



鼎形浮式防波堤消浪性能研究^{*}

王玟如，李雪艳，曲恒良，谭永康，丁琰鑫，韩旭
(鲁东大学水利工程学院，山东烟台 264025)

摘要：为进一步提高矩形浮式防波堤消浪性能，设计一种鼎形浮式防波堤，基于 STAR-CCM+软件建立二维数值模型，分析3种潮位下吃水深度、弧墙高度和弧墙角度对该结构消浪性能的影响。研究结果表明：与矩形方箱浮式防波堤相比，鼎形浮式防波堤可有效提升消浪性能；该结构透射系数随着吃水深度、弧墙高度和弧墙角度的增加而减小；反射系数随着吃水深度和弧墙高度的增加而增大，弧墙角度对浮堤的反射系数影响不明显；透射系数随着相对宽度的增加总体呈下降趋势，反射系数随着相对宽度的增加总体呈上升趋势。在研究的波浪要素条件下，当结构参数设置为吃水深度0.2 m、弧墙高度0.05 m、弧墙角度54°时，透射系数、反射系数分别达到0.11、0.61，此时为最优参数设置，浮堤的消浪性能最好。

关键词：鼎形浮式防波堤；数值模拟；消浪性能；STAR-CCM+

中图分类号：U656.3

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)05-0008-07

Wave dissipation performance of tripod-shaped floating breakwater

WANG Wenru, LI Xueyan, QU Hengliang, TAN Yongkang, DING Yanxin, HAN Xu

(School of Hydraulic Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: To further improve the wave dissipation performance of rectangular floating breakwater, a tripod-shaped floating breakwater is designed. A two-dimensional numerical model is established based on STAR-CCM+ software to analyze the influence of draught depth, arc wall height and arc wall angle on the wave dissipation performance of the structure. The results show that compared with the rectangular box floating breakwater, the tripod-shaped floating breakwater can effectively improve the wave dissipation performance, and the transmission coefficient decreases with the increase of draught depth, arc wall height and arc wall angle. The reflection coefficient increases with the increase of the draught depth and the height of the arc wall, while the influence of the arc wall angle on the reflection coefficient is not obvious, the reflection coefficient increases with the increase of relative width. Under the conditions of wave elements studied, when the structural parameters are set to draught depth 0.2 m, arc wall height 0.05 m and arc wall angle 54°, the transmission coefficient and reflection coefficient reach 0.11 and 0.61 respectively, in this case, the optimal parameters are set, and the wave dissipation performance of floating breakwater is the best.

Keywords: tripod-shaped floating breakwater; numerical simulation; wave attenuation performance; STAR-CCM+

浮式防波堤可以为海岸、港口和海洋结构提供保护，抵御海浪的侵蚀。相较于传统防波堤，浮式防波堤具有更低的施工成本、更广泛的地基适应性和更强的海水交换能力^[1]。因此，浮式防

波堤受到学者们的广泛关注。

焦文翰^[2]重新设计浮式防波堤的外形，在箱体底部设置一个垂直支撑板以减小波浪的透射。唐忠时等^[3]提出一种倒π形浮式防波堤，得出当

收稿日期：2023-09-12

*基金项目：山东省自然科学基金项目（ZR2022ME145, MAETIC-2022-10）；国家重点研发计划项目（2021YFB2601100）

作者简介：王玟如（1998—），女，硕士研究生，从事波浪与海洋结构物相互作用研究。

通讯作者：曲恒良（1991—），男，博士，讲师，从事海洋可再生能源研究。E-mail: quhengliang@lDU.edu.cn

波浪周期不大于 6 s 时, 倒 π 形防波堤的消浪效果大于 50% 的结论。Fouladi 等^[4]分析垂直侧壁对 π 形浮式防波堤水动力特性的影响, 发现由于驻波的产生和共振现象的出现, 侧壁的存在通常会导致防波堤产生更显著的运动响应。Liu 等^[5]应用 SPH 方法模拟一种带翼的八板箱式浮式防波堤结构, 结果表明在低频波浪条件下, 波浪在浮式结构的背浪向一侧分解, 凸出板部分可以有效地减少高频波的波能量。葛江涛等^[6]发现弧形布置的浮式防波堤具有良好的抗横浪和抗斜浪能力, 其稳定性和水动力性能优于其他类型的防波堤。Zhang 等^[7]比较了方形底、三角形底(带和不带挡板)和伯克利楔形等 4 种形状的浮子性能, 发现三角形挡板底浮子是一种理想的消浪结构, 波能最大转换效率高达 93%, 可有效消减波能。Neelamani 等^[8]试验研究了带裙墙浮式防波堤的水动力性能, 结果表明增加裙墙可以减少波浪传输。Ji 等^[9]受幕墙式结构挡浪的启发, 设计一种集成波浪能装置的垂直桩约束反 L 形的浮式防波堤, 结果表明该防波堤的波能转换效率可以达到 40% 以上, 透射系数小于 0.35。Christensen 等^[10]研究 3 种基本横截面浮式防波堤的阻尼机制, 其横截面分别为常规浮桥、带翼板的常规浮桥、带翼板和多孔介质的常规浮桥, 结果表明带翼板防波堤的运动幅度减小最大, 而带翼板和多孔介质的防波堤最能有效减小波浪的反射和透射。

