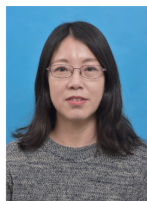


· 综合 ·



波浪周期对透空式防波堤消浪性能影响的数值研究*

潘新颖^{1,2}, 陈宁馨¹, 梁丙臣^{1,2}, 王振鲁^{1,2}

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 针对4种典型透空式防波堤结构, 基于FLOW-3D建立三维数值模型, 对不同波浪周期作用下的结构消浪性能及波能分布特征进行对比分析。数值计算结果表明: 1) 帷幕墙式防波堤适用于中短周期波浪的防护, 桩基开孔挡板式防波堤仅适合短周期波浪的掩护需求, 梳式防波堤与桩基垂直挡板式防波堤在短、中、长周期波浪环境下均具有良好的适用性。2) 在特定周期下, 梳式防波堤的波浪反射特性会引起共振, 导致结构透射系数和反射系数分别呈现峰值和谷值。3) 4种透空堤中, 短周期波浪作用下, 垂直挡板式防波堤的挡浪效果较好, 梳式防波堤对中长周期波浪具有更好的掩护效果。

关键词: 透空式防波堤; 桩基; 消浪性能; 水动力特性; 数值模拟

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0013-07

Numerical analysis on impact of wave period on wave dissipation performance of permeable breakwaters

PAN Xinying^{1,2}, CHEN Ningxin¹, LIANG Bingchen^{1,2}, WANG Zhenlu^{1,2}

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Qingdao 266100, China)

Abstract: Aiming at four typical permeable breakwater structures, a three-dimensional numerical model based on FLOW-3D is established to compare and analyze the wave dissipation performance and wave energy distribution characteristics of the structures under different wave periods. The numerical calculations indicate that: 1) the curtain wall breakwater is suitable for short to medium waves, while the pile-supported permeable breakwater is only appropriate for short waves. The comb-type breakwater and double baffle pile-supported breakwater are applicable to waves ranging from short to long. 2) The comb-type structure induces resonance under specific wave period, resulting in peaks and troughs in the transmittance and reflectance coefficients. 3) Among the four perforated breakwaters, the double baffle pile-supported breakwater demonstrates superior wave attenuation under short waves, while the comb-type breakwater shows an edge in providing protection against medium to long waves.

Keywords: permeable breakwater; pile foundation; wave dissipation performance; hydrodynamic characteristics; numerical simulation

透空式防波堤兼具挡浪和促进水体交换的优点, 有助于改善港内水质, 是一种环保型防波堤。目前, 透空式防波堤已越来越多地应用于我国工

程实践, 因此, 寻求性能优良且适用的透空式防波堤结构已成为当前港口工程领域研究的重要课题。近年来, 透空式防波堤的理论和实验研究取

收稿日期: 2024-01-16

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2601100)

作者简介: 潘新颖 (1976—), 女, 博士, 副教授, 从事海岸动力学工程应用及港口工程结构分析。

得了较为显著的进展,学者们分别对梳式透空堤^[1-2]、帷幕墙式透空堤^[3-5]、开孔挡板式透空堤^[6-7]、竖直挡板式透空堤^[8-9]的水动力特性进行了研究。目前的研究主要侧重于单一结构在不同工况下的消浪性能比较分析,对不同结构的比较研究较为不足。

本文基于 FLOW-3D, 选取如图 1 所示的开孔挡板式、帷幕墙式、梳式、竖直挡板式 4 种工程中应用较广的典型透空式防波堤结构, 建立数值模型, 计算分析消浪性能变化规律, 比较 4 种透空式防波堤在不同波浪周期条件下的消浪性能, 以期透空式防波堤工程设计选型提供指导。

