

· 综 合 ·



弧墙-浮式防波堤水动力性能数值模拟*

李金珂, 李雪艳, 曲恒良, 杨沫遥, 陈澜铠, 谭永康

(鲁东大学 水利工程学院, 山东省海上航天装备技术创新中心, 山东 烟台 264025)

摘要: 为提升浮式防波堤的消波性能, 提出一种弧墙-浮式防波堤, 基于不可压缩性流体理论和VOF方法, 使用计算流体力学软件Star-ccm+建立二维数值模型, 并验证数值模型的准确性。应用该数值模型对弧墙-浮式防波堤在不同水平宽度、相对高度及相对波高等条件下的水动力性能进行模拟研究, 总结各参数对防波堤透射系数、反射系数及运动响应的影响规律, 识别消波性能最优的防波堤结构参数。结果表明, 透射系数随水平宽度的增大而增大, 周期小于1.4 s时透射系数能稳定维持在0.6以下; 反射系数在周期1.6 s或1.8 s时会有一定程度的减小; 运动响应随水平宽度和相对高度的增大而增大。

关键词: 浮式防波堤; 水动力性能; 二维数值波浪水槽

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0001-07

Numerical simulation of hydrodynamic performance of arc-wall-floating breakwater

LI Jinke, LI Xueyan, QU Hengliang, YANG Moyao, CHEN Lankai, TAN Yongkang

(School of Hydraulic Engineering of Ludong University,

Shandong Marine Aerospace Equipment Technology Innovation Center, Yantai 264025, China)

Abstract: To improve the wave attenuation performance of floating breakwaters, an arc-wall-floating breakwater is proposed. Based on the theory of incompressible fluids and VOF method, a two-dimensional numerical model is established by using the computational fluid mechanics software Star-ccm+, and the accuracy of the numerical model is verified. The numerical model is used to simulate and study the hydrodynamic properties of arc-wall-floating breakwaters under different horizontal widths, relative heights and relative wave heights. The influence of various parameters on the transmission coefficient, reflection coefficient and motion response of the breakwater is concluded, and the structural parameters of the breakwater with the best wave attenuation performance are identified. The results show that the transmission coefficient increases with the increase of the horizontal width, and the transmission coefficient can be stably maintained below 0.6 when the period is less than 1.4 s. The reflection coefficient decreases to a certain extent when the period is 1.6 s or 1.8 s. The motion response increases with the increase of horizontal widths and relative heights.

Keywords: floating breakwater; hydrodynamic performance; two-dimensional numerical wave tank