前人研究表明浮堤形状对其消浪性能有较大影响, 而大部分研究针对垂直幕墙。本文提出一种鼎形浮式防波堤, 对其在各潮位下的消浪性能进行研究。

1 数值模型建立

1.1 CFD 数值计算方法

应用 STAR-CCM+ 软件建立二维数值水槽, 由于 STAR-CCM+ 软件不能直接模拟纯二维模型, 因此模型的纵向宽度设为 0.01 m。水槽长为 $6L$ (L 为入射波长), 高为 $2h$ (h 为水深), 左右两端分别设置长为 $1.5L$ 的造波段和消波段, 左右两端

的消波方式均设置为力消波^[11], 该模型使用层流造波。将只做垂荡运动的结构物放置于水槽中心, 以静水面 $z=0$ 作为垂直坐标面。根据两点法^[12], 在结构物左、右两侧布置浪高仪以监测波面历时曲线变化, 如图 1 所示。

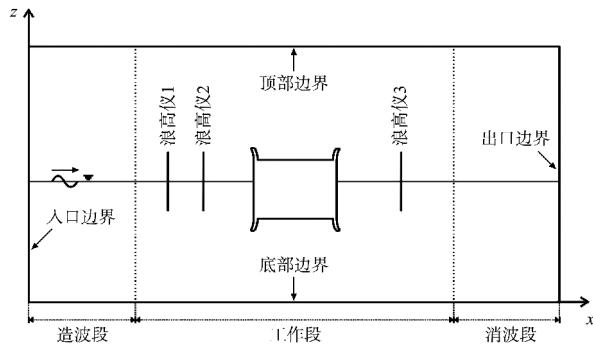


图 1 二维数值水槽

假定流体为不可压缩的均匀流体, 数值水槽采用的控制方程为连续方程和动量方程^[13]。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度, t 为时间, \mathbf{u} 为速度矢量。

动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\tau_{i,j}$ ($i, j = x, y, z$) 为作用在控制体上的由分子黏性作用而产生的黏性应力分量; τ_{xx} 、 τ_{yy} 和 τ_{zz} 为垂直作用在控制体上的法向黏性应力分量; F_x 、 F_y 和 F_z 为控制体上的力在直角坐标系中沿 x 、 y 、 z 方向上的分量。 u 、 v 和 w 分别为流体速度沿 x 、 y 、 z 方向上的速度分量。

1.2 边界条件设置

将入口与出口边界定义为速度入口。速度入口设为五阶 VOF 波的速度, 2 种工作流体为水和

空气。顶部边界定义为五阶 VOF 波静压，此边界工作的流体为空气；底部边界定义为壁面；前后两面边界定义为对称平面。

1.3 结构模型设计

为找到鼎形浮式防波堤的最优参数设置，在保证浮堤箱体参数不变的前提下，分析中潮差下不同吃水深度 d 、弧墙高度 $h_{\text{弧}}$ 以及弧墙角度 θ 对鼎形浮式防波堤的透射系数 K_t 和反射系数 K_r 的影响。结构模型见图 2，试验工况见表 1。

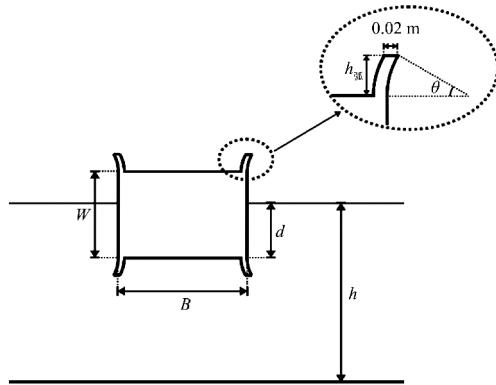


图 2 结构尺寸

表 1 试验工况设计

水深 h/m	水平宽度 B/m	周期 T/s	竖直高度 W/m	入射波高 H_i/m	模型吃水 d/m	弧墙高度 $h_{\text{弧}}/\text{m}$	弧墙角度 $\theta/(\text{°})$
0.45, 0.50, 0.55	0.4	1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0	0.3	0.1	0.15, 0.17, 0.20	0, 0.03, 0.05	0, 27, 54

