平台消浪特性及越浪量计算[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):70-77. (Liu Xiaojian,Hou Peng,Chen Wenlong,et al. Wave dissipation characteristics and wave overtopping calculation of multi-stage platforms of ecological seawall[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(4):70-77. (in Chinese))

[5] Mitsch W J. What is ecological engineering? [J]. Ecological Engineering,2012,45(1):5-12.

[6] van Slobbe E,de Vriend H J,Aarninkhof S,et al. Building with nature;in search of resilient storm surge protection strategies[J]. Natural Hazards,2013,65(1):947-966.

[7] Temmerman S,Meire P,Bouma T J,et al. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change[J]. Nature,2013,504(7478):79-83.

[8] Faivre N,Fritz M,Freitas T,et al. Nature-based solutions in the EU:innovating with nature to address social,economic and environmental challenges[J]. Environ Research,2017,159(1):509-518.

[9] Fastenrath S,Bush J,Coenen L. Scaling-up nature-based solutions;lessons from the living Melbourne strategy[J]. Geoforum,2020,116(1):63-72.

[10] Zheng Jinhai ,Xu Wei,Tao Aifeng ,et al. Synergy between coastal ecology and disaster mitigation in China:policies,practices, and prospects[J]. Ocean and Coastal Management,2023,245(1):106866.

[11] Xu Wei,Tao Aifeng,Wang Risheng,et al. Review of wave attenuation by artificial oyster reefs based on experimental analysis [J]. Ocean Engineering,2024,298(1):117309.

[12] Xu Wei,Tao Aifeng,Zheng Jinhai. Protect oyster reefs in China's coastal zone[J]. Science,2023,380(6641):142.

[13] Tolley S G,Volety A K. The role of oysters in habitat use of oyster reefs by resident fishes and decapod crustaceans[J]. Journal of Shellfish Research,2005,24(4):1007-1012.

[14] Coen L D,Brumbaugh R D,Bushek D,et al. Ecosystem services related to oyster restoration[J]. Marine Ecology Progress Series,2007,341(1):303-307.

[15] Grabowski J H,Peterson C H. Restoring oyster reefs to recover ecosystem services[J]. Ecosystem Engineers:Plants to Protists,2007,4(1):281-298.

[16] Mann R,Harding J M,Southworth M J. Reconstructing pre-colonial oyster demographics in the Chesapeake Bay,USA[J]. Estuarine,Coastal and Shelf Science,2009,85(2):217-222.

[17] Rodriguez A B,Fodrie F J,Ridge J T,et al. Oyster reefs can outpace sea-level rise[J]. Nature Climate Change,2014,4(6):493-497.

[18] Hong Xin, Ji Yinglu, Yan Jie, et al. Study on the wave-dissipation effect of oyster reefs based on the SWAN numerical model[J]. Water,2023,15(16):2884.

[19] Yang Yunhan,Sui Titi,Wang Guangsheng,et al. Investigations on the shallow water wave attenuation over continuous porous oyster reef-like structure[J]. Ocean Engineering,2023,287:115307.

[20] 岑林,倪兴也,冯曦,等. 淤泥质海岸多要素协同减灾数值模拟研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(3):149-160. (Cen Lin, Ni Xingye, Feng Xi, et al. Numerical simulation study on multi-factor synergistic disaster reduction on muddy coasts[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2026,54(3):149-160. (in Chinese))

[21] Salatin R,Wang Hongqing,Chen Qin,et al. Assessing wave attenuation with rising sea levels for sustainable oyster reef-based living shorelines[J]. Frontiers in Built Environment,2022,8:884849.

[22] Carter J,Fenical S,Harter C,et al. CFD modeling for the analysis of living shoreline structure performance[C]//Coastal Structures and Solutions to Coastal Disasters Joint Conference 2015. Reston,VA;American Society of Civil Engineers,2015:442-450.

[23] 曾诚,尹雨然,周婕,等. 基于二阶规则波模拟的数值波浪水槽优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):33-40. (Zeng Cheng,Yin Yuran,Zhou Jie,et al. Optimization of a numerical wave tank based on simulations of 2nd order regular waves[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(4):33-40. (in Chinese))

[24] 毛鸿飞,韩龙,赫岩莉,等. 潜堤坡度对波浪传播变形的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):76-84. (Mao Hongfei,Han Long,He Yanli,et al. Influence of slope of submerged breakwater on wave propagation and deformation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(5):76-84. (in Chinese))

[25] Mansard E P D, Funke E R. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Coastal Engineering. New York:ASCE,1980:154-172.

[26] Seabrook S R, Hall K R. Wave transmission at submerged rubble mound breakwaters [C]//Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering, Reston, VA:ASCE,1999:2000-2013.

[27] Allen R J, Webb B M. Determination of wave transmission coefficients for oyster shell bag breakwaters[J]. Coastal Engineering Practice (2011), 2011:684-697. ([https://doi.org/10.1061/41190\(422\)57](https://doi.org/10.1061/41190(422)57))