随着海洋开发逐渐向深海延伸, 防波堤在深海海域得到应用。传统底部固定式防波堤的成本随着水深的增大而逐渐增高, 浮式防波堤的建造

成本几乎不受水深和海底条件的影响, 在海岸及海洋工程中具有广泛的应用前景^[1]。

矩形箱式防波堤结构简单, 主要通过反射入

收稿日期: 2022-12-11

***基金项目:** 山东省自然科学基金面上项目(ZR202110280004); 山东省海上航天装备技术创新中心(鲁东大学)开放课题基金(MAETIC2021B)

作者简介: 李金珂(1998—), 男, 硕士研究生, 从事波浪与结构物相互作用研究。

通讯作者: 李雪艳(1982—), 女, 博士, 副教授, 从事波浪与结构物相互作用研究。E-mail: yanzi03@126.com

射波来衰减波浪^[2]；Abul-Azm 等^[3]研究发现浮式防波堤的反射效果与结构横截面的相对尺寸有很大的关系。Ning 等^[4]通过物理模型实验对方箱形浮式防波堤性能开展研究，结果表明浮式防波堤的吃水深度及波长对水动力性能有着重要影响；Deng 等^[5]基于线性水波理论，采用匹配特征函数展开法对 T 形浮式防波堤水动力性能进行了半解析研究，结果表明垂直部分加深了结构整体浸没深度，能有效降低波浪能量；Nikpour 等^[6]对梯形浮筒式防波堤在规则波中衰减运动进行研究，结果表明与矩形浮式防波堤相比，梯形浮式防波堤具有更好的消波性能；Zhang 等^[7]在倒 π 形浮式防波堤基础上设计了 L 形浮式防波堤，并利用数值模拟和物理模型实验结果进行对比，结果表明在相同板长情况下 L 形浮式防波堤综合性能优于倒 π 形浮式防波堤；陈城等^[8]提出了一种翼板浮式防波堤，研究表明在较长周期的波浪中，翼板浮式防波堤具有更好的消波能力；Liu^[9]等提出一种带翼箱式浮式防波堤，其消波性能优于矩形浮式防波堤；郑艳娜等^[10]对不规则波作用下方箱浮式防波堤受力特性进行数值模拟，结果表明方箱垂直向受力大于横向受力；侯勇等^[11]通过物理实验研究发现，矩形浮式防波透射系数随相对吃水（吃水/水深）的增加而减小；Sannasiraj 等^[12]通过试验研究浮箱式防波堤在 3 种不同系泊方式下的消浪性能，发现系泊系统对浮式防波堤透射系数的影响不大。

上述研究表明，浮式防波堤的形状是影响其消浪性能的重要因素，本文提出一种弧墙-浮式防波堤，并采用数值模拟方法对该结构在垂荡运动下的水动力特性开展研究。基于不可压缩性流体理论和流体体积法 (volume of fluid, VOF)^[13]，应用 CFD 软件 Star-ccm+ 建立二维数值波浪水槽模型，捕捉空气与水的界面；并采用重叠网格方法^[14]模拟浮式防波堤垂荡运动响应，研究弧墙-浮式防波堤在不同水平宽度、相对波高及相对半径等条件下，透射系数、反射系数及垂荡运动响应的变化规律。

1 结构性能相关参数

防波堤的透射系数 K_t 与反射系数 K_r 分别定义为：

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (1)$$

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (2)$$

式中： H_t 为透射波高； H_i 为入射波高； H_r 为反射波高，由 Goda 两点法^[15]得到。

防波堤的垂荡运动响应 ζ 定义为垂荡响应幅值算子 H_{RAO} 与入射波高 H_i 的比值：

$$\zeta = \frac{H_{RAO}}{H_i} \quad (3)$$

其中 H_{RAO} 通过 CFD 软件 Star-ccm+ 中的六自由度平移部分进行监测。

2 数值模型构建

2.1 网格独立性验证

为探究网格疏密程度对数值模拟计算的影响，设置了 3 种网格尺寸模型，模型各区域网格 x 、 z 方向的尺寸及网格数如表 1 所示。模型的水槽计算域长度 $l=18$ m，水深 $h=1$ m，入射波高 $H=0.2$ m，波浪周期 $T=1.4$ s。3 种数值水槽模型中均未设置防波堤结构，通过对比模型中的波面高度 η 分析网格尺寸影响。

表 1 不同网格尺寸参数设置

模型	区域	$\Delta x/\text{m}$	$\Delta z/\text{m}$	网格数
1	液面区域 1	0.040	0.020	78 040
	液面区域 2	0.080	0.040	
	运动区域	0.040	0.020	
	重叠网格区域	0.020	0.020	
2	液面区域 1	0.020	0.010	286 556
	液面区域 2	0.040	0.020	
	运动区域	0.020	0.010	
	重叠网格区域	0.010	0.010	
3	液面区域 1	0.010	0.005	1 090 256
	液面区域 2	0.020	0.010	
	运动区域	0.010	0.005	
	重叠网格区域	0.005	0.005	

图1为3个模型中心处波面高度 η 的历时曲线对比, 由图可知, 3个模型的模拟结果几乎相同, 只有在波峰和波谷处有细微的差别。模型1的波面高度在波谷大于其余2个模型, 模型3的波面高度在波峰处略小于其余2个模型。因此, 模型2、3的网格尺寸均已达到足够的计算精度, 可以用于不同工况下的数值计算。为了节省计算资源, 选用模型2中的网格尺寸进行研究。