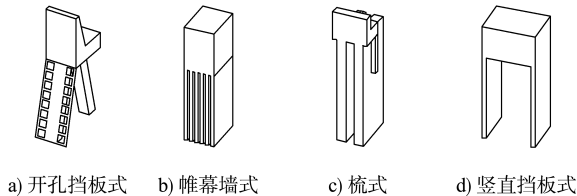


图 1 4 种结构类型的透空式防波堤结构

1 数值模型

1.1 控制方程

考虑到流体具有黏性与不可压缩性, 在 FLOW-3D 中采用连续性方程和 Navier-Stokes 方程作为控制方程。假设研究对象为牛顿流体, 采用部分面积/体积障碍模拟 (fractional area/volume obstacle

representation, FAVOR) 技术及流体体积 (volume of fluid, VOF) 自由液面追踪技术, 控制方程表达式为:

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial x}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 3 个方向的速度分量, V_F 为体积分数, A_x 、 A_y 、 A_z 为 3 个方向可流动的面积分数, ρ 为流体密度, p 为压力, G_x 、 G_y 、 G_z 为 3 个方向的重力加速度分量, f_x 、 f_y 、 f_z 为 3 个方向对应的黏滞力加速度。

1.2 数值模型建立

1.2.1 数值水槽建立

参照物理模型试验的水槽尺寸, 建立长 50 m、宽 0.3 m、高 1.2 m 的数值水槽, 水槽前端设置推板模拟波浪, 末端设置长 8 m 的消波区, 用于减弱波浪反射。在距离推板 28.4 m 处设置测点, 数值水槽布置如图 2 所示。

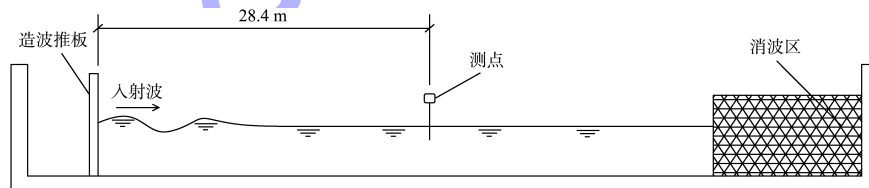


图 2 数值水槽布置

1.2.2 网格划分

本文采用矩形网格, 在靠近防波堤模型处进行渐进加密, 并在水深方向上 1 个波高范围内进行网格局部加密, 可在节省算力的情况下保证计算精度, 网格总数约为 263 万个。

1.2.3 边界条件设置

水槽长度方向 (x 方向): 造波端设置为 Wall 边界, 消波端为 Outflow 边界; 水槽宽度方向 (y 方向):

两侧均采用 Wall 边界; 水槽高度方向 (z 方向): 水槽底部采用 Wall 边界, 自由表面为 Symmetry 边界。

1.2.4 防波堤模型建立

本文主要对 4 种消浪机理较为类似的透空式防波堤结构进行研究, 为便于后续比较研究, 4 种防波堤结构采用相同的透水面积比 $S_1/S_2 = 30\%$ (S_1 为防波堤一个结构单位的透水面积, S_2 为垂

直水流方向水面下总面积), 透水宽度 $B=0.4\text{ m}$ 。依据重力相似准则, 选用防波堤结构几何比尺 $\lambda=10.53$ 。

4 种透空式防波堤的结构尺寸为: 1) 桩基开孔挡板式防波堤模型整体尺寸为 $0.4\text{ m}\times 0.3\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高), 模型采用一排斜方桩, 直径 0.1 m , 前部斜桩装有开孔消浪板, 上部结构为垂直挡浪墙, 下部消浪板宽 0.3 m 、高 0.7 m , 开孔大小 $0.073\text{ m}\times 0.073\text{ m}$ 。2) 帷幕墙式防波堤整体尺寸为 $0.4\text{ m}\times 0.3\text{ m}\times 1.2\text{ m}$, 其上部挡浪墙高 0.45 m , 下部方桩直径 0.031 m 、高 0.75 m 。3) 梳式防波堤模型整体尺寸为 $0.4\text{ m}\times 0.3\text{ m}\times 1.2\text{ m}$, 其上部挡浪墙高 0.25 m , 下部翼板长 0.35 m , 翼板迎浪面至沉箱迎浪面距离 0.2 m , 梳齿宽 0.08 m 、间距 0.07 m 。4) 竖直挡板式防波堤模型整体尺寸为 $0.4\text{ m}\times 0.3\text{ m}\times 1.2\text{ m}$, 上部挡浪墙高 0.25 m , 下部包括两块竖直挡板, 每块挡板厚 0.03 m 、高 0.67 m 。