1.4 网格划分

对数值水槽进行 4 部分网格划分，分别为液面加密区、液面过渡区、重叠网格区和运动加密区，如图 3 所示。液面加密区高度为 $2H_i$ ，液面过渡区高度为 $4H_i$ 。网格由自动网格切割体的网格单元生成器生成^[14]，棱柱层选为 10 层^[15]，目的是使其围绕在结构物表面，能够更好地捕捉鼎形浮式防波堤表面周围的流体变化，提高求解精度。

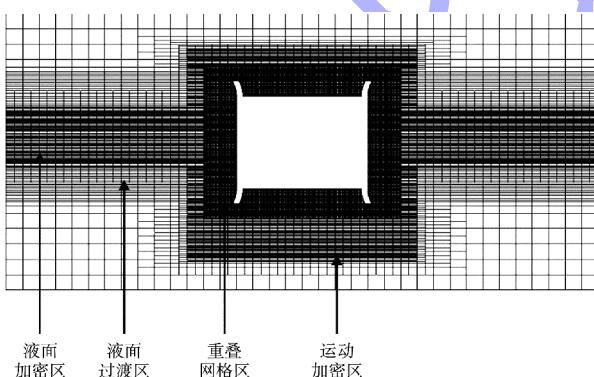


图 3 网格划分

2 数值模型验证

2.1 网格收敛性

在空水槽中心处放入做垂荡运动的浮式方箱进行网格收敛性研究。 $W=0.4 \text{ m}$, $d=0.2 \text{ m}$, $h=0.5 \text{ m}$, $H_i=0.1 \text{ m}$, $T=1.6 \text{ s}$ 。网格尺寸参数见表 2，图 4 比较了浮式方箱在不同网格尺寸下的垂荡运动。由图可知，模型 A 与模型 B 波谷值相差 15.01%，

与模型 C 波谷值相差 17.73%，模型 B 与模型 C 吻合较好。由于模型 C 的网格数多，为节约计算资源，选择模型 B 的网格尺寸。

表 2 网格尺寸参数

模型	液面过渡区	液面加密区 运动加密区	重叠网格区
A	$\Delta z=0.10$ $\Delta x=0.02$	$\Delta z=0.05$ $\Delta x=0.01$	$\Delta z=\Delta x=0.0100$
B	$\Delta z=0.05$ $\Delta x=0.01$	$\Delta z=0.025$ $\Delta x=0.005$	$\Delta z=\Delta x=0.0050$
C	$\Delta z=0.025$ $\Delta x=0.005$	$\Delta z=0.0125$ $\Delta x=0.0025$	$\Delta z=\Delta x=0.0025$

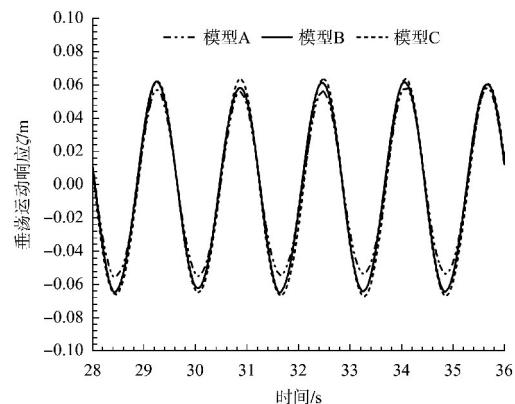


图 4 浮式方箱在不同网格尺寸下的垂荡运动

2.2 准确性

为验证模型的准确性，本文对赵玄烈^[16]试验中的方箱模型、Zhang 的方形底浮子模型进行模拟验证。由图 5 可以看出，当相对宽度 $B/L < 0.22$ 时，

K_t 与物理模拟试验结果最大相对误差为 1.12%, 与数值模拟试验结果最大相对误差为 1.62%; 当 $B/L=0.28$ 时, K_t 与物理模拟试验结果最大相对误差为 17.9%, 与数值模拟试验结果最大相对误差为 14.72%。CFD 结果在赵玄烈的物理模拟与数值模拟试验结果之间, 吻合较好。如图 6 所示, K_r 与 Zhang 试验结果的最大相对误差小于 7.45%, 差异较小, 说明 CFD 模型满足精度要求。