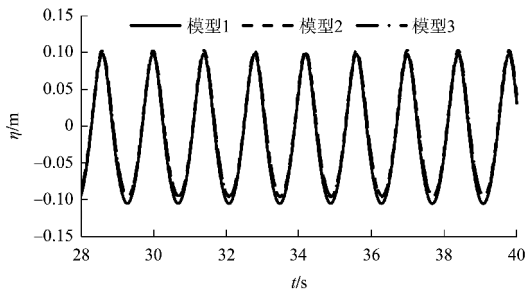
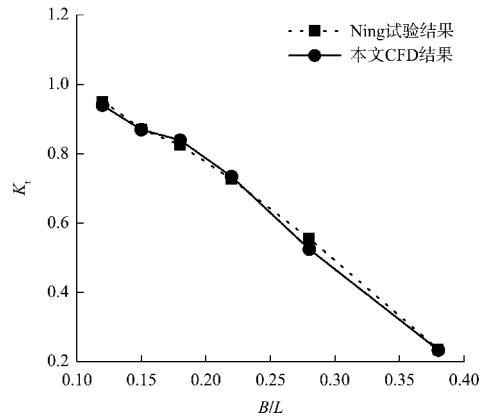


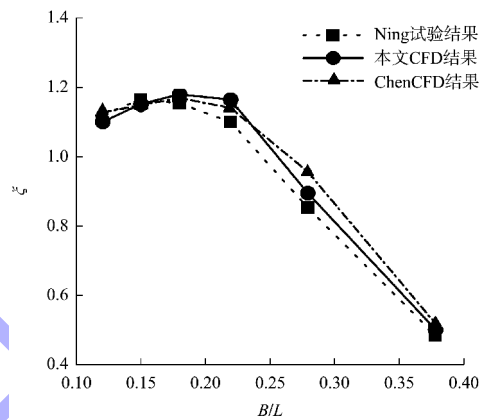
图1 模型中心处波面高度的历时曲线

2.2 数值模型验证

应用数值模型对 Ning 等论文中的方箱物理模型实验进行模拟, 并与该论文试验结果及 Chen 等^[16]论文中的数值模拟结果进行对比(图2), 验证所建数值模型的准确性。可以看出, K_t 与 Ning 的物理模型实验基本吻合; ζ 整体趋势相同, 本文和 Chen 的数值模拟结果均比 Ning 的实验结果略大, 可能是因为实验装置与浮体间存在摩擦引起的阻尼力所导致。综上所述, 本文数值模型可以用做弧墙-浮式防波堤水动力性能研究。



a) K_t-B/L



b) $\zeta-B/L$

注: B 为竖直高度; L 为入射波波长。

图2 数值模型计算及试验结果对比

2.3 数值水槽

如图3所示, 在二维数值水槽的中心处放置弧墙-浮式防波堤, 在波浪传播方向上依次设置3个波浪监测点, 2[#]、3[#]波浪监测点与模型之间的距离均为2.0 m, 1[#]和2[#]波高监测点之间的距离为0.5 m。