1.2.5 数值模拟结果验证

数值水槽模型的验证工作分为 2 部分: 1) 验证数值造波水槽造波稳定性与持续性; 2) 在相同的结构参数和波况条件下, 比较各防波堤模型的透、反射系数与相关文献中的试验或数值模拟结果。

数值水槽造波波形与刘睿^[10]试验水槽造波波形对比如图 3 所示; 与刘睿桩基开孔挡板式防波堤试验透射系数对比如表 1 所示; 与 Ji 等^[11]帷幕墙式防波堤试验透射系数对比如表 3 所示; 与 Wang 等^[12]梳式透空堤数值模拟透射系数对比如表 2 所示; 与 Neelamani 等^[13]T 形防波堤(竖直挡板式中的一类)试验透射系数对比如表 4 所示。

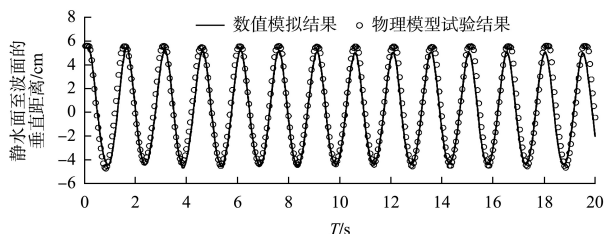


图 3 数值水槽造波验证

表 1 开孔挡板式防波堤模型透射系数验证

相对堤宽 W/L	透射系数		
	文献结果	数值模拟结果	误差/%
0.161	0.552	0.535	3.08
0.230	0.414	0.421	1.69

注: W 为堤宽, L 为波长。

表 2 梳式防波堤模型透射系数验证

相对波室 宽度 B_1/L	透射系数		
	文献结果	数值模拟结果	误差/%
0.070	0.272	0.264	2.94
0.083	0.303	0.287	5.28

注: B_1 为波室宽度。

表 3 帷幕墙式防波堤模型透射系数验证

波浪周期 T/s	透射系数		
	文献结果	数值模拟结果	误差/%
1.2	0.212	0.220	3.77
1.4	0.391	0.384	1.79

表 4 T 形防波堤模型透射系数验证

波陡 H/L	透射系数		
	文献结果	数值模拟结果	误差/%
0.025	0.427	0.459	7.49
0.033	0.560	0.558	0.36

注: H 为波高。

验证结果表明, 数值水槽造波的波形与试验吻合良好, 数值水槽造波效果较好。数值模拟透射系数误差均在 10% 的范围内, 证明各防波堤模型验证效果较好。因此, 可认为数值模型能够较为准确地模拟 4 种透空堤的消浪特性。

1.3 数值模拟工况

根据国家海洋科学数据中心中国台站 2021 年 1—12 月的波况数据整理获得我国海域的波况数据, 海域原型 $T=3\sim 15\text{ s}$ 。根据姜云鹏等^[14]的观点, 将波浪周期划分为短周期 ($T<5\text{ s}$)、中周期 ($T=5\sim 10\text{ s}$)、长周期 ($T>10\text{ s}$)。依据重力相似准则进行比尺换算, 选用波浪周期比尺 $\lambda_T=3.25$, 波况设置见表 5。

表 5 数值模拟波况设置

水深/m	波高/m	T/s	防波堤结构形式
0.95	0.10	0.9、1.1、1.3、	桩基开孔挡板式防波堤、帷幕墙式防波堤、
		1.5、1.8、2.2、	桩基开孔挡板式防波堤、
		2.6、3.0、3.4、	梳式防波堤
		3.8、4.2、4.6	