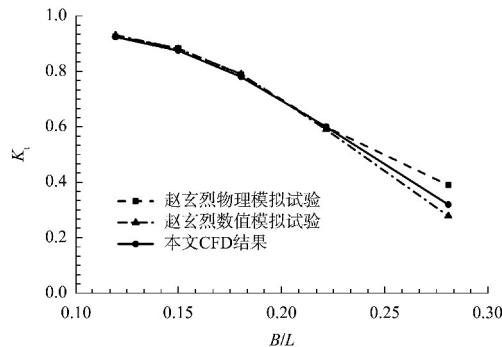


图 5 CFD 数值结果与赵玄烈的透射系数试验结果对比

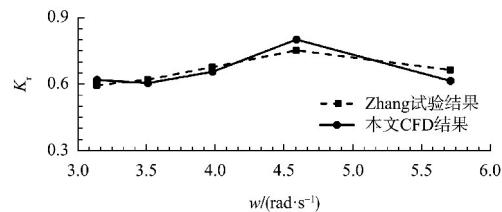
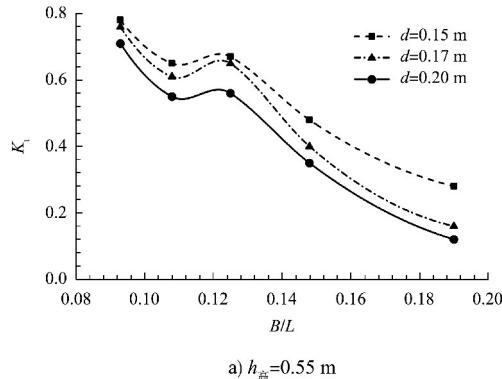


图 6 CFD 数值结果与 Zhang 的反射系数试验结果对比

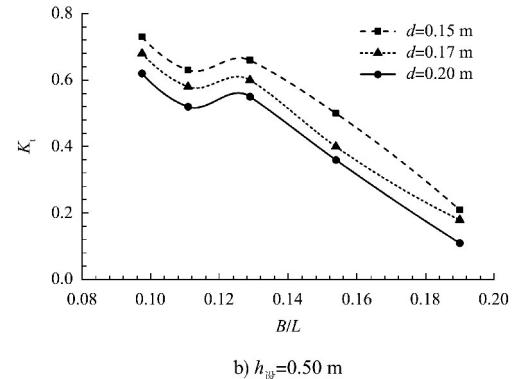
3 结果分析与讨论

3.1 吃水深度对消浪性能的影响

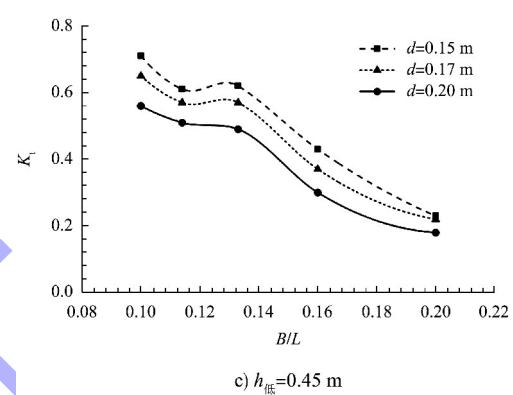
选取模型 $\theta=54^\circ$, $h_{\text{弧}}=0.05 \text{ m}$ 。图 7、8 表示在高潮位 $h_{\text{高}}$ 、设计潮位 $h_{\text{设}}$ 、低潮位 $h_{\text{低}}$ 3 种潮位下, 不同吃水深度对鼎型浮式防波堤 K_t 和 K_r 的影响。