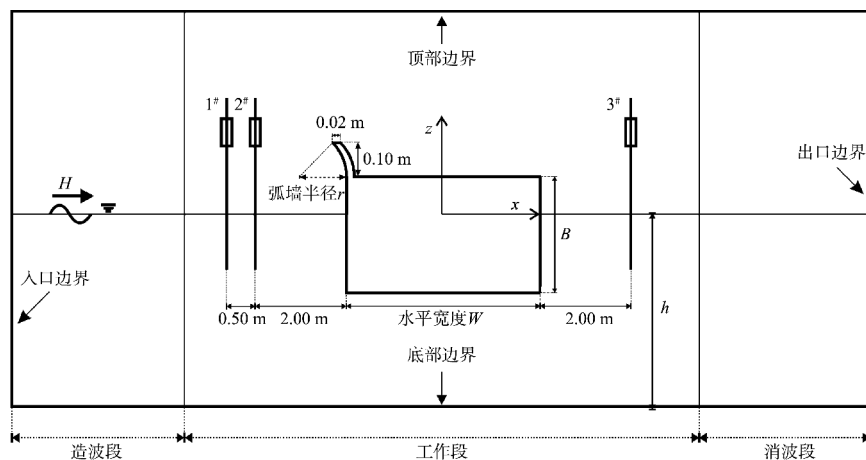


图3 二维数值水槽

数值波浪水槽分为 3 个区段, 分别为造波段、工作段和消波段。水槽计算域总长为 6λ (λ 为入射波长), 造波段和消波段分别为 1.5λ , 由于有限长度的数值波浪水槽会在尾部壁面产生反射波, 在设置有结构物的数值波浪水槽中, 结构物产生的反射波在前端壁面形成二次反射, 所以造波段和消波段中的入口边界和出口边界应采用力消波法进行消波。

采用速度边界法造波, 入口边界条件和出口边界条件设置为速度入口, 入射波采用五阶 Stokes 波^[17], 顶部边界条件设置为压力出口, 底部边界条件设置为壁面。由于 Star-ccm+ 软件在二维平面下无法造波, 需要在 y 方向上设置一个宽度为 0.01 m 的单层网格, 前后壁面边界条件设置为对称平面, 该数值水槽可视为二维数值水槽。

2.4 网格划分

网格划分如图 4 所示, 在自由液面附近, 波浪运动最强烈, 流动较复杂, 需要进行网格加密, 离液面越远, 网格尺寸越大。在自由液面处设置 2 个网格加密区域, 分别为液面区域 1、2, 液面区域 1 高度为 $1.5H$, 液面区域 2 高度为 $3H$ 。为捕

捉浮式防波堤的运动过程, 将浮式防波堤作为刚体, 采用重叠网格法进行模拟, 重叠网格区域随浮式防波堤同步运动, 对运动区域设置加密区域, 网格尺寸大小和液面区域 1 相同。上述区域网格使用切割体网格单元生成器生成。为更好地捕捉物面周围的流体变化, 使用棱柱层网格生成器在结构表面生成棱柱层, 设置为 10 层。