对应原型波浪，对表5中数值模拟设置的波浪周期进行划分： $T=0.9\sim 1.5\text{ s}$ 为短周期波浪， $T=1.8\sim 3.0\text{ s}$ 为中等周期波浪， $T=3.4\sim 4.6\text{ s}$ 为长周期波浪。

2 数值模拟结果分析

根据Goda两点法^[15]，采用防波堤模型堤前2个测点数据分离反射波高 H_r 和入射波高 H_i 。通过计算获得结构反射系数 K_r ：

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

根据上跨零点法，采用防波堤模型堤后1倍波长以外的2个测点数据获得透射波高 H_t 。结构透射系数 K_t 可通过下式计算：

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (6)$$

根据能量守恒定律，结构的能量耗散系数 K_d 可通过下式计算：

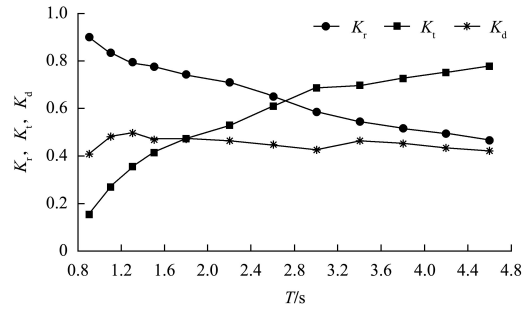
$$K_d = \sqrt{1 - K_r^2 - K_t^2} \quad (7)$$

2.1 不同结构透空堤水动力特性随周期的变化

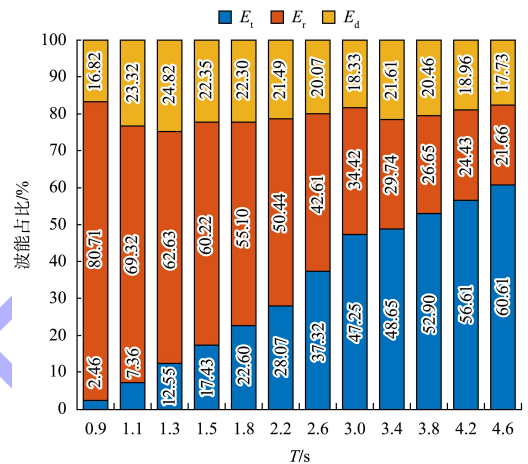
2.1.1 桩基开孔挡板式透空堤消浪性能变化

桩基开孔挡板式透空堤在波浪周期研究范围内的 K_t 、 K_r 以及 K_d 变化如图4a)所示。 K_t 与 T 变化呈正相关，当 $T < 1.8\text{ s}$ 时， K_t 保持在0.5以下，但在中长周期波浪作用下，结构透浪较为明显，表明该结构对于短周期波浪的防护效果较中长周期波浪更好。该结构 K_r 随波浪周期增大单调减小，当 $T < 1.5\text{ s}$ 时， $K_r > 1.8$ ，对波浪的反射作用显著。该透空堤的能量耗散效率在周期研究范围内基本保持在0.4~0.5，说明周期变化对结构的 K_d 影响不显著。

由图4b)可知，透空堤的波能分布随 T 变化较为显著，透射波能随 T 的增加而占比上升，反射波能则占比下降，防波堤消能在20%左右的范围内波动，绝大部分反射波能转化为透射波能。这说明该结构对于周期较小的波浪，大部分波能被上部挡浪墙反射；而对于周期较大的波浪，大部分波浪能量透过结构进入堤后水域。