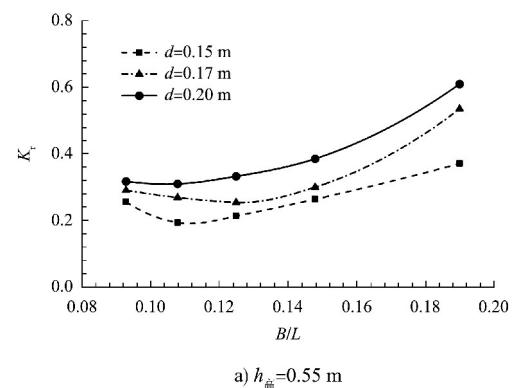
a) $h_{\text{高}}=0.55 \text{ m}$



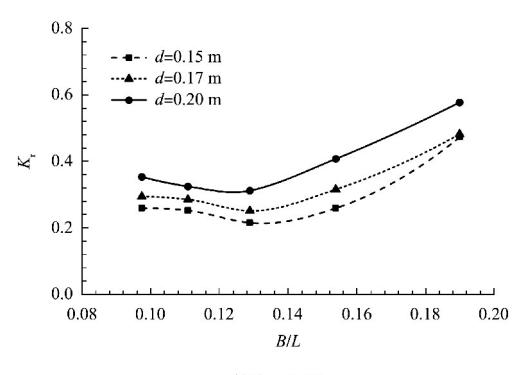
b) $h_{\text{设}}=0.50 \text{ m}$



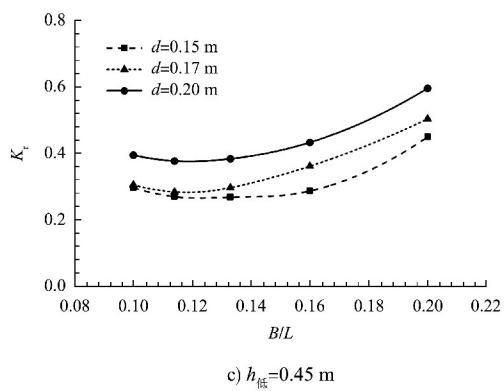
c) $h_{\text{低}}=0.45 \text{ m}$



a) $h_{\text{高}}=0.55 \text{ m}$



b) $h_{\text{设}}=0.50 \text{ m}$

图 8 鼎形浮式防波堤 K_r 随 d 的变化

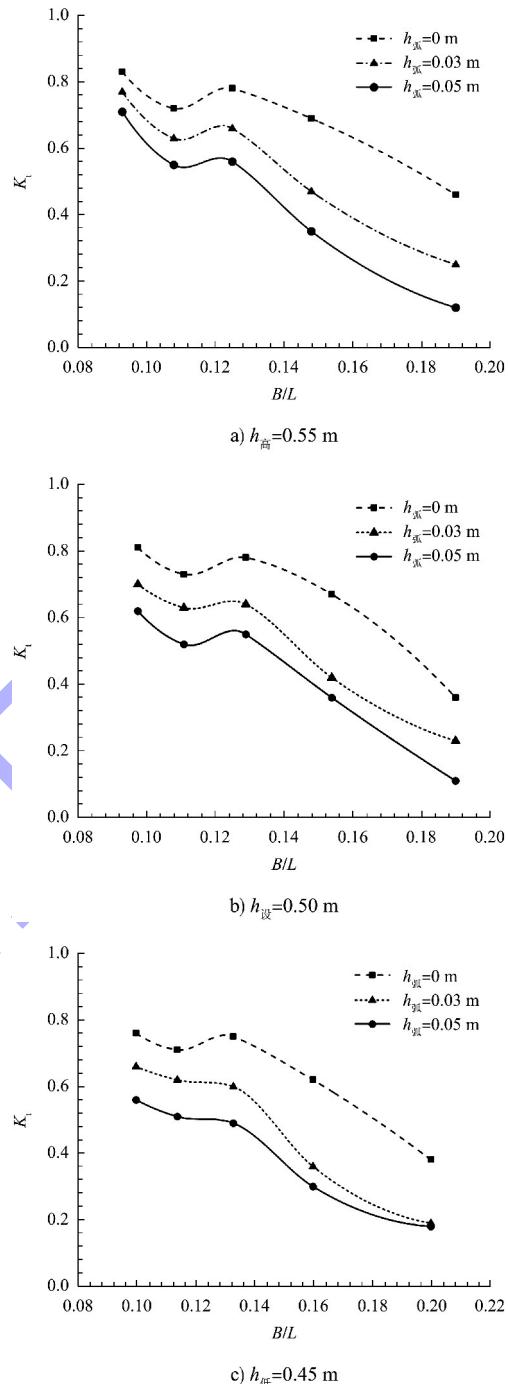
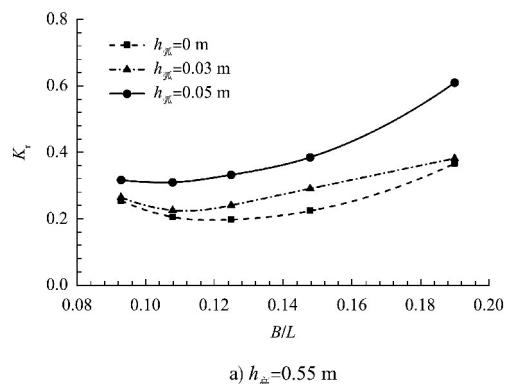
如图 7 所示，在高潮位、设计潮位、低潮位 3 种潮位下， K_t 均呈现出相同的变化趋势。在相同吃水深度时， K_t 均随着 B/L 的增加先减小后增大再减小，总体呈下降趋势；当 B/L 相同时， K_t 随着 d 的增加而减小。