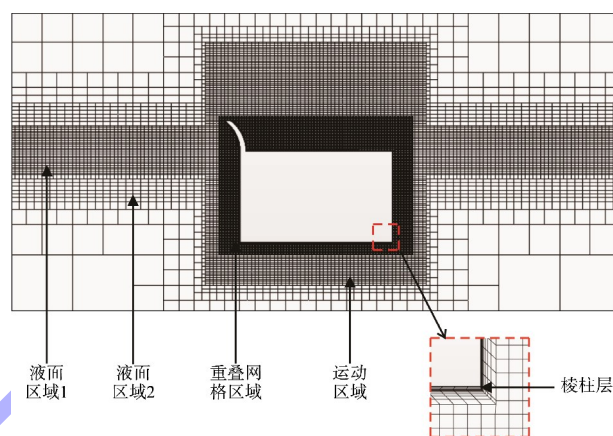


图 4 数值波浪水槽网格生成

3 水动力特性分析

3.1 试验参数

试验参数设置见表 2。

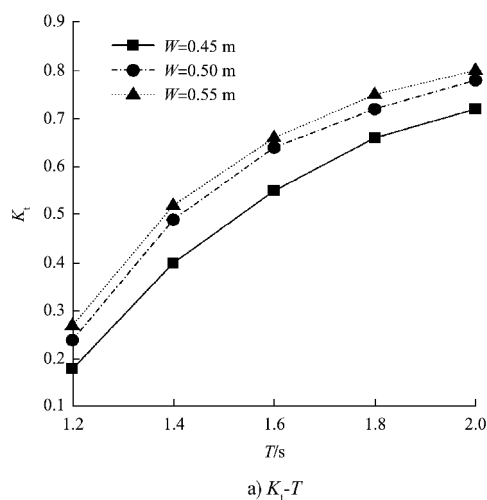
表 2 试验参数设置

水深 h/m	周期 T/s	水平宽度 W/m	竖直高度 B/m	相对高度 H/B	入射波高 H/m	相对波高 H/h	弧墙半径 r/m	相对半径 r/H
0.5	1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0	0.45, 0.50, 0.55	0.22, 0.26, 0.30	0.91, 0.77, 0.67	0.06, 0.10	0.12, 0.20	0.125, 0.150	0.625, 0.750

3.2 水平宽度

图 5 为不同水平宽度 W 下, 弧墙-浮式防波堤 K_t 、 K_r 及 ζ 随 T 的变化, 分析可知, 给定水深和周期条件下, 透射系数均随水平宽度增加而增加, 但增加幅度略有减小; 反射系数均随水平宽度增加而减小; 运动响应均随水平宽度增加而减小, 这是因为水平宽度的减小导致弧墙-浮式防波堤的质量和附加质量减小, 水平宽度越小防波堤运动的幅值就越大。给定水平宽度下, 透射系数随周期增加而单调增加; 反射系数在周期 1.2 s 时较为接近, 在周期 1.6 s 或 1.8 s 时反射系数会有一定程度的降低; 而运动响应随周期增加先增大后减小。本试验研究参数范围内, 透射系数范围

处于 0.180 ~ 0.840; 反射系数范围处于 0.060 ~ 0.406; 运动响应范围处于 0.68 ~ 1.32。



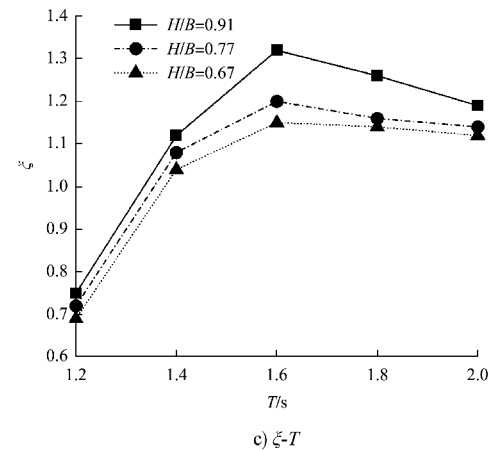
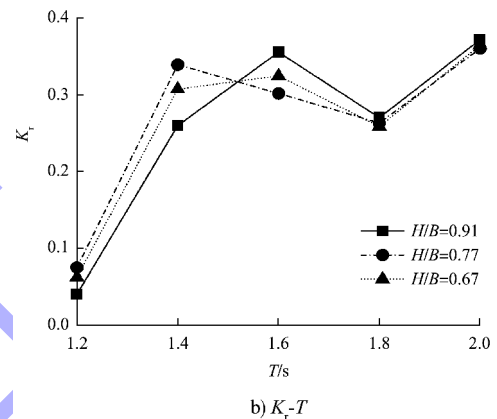
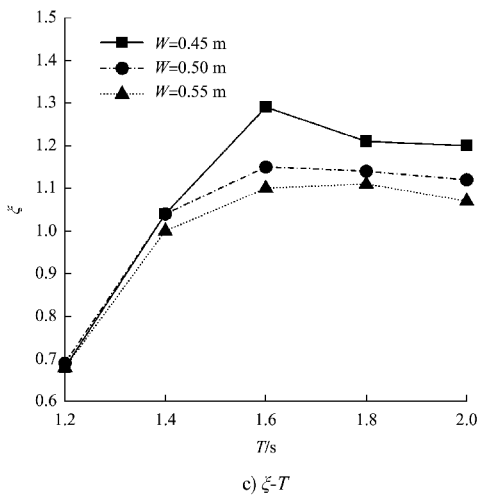
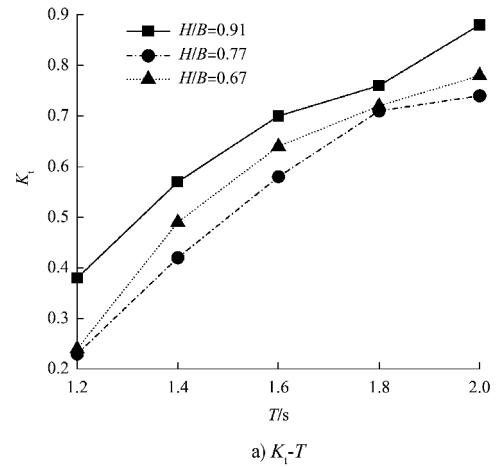
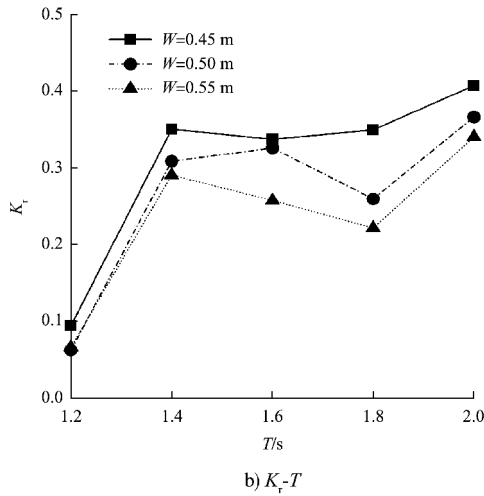