a) 消浪性能变化



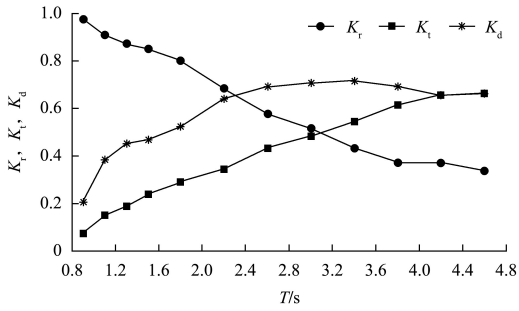
b) 波能占比

图4 桩基开孔挡板式透空堤水动力特性随T的变化

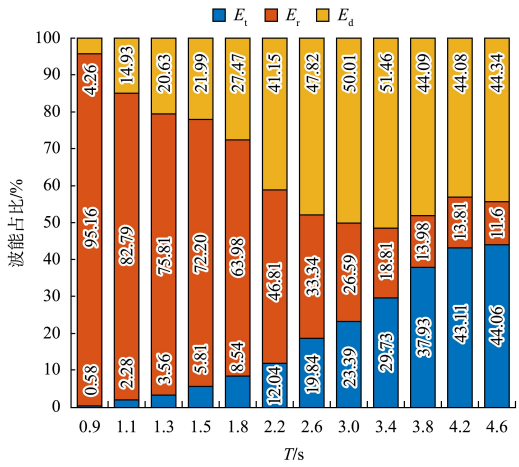
2.1.2 帷幕墙式透空堤消浪性能变化

图5a)为不同波浪周期对帷幕墙式透空堤消浪性能的影响。在波浪周期研究范围内， K_t 随 T 增加而稳步上升，当 $T < 3.0\text{ s}$ ， K_t 在0.5以下，表明该结构对中短周期波浪具有良好的防护性能。与 K_t 变化趋势相反，帷幕墙式透空堤的 K_r 随 T 增加呈现出稳定而显著的减小趋势。随着 T 的增加，帷幕墙式透空堤的能量耗散效率先逐渐提高后略有下降，可见在中长周期波浪作用下，该结构对波浪能量的消耗作用较为显著， K_d 在0.65~0.70波动。

对帷幕墙式透空堤的波能分布进行分析可知，随着 T 的增加，该结构的透射波能和防波堤消能比例增加，反射波能占比减小，见图5b)。一部分反射波能部分被转化为透射波能，另一部分则由防波堤消耗。这表明在较短周期情况下，大部分波浪能量被结构上部挡浪墙反射，对于穿透能力较强的长周期波，其一部分能量在下部密集的方桩之间振荡并耗散，一部分透过结构进入堤后水域。



a) 消浪性能变化



b) 波能占比

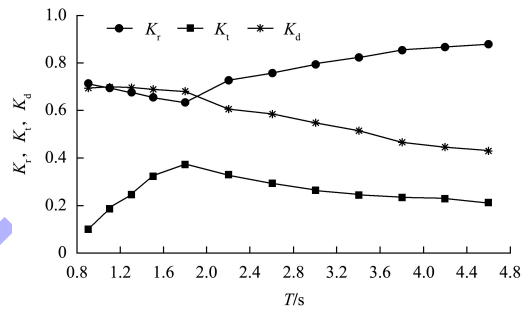
图 5 帷幕墙式透空堤水动力特性随 T 的变化

2.1.3 梳式透空堤消浪性能变化

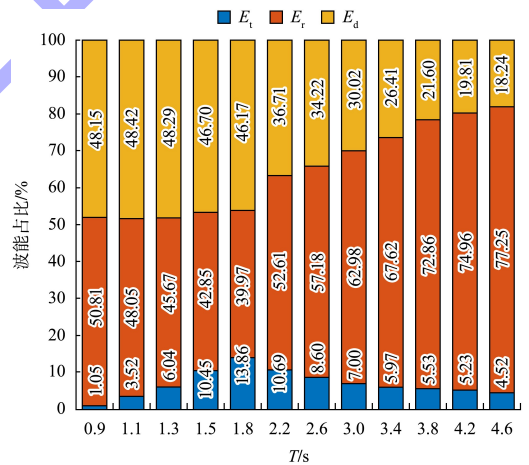
如图 6a) 所示, 通过分析梳式防波堤消浪性能变化可以得出, 梳式透空堤的 K_t 随着 T 的增加呈现先增后减的趋势, K_r 呈现先减后增的趋势。当 $T=1.8$ s 时 K_t 取得最大值 0.37, K_r 对应取得最小值 0.63, 此时防波堤的波浪透过率最高, 挡浪性能最弱。这是由于梳式防波堤的矩形沉箱前沿和翼板之间存在一定的距离, 使波浪击堤时的反射不同步, 当反射波相位差达到特定值时, 反射波浪叠加后与箱体前沿和翼板间水体的振荡频率相同, 发生共振效应, 从而使水体吸收波浪大部分能量, 并将能量传至结构物后方, 造成 K_t 较大、 K_r 数较小的情况。在周期研究范围内, 该结构的 K_t 一直保持在 0.5 以下, 且当波浪周期较大时, 该结构表现出明显的反射特性。这表明无论是短周期、中周期还是长周期的波浪作用下, 该结构都具有较好的防护效果, 且对长周期波浪的掩护作用尤为突出。随着波浪周期的增加, 梳式透空