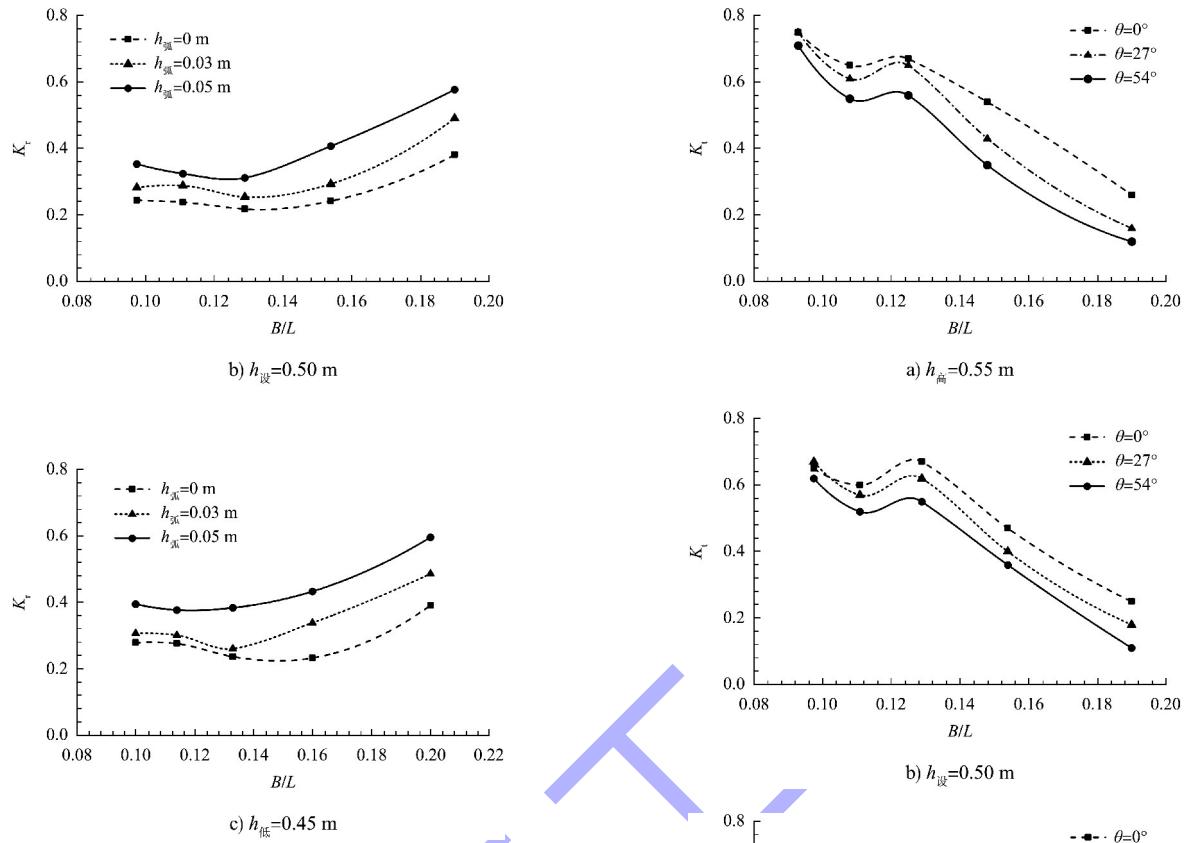
如图 8 所示，在相同吃水深度时， K_r 均随着 B/L 的增加先减小后增大，总体呈上升趋势；当 B/L 相同时， K_r 随着 d 的增加而增大。原因是吃水深度越大，结构的有效挡水面积就越大，透过的波浪就越少，反射的波浪就越多，从而 K_r 越小， K_t 越大。

3.2 弧墙高度对消浪性能的影响

由 3.1 节结论可知，吃水深度为 0.2 m 的消浪性能较好，故选取模型 $\theta = 54^\circ$, $d = 0.2 \text{ m}$ 。图 9、10 分别表示在高潮位、设计潮位、低潮位 3 种潮位下，不同弧墙高度对鼎形浮式防波堤的 K_t 和 K_r 的影响。