图5 不同水平宽度下各参数周期变化

3.3 相对高度

图6为不同相对高度 H/B 下, 弧墙-浮式防波堤 K_t 、 K_r 及 ζ 随 T 的变化, 分析可知, 给定水深和周期条件下, 相对高度0.77时的透射系数最小; 反射系数在周期1.2 s和1.8 s时较为接近, 在周期1.4 s或1.6 s时反射系数会达到一个最大值, 且在周期1.8 s时反射系数会有一定程度的降低; 运动响应均随相对高度增加而增加, 这是因为相对高度的增大导致弧墙-浮式防波堤的质量和附加质量减小, 相对高度越大防波堤运动的幅值就越大。给定相对高度条件下, 透射系数随周期增加而单调增加; 运动响应随周期增加而先增大后减小。在本试验研究参数范围内, 透射系数范围处于0.230~0.910; 反射系数范围处于0.040~0.372; 运动响应范围处于0.68~1.32。

图6 不同相对高度下各参数周期变化

3.4 相对波高

图7为不同相对波高 H/h 下, 弧墙-浮式防波堤 K_t 、 K_r 及 ζ 随 T 的变化, 分析可知, 给定水深和周期条件下, 透射系数均随相对波高的增加而减小; 当周期大于1.2 s时反射系数随相对波高的增加而增加, 且反射系数在周期1.4 s时较为接近; 运动响应均随相对波高的增加而单调减小。给定相对波高条件下, 透射系数随周期增加而单

调增加；运动响应随周期增加而先增加后减小。在本试验研究参数范围内，透射系数范围处于 0.240~0.866；反射系数范围处于 0.060~0.365；运动响应范围处于 0.69~1.41。