堤的能量耗散效率逐渐下降, 在短波作用下, 结构能量消耗较大。

T 变化对该结构的波能分布有较为明显的影响, 随着 T 的增加, 梳式透空堤的透射波能占比呈现先增后减的趋势, 而反射波能占比则呈现相反的变化, 先减后增, 同时防波堤消能占比逐渐减小, 见图 6b)。这表明短周期波浪能量一部分被结构反射, 一部分经由防波堤消耗, 而长周期波浪的波能主要被结构反射。



a) 消浪性能变化



b) 波能占比

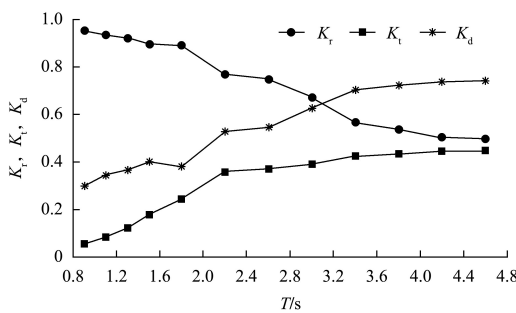
图 6 梳式透空堤水动力特性随 T 的变化

2.1.4 桩基竖直挡板式透空堤消浪性能变化

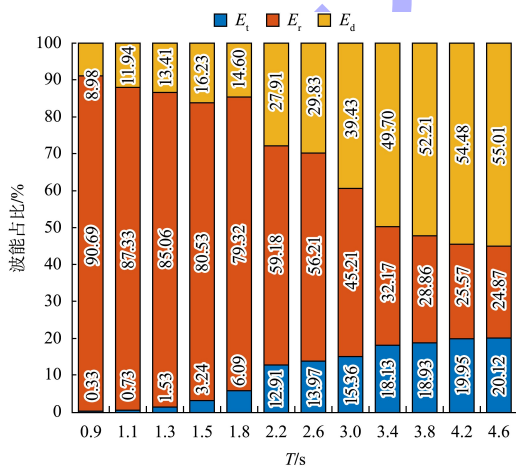
桩基竖直挡板式透空堤的消浪性能如图 7a) 所示, T 的增加使该结构的透射性能逐渐上升。当波浪周期较小时, 结构的 K_t 显著增大, 最大增量为 0.11。但当 $T>2.6$ s 时, T 的进一步增大不再显著影响 K_t 。在波浪周期研究范围内, 结构的 K_t 可保持在 0.5 以下, 表明该结构在短、中、长周期波浪作用下均表现出较好的防护效果。该透空堤的 K_r 随 T 的增大而逐渐减小, 当 $T<2.2$ s 时,