如图所示，在高潮位、设计潮位、低潮位 3 种潮位下， K_t 、 K_r 均呈现出相同的变化。在相同弧墙高度时， K_t 随着 B/L 的增加先减小后增大再减小，总体呈下降趋势；当 B/L 相同时， K_t 随着 $h_{\text{弧}}$ 的增加而减小。在相同弧墙高度时， K_r 随着 B/L 的增加而增大，总体呈上升趋势；当 B/L 相同时， K_r 随着 $h_{\text{弧}}$ 的增加而增大。所以弧墙高度增加可以提高防波堤的消浪性能。在各潮位下，浮堤弧墙高度为 0.05 m 时，具有较好的消浪性能。

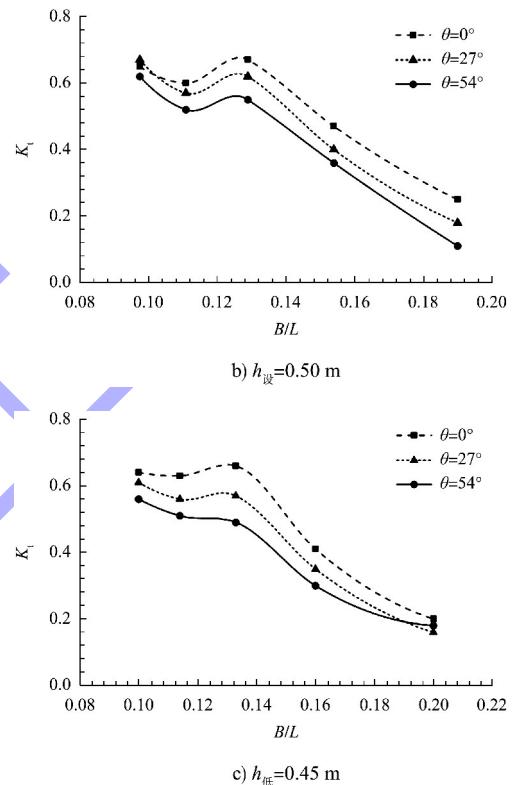
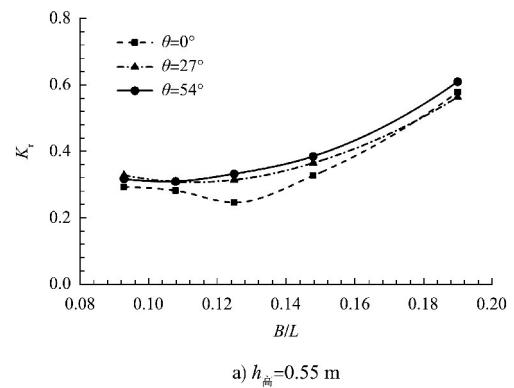
图 9 鼎形浮式防波堤 K_t 随 $h_{\text{弧}}$ 的变化a) $h_{\text{高}} = 0.55 \text{ m}$

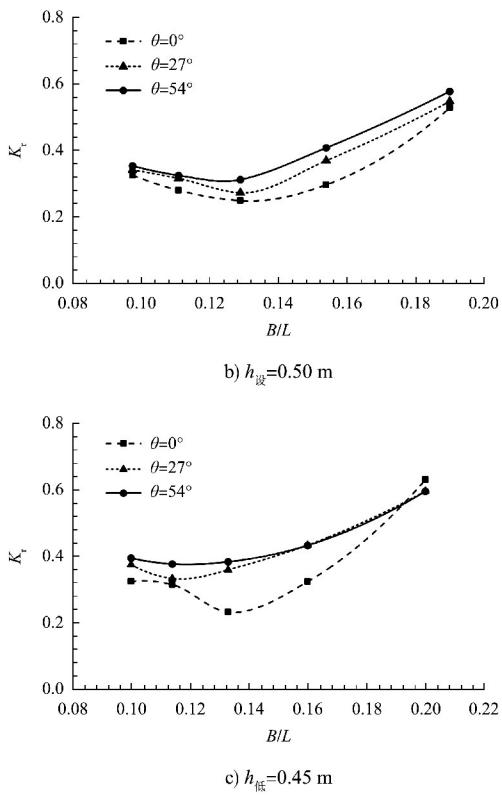
图 10 鼎形浮式防波堤 K_r 随 $h_{\text{底}}$ 的变化

3.3 弧墙角度对消浪性能的影响

由前述分析可知, 吃水深度 0.2 m, 弧墙高度 0.05 m 的消浪性能较好, 故选取模型 $d = 0.2$ m, $h_{\text{底}} = 0.05$ m。图 11、12 表示在高潮位、设计潮位、低潮位 3 种潮位下, 不同弧墙角度对鼎型浮式防波堤 K_t 和 K_r 的影响。