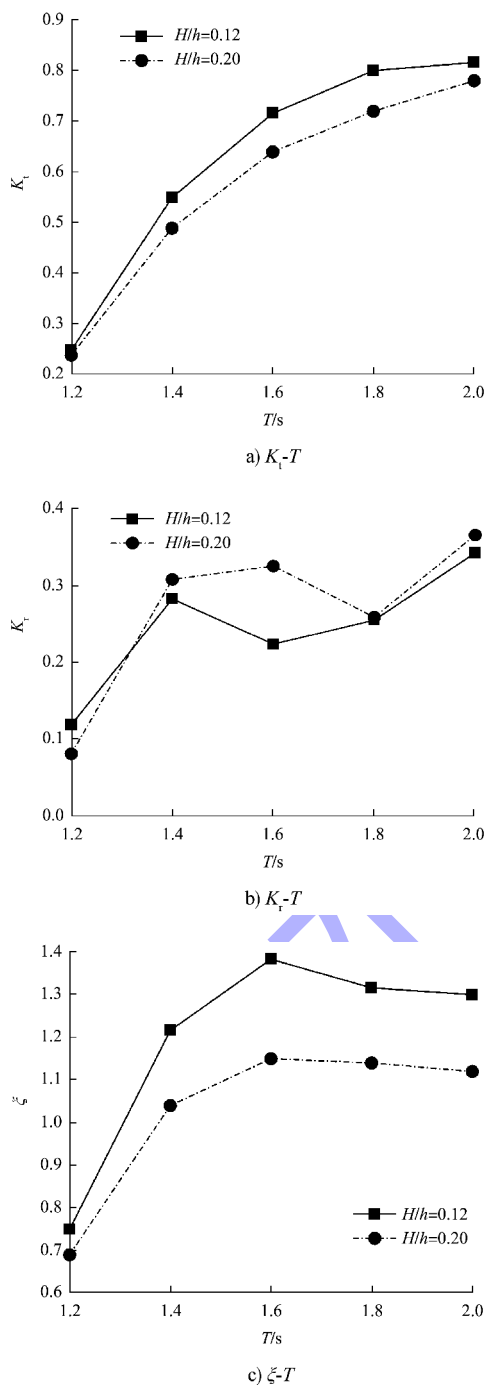


图 7 不同相对波高下各参数周期变化

3.5 相对半径

图 8 为不同相对半径 r/H 下，弧墙-浮式防波堤 K_t 、 K_r 及 ζ 随 T 的变化，分析可知，给定水深

和周期条件下，透射系数均随相对半径增加而增加，但增加幅度比较小；反射系数随相对半径增加而增加，但增加幅度比较小；运动响应均随相对半径的增加而单调增加，同样增加幅度较小。给定相对半径下，透射系数随周期增加而单调增加；反射系数在周期 1.6 s 或 1.8 s 时会有一定程度的降低；运动响应随周期增加而先增加后减小。在本试验研究参数范围内，透射系数范围处于 0.240~0.840；反射系数范围处于 0.060~0.359；运动响应范围处于 0.69~1.31。