该结构对波浪的反射较为明显。随着 T 的增加, 该结构的能量耗散效率逐渐提高, 在长波作用下, 结构内波浪上下振荡幅度较大, 波浪能量被充分消耗。

如图 7b) 所示, 由波能分布变化情况分析可知, 随着 T 的增加, 该结构的透射波能和防波堤消能占比增大, 反射波能占比减小, 反射波能主要经由防波堤消耗, 小部分转化为透射波能。说明短周期波的大多数波能在前挡板处被结构反射, 而长周期波可从前挡板底部透过, 进入两层挡板形成的消浪室中, 在挡板之间发生振荡, 消耗波能, 同时也有少部分波浪能透过挡板进入堤后水域。



a) 消浪性能变化



b) 波能占比

图 7 桩基垂直挡板式透空堤水动力特性随 T 的变化

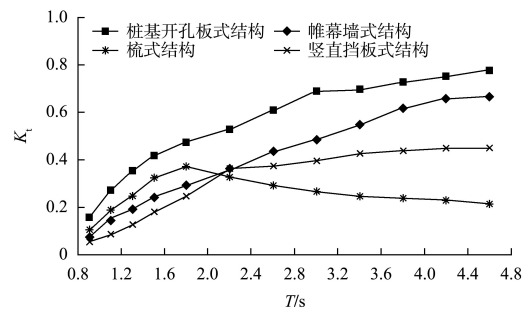
2.2 不同波浪周期作用下结构消浪性能比较

4 种不同透空堤 K_t 随 T 变化的趋势如图 8a) 所示, 经分析可知: T 变化显著影响 K_t , T 较小时 4 种防波堤的 K_t 差距不大, 随着 T 的增大, K_t 差

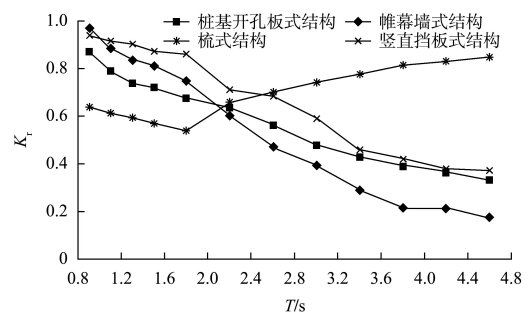
距逐渐增大。从 K_t 的变化可以看出, T 较短时, 垂直挡板式防波堤具有较好的挡浪效果; 而对于中长周期波浪, 梳式防波堤的掩护效果更好。

4 种透空式防波堤在波浪周期研究区间内的 K_t 对比见图 8b), 从图中可以看出: 随着 T 变化, 4 种透空堤结构的 K_t 均出现较为明显的变化趋势, 当 $T < 2.2$ s 时, 垂直挡板式防波堤 K_t 相对较大, 当 $T > 2.2$ s 时, 梳式防波堤的 K_t 远高于其余 3 种透空结构。从 K_t 的角度来看, 短周期波浪作用下, 垂直挡板式防波堤的挡浪效果较好; 对于中长周期波浪, 梳式防波堤展现出更为出色的防护效果。

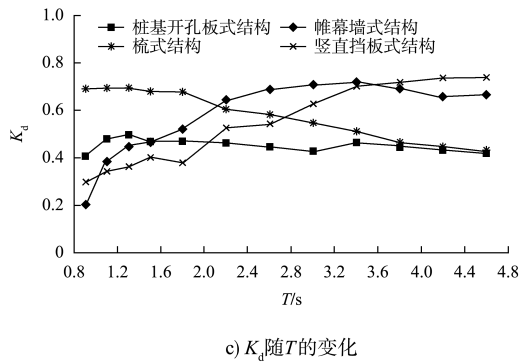
图 8c) 对 4 种透空式防波堤 K_d 随 T 变化进行比较分析, 结果表明: 针对短周期波浪情况, 梳式防波堤表现出较好的波能消耗效果, 与垂直挡板式防波堤相比, K_d 增幅为 44%~57%; 帷幕墙式防波堤对中等周期波浪具有较好的消波作用, 与开孔挡板式防波堤相比, 可增加 28%~39% 的耗散能量; 垂直挡板式防波堤对长周期波浪能实现较大的能量耗散, 相较开孔挡板式防波堤, K_d 增幅为 34%~43%。



a) K_t 随 T 的变化



b) K_d 随 T 的变化

图 8 不同透空堤消浪性能随 T 的变化

3 结论

1) 帷幕墙式防波堤对中短周期波浪的防护作用较好, 桩基开孔挡板式防波堤仅在短周期波浪作用下的挡浪效果较佳, 梳式防波堤与桩基竖直挡板式防波堤在短、中、长周期波浪作用下均表现出较好的掩护性能。