如图 11 所示, 在 3 种潮位下, K_t 在相同弧墙角度时随着 B/L 的增加先减小后增大再减小, 总体呈下降趋势; 当 B/L 相同时, K_t 随着 θ 的增加而减小。图 12 表示 K_r 在相同 θ 时随着 B/L 的增加而增大, 总体呈下降趋势; 当 B/L 相同时, 弧墙有角度弯曲比垂直弧墙的 K_r 大, 在弧墙有角度情况下, 角度倾斜度数的大小对 K_r 的影响并不明显。

图 11 鼎形浮式防波堤 K_t 随 θ 的变化

图 12 鼎形浮式防波堤 K_r 随 θ 的变化

4 结论

1) 浮堤对潮位适应性较高，在低潮位、设计潮位、高潮位下均能达到较好的消浪性能。

2) 当相对宽度相同时，弧墙高度和吃水深度对浮堤的消浪性能有明显影响。透射系数随着吃水深度的增加而减小，随着弧墙高度的增加而减小，随着弧墙角度的增加而减小；反射系数随着吃水深度的增加而增大，随着弧墙高度的增加而增大。弧墙角度对浮堤的反射系数影响不明显。当 $h_{\text{弧}}=0.05 \text{ m}$ 、 $d=0.20 \text{ m}$ 、 $\theta=54^\circ$ 时，浮堤的消浪性能最好。

3) 在 3 种潮位下，随着相对宽度的增加，透射系数总体呈下降趋势，反射系数呈上升趋势。

参考文献：

- [1] 何超勇, 王登婷, 冯卫兵. 矩形方箱浮式防波堤消浪性能研究[J]. 水运工程, 2014(1): 14-18.
- [2] 焦文翰. 带腹板浮式防波堤水动力特性数值研究[D]. 海口: 海南大学, 2021.
- [3] 唐忠时, 吴维武, 赵书恒, 等. 一种倒 π 型浮式防波堤消浪特性研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2023, 38(1): 52-58.
- [4] FOULADI M Q, BAHMANPOURI F, REZAZADEH S, et al. Investigating the sidewall's effects on π -shaped floating breakwaters interacting with water waves by the scaled boundary FEM [J]. Ocean engineering, 2023, 284: 115200.
- [5] 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: 1-20.
- [6] 葛江涛, 鲁春艳, 郭建廷, 等. 弧型布置的浮式防波堤水动力响应分析[J]. 船舶工程, 2021, 43(9): 152-157.
- [7] ZHANG H M, ZHOU B Z, VOGEL C, et al. Hydrodynamic performance of a floating breakwater as an oscillating-buoy type wave energy converter [J]. Applied energy, 2020, 257: 113996.
- [8] NEELAMANI S, LJUBIC J. Experimental study on the hydrodynamic performance of floating pontoon type breakwater with skirt walls [J]. Journal of offshore mechanics and arctic engineering, 2018, 140(2): 021303.
- [9] JI Q L, XU C H, JIAO C S. Numerical investigation on the hydrodynamic performance of a vertical pile-restrained reversed L type floating breakwater integrated with WEC[J]. Ocean engineering, 2021, 238: 109635. 1-109635. 22.
- [10] CHRISTENSEN E D, BINGHAM H B, FRIIS A P S, et al. An experimental and numerical study of floating breakwaters[J]. Coastal engineering, 2018, 137(7): 43-58.
- [11] 张恒铭, 胡俭俭, 周斌珍, 等. 波能装置与浮式防波堤集成系统的水动力性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(8): 1117-1122.
- [12] NALLAYARASU S, FATT C H, SHANKAR N J. Estimation of incident and reflected waves in regular wave experiments[J]. Ocean engineering, 1995, 22(1): 77-86.
- [13] 耿敬, 朱睿, 李明伟, 等. U 型振荡水柱波能装置气室内外波高影响因素[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(1): 31-36, 51.
- [14] 张恒铭. 波能装置与浮式防波堤集成系统的水动力特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [15] 端臣, 李雪艳, 程志, 等. 不同地形下单浮子集成装置水动力性能研究[J]. 海洋科学, 2022, 46(3): 48-59.
- [16] 赵玄烈. 浮式防波堤-波浪能装置集成系统的水动力特性和能量输出特性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.

(本文编辑 王传瑜)