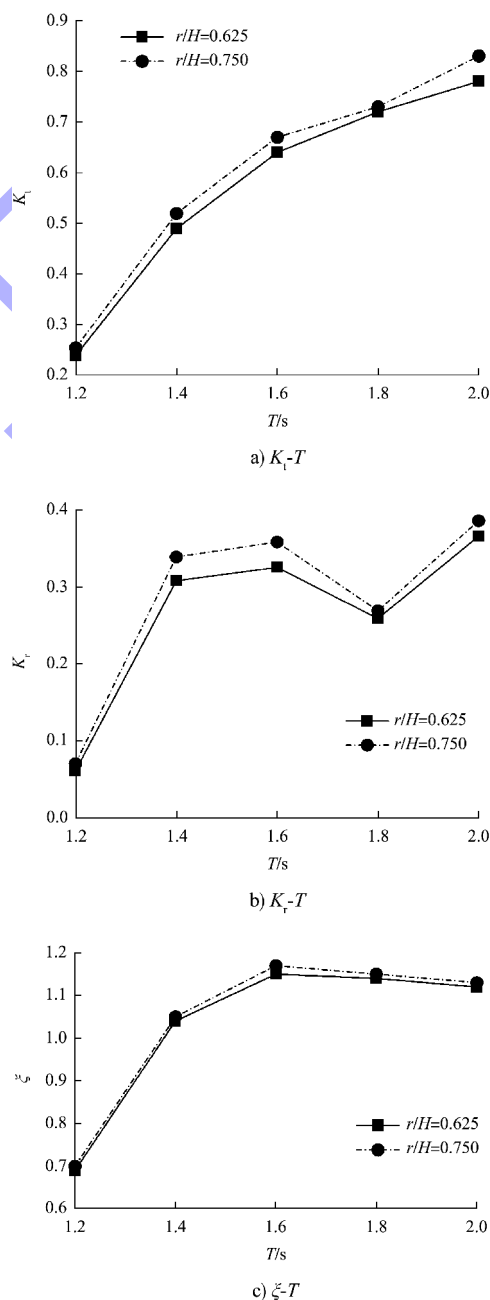


图 8 不同相对半径下各参数周期变化

4 结论

1) 周期、水平宽度、相对高度及相对波高对弧墙-浮式防波堤水动力性能的影响较大,相对半径对其水动力性能影响较小。

2) 透射系数随水平宽度的增大而增大,周期小于1.4 s时,透射系数能维持在0.6以下;相对高度在0.77时透射系数最小;增大相对波高会减小透射系数。

3) 反射系数变化幅值不大,变化范围在0.040~0.406之间,在周期为1.6 s或者1.8 s时,反射系数会有一定程度的减小。

4) 运动响应随水平宽度、相对高度的增大而增大,随相对波高的增大而减小;在周期为1.6 s或者1.8 s时,垂荡运动响应会达到峰值。

参考文献:

- [1] 符如旭,毛继泽,殷万杰,等.浮式防波堤结构的研究现状[J].水运工程,2016(6):61-66.
- [2] DAI J, WANG C M, UTSUNOMIYA T, et al. Review of recent research and developments on floating breakwaters [J]. Ocean engineering, 2018, 158: 132-151.
- [3] ABUL-AZM G A, GESRAHA M R. Approximation to the hydrodynamics of floating pontoons under oblique waves[J]. Ocean engineering, 2000, 27(4): 365-384.
- [4] NING D Z, ZHAO X L, GÖTEMAN M, et al. Hydrodynamic performance of a pile-restrained WEC-type floating breakwater: An experimental study[J]. Renewable energy, 2016, 95: 531-541.
- [5] DENG Z Z, WANG L, ZHAO X Z, et al. Hydrodynamic performance of a T-shaped floating breakwater [J]. Applied ocean research, 2019, 82: 325-336.
- [6] NIKPOUR A H, MOGHIM M N, BADRI M A. Experimental study of wave attenuation in trapezoidal floating breakwaters [J]. China ocean engineering, 2019, 33(1): 103-113.
- [7] ZHANG X S, MA S, DUAN W Y. A new L type floating breakwater derived from vortex dissipation simulation[J]. Ocean engineering, 2018, 164: 455-464.
- [8] 陈城,陈新权,杨启,等.翼板浮式防波堤消波性能[J].水运工程,2022(9):8-14,85.
- [9] 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.
- [10] 郑艳娜,彭海婷,陈昌平.不规则波对方箱浮式防波堤作用的数值模拟[J].水运工程,2015(7):14-19.
- [11] 侯勇,孙大洋.规则波作用下矩形浮式防波堤的消浪性能试验研究[J].水运工程,2013(5):41-44.
- [12] SANNASIRAJ S A, SUNDAR V, SUNDARAVADIVELU R. Mooring forces and motion responses of pontoon-type floating breakwaters [J]. Ocean engineering, 1998, 25(1): 27-48.
- [13] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [14] SHIH T. Overset grids: Fundamental and practical issues[C]//20th AIAA Applied Aerodynamics Conference, St Louis: AIAA, 2002.
- [15] GODA Y, SUZUKI Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments [J]. Plos one, 1976, 4(9): 73.
- [16] CHEN Q, ZANG J, BIRCHALL J, et al. On the hydrodynamic performance of a vertical pile-restrained WEC-type floating breakwater [J]. Renewable energy, 2020, 146: 414-425.
- [17] FENTON J D. A fifth-order Stokes theory for steady waves[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 1985, 111(2): 216-234.

(本文编辑 王传瑜)