2) 由于波浪在梳式防波堤的箱体前沿和翼板的反射存在相位差, 在特定周期波浪入射时($T=1.8$ s), 叠加后的反射波将与水体产生共振, 使梳式透空堤的透射系数与反射系数出现峰(谷)值, 这一点在梳式防波堤的设计中应特别注意。

3) 由透射系数和反射系数的变化分析可知, 短周期波浪作用下, 竖直挡板式防波堤相较其余结构表现出良好的波浪防护效果。而与其余结构相比, 梳式防波堤则对中长周期波浪的防护效果更好。

4) 在能量耗散方面, 短周期波浪作用下, 梳式防波堤的消波效果显著高于其余 3 种结构, 帷幕墙式防波堤对中等周期波浪的消波特性优于其他结构, 竖直挡板式防波堤相较其他结构, 对长周期波浪能实现较大的能量耗散。

参考文献:

[1] ZANG Z P, FANG Z, ZHANG N C. Flow mechanism of impulsive wave forces and improvement on hydrodynamic performance of a comb-type breakwater [J]. Coastal engineering, 2018, 133(3): 142-158.

[2] ZHAO X L, ZHANG Y, LI M W, et al. Hydrodynamic performance of a comb-type breakwater-WEC system: An analytical study[J]. Renewable Energy, 2020, 159(10): 33-49.

[3] KRIEBEL D L. A design method for timber wave screens[M]. Annapolis: U. S. Naval Academy, 2015.

[4] SUH K D, SHIN S, COX D T. Hydrodynamic characteristics of pile-supported vertical wall breakwaters [J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2006, 132(2): 83-96.

[5] 任家崑, 韩新宇, 董胜. 防波堤帷幕尺度对波浪力和消浪性能的影响研究 [J]. 工程力学, 2023, 40 (5): 245-256.

[6] HU H H, WANG K H. Damping effect on waves propagating past a submerged horizontal plate and a vertical porous wall[J]. Journal of engineering mechanics, 2005, 131(4): 427-437.

[7] SOMERVELL L T, THAMPI S G, SHASHIKALA A P. Estimation of friction coefficient for double walled permeable vertical breakwater [J]. Ocean engineering, 2018, 156: 25-37.

[8] 范骏, 王宇楠, 杨斯汉, 等. 双挡板透空堤透浪与反射系数实验研究[J]. 海洋工程, 2011, 29(4): 60-67.

[9] CHIOUKH N, OUAZZANE K, YÜKSEL Y, et al. Meshless method for analysis of permeable breakwaters in the proximity of a vertical wall[J]. China ocean engineering, 2019, 33(2): 148-159.

[10] 刘睿. 新型桩基透空式防波堤的消浪透水性能及环境影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. 2022.

[11] JI C H, SUH K D. Wave interactions with multiple-row curtainwall-pile breakwaters [J]. Coastal engineering, 2009, 57(5): 500-512.

[12] WANG X Y, LIU Y, LU L. Numerical study of water waves interacting with open comb-type caisson breakwaters[J]. Ocean engineering, 2021, 235: 109342.

[13] NEELAMANI S, RAJENDRAN R. Wave interaction with T-type breakwaters[J]. Ocean engineering, 2002, 29(2): 151-175.

[14] 姜云鹏, 韩新宇, 吴进, 等. 中长周期波作用下的斜坡堤胸墙波浪力试验研究 [J]. 海洋工程, 2023, 41 (4): 82-90.

[15] GODA Y, SUZUKI Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments [J]. Plos One, 1976, 4(9): 73.