



长周期波浪对潜堤-弧板式防波堤作用的水动力特性研究*

邓紫阳, 李雪艳, 丁琰鑫, 曲恒良, 韩旭, 杨沫遥

(鲁东大学水利工程学院, 山东烟台 264025)

摘要: 鉴于长周期波浪条件下海洋防护结构物的消浪效果不理想, 本文提出一种潜堤—弧板式防波堤结构。基于开源流体力学平台 OpenFOAM, 采用连续方程和雷诺平均斯托克斯方程作为流体控制方程, 建立波浪与潜堤-弧板式防波堤结构相互作用的数值模型。采用试验结果验证的数值模型, 分析弧板宽度、潜深对潜堤-弧板式防波堤消浪性能的影响, 并探讨潜堤-弧板式防波堤弧板上下表面所受波浪压力的分布特性。结果表明: 在设定的波浪周期范围内, 潜堤-弧板式防波堤的透射系数随潜深和弧板宽度的增大而减小; 其反射系数随潜深和板宽的增大而增大。潜堤-弧板式防波堤弧板下表面的正负压力值关于横轴近似对称, 上表面不同测点之间的正负压力值存在显著差异。研究结果可为工程应用提供一定的理论与技术指导。

关键词: 潜堤-弧板式防波堤; 消浪性能; 波浪压力; OpenFOAM

中图分类号: U65; TV139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0037-08

Hydrodynamic characteristics of submerged embankment arc plate composite structures under action of long-period waves

DENG Ziyang, LI Xueyan, DING Yanxin, QU Hengliang, HAN Xu, YANG Moyao

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

Abstract: Considering that the wave dissipation effect of marine protective structures under long-period wave conditions is not ideal, this paper proposes a breakwater structure of submerged embankments and arc plates. Based on the open-source fluid dynamics platform OpenFOAM, a numerical model of the interaction between waves and submerged breakwaters with curved plate breakwaters is established using the continuous equation and Reynolds averaged Stokes equation as the fluid control equations. Using a numerical model validated by experimental results, the influence of arc width and submergence depth on the wave dissipation performance of a submerged breakwater arc plate breakwater is analyzed, and the distribution characteristics of wave pressure on the upper and lower surfaces of the submerged breakwater arc plate breakwater arc plate are explored. The results show that within the wave period range set in this article, the transmission coefficient of the submerged breakwater and the arc plate breakwater decreases with the increase of submerged depth and arc plate width. Its reflection coefficient increases with increasing depth and plate width. The positive and negative wave pressures on the lower surfaces of the submerged breakwater and arc plate breakwater are approximately symmetrical about the horizontal axis, while there are significant differences in the positive and negative pressure values between different measurement points on the upper surface. The research results can provide certain theoretical and technical guidance for engineering applications.

Keywords: submerged breakwater- arc plate breakwater; wave dissipation performance; wave pressure; OpenFOAM

收稿日期: 2024-03-16

*基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2023QE075)

作者简介: 邓紫阳 (1998—), 男, 硕士研究生, 从事波浪与海洋结构物相互作用方面的研究。

通讯作者: 李雪艳 (1980—), 女, 博士, 教授, 从事波浪与结构物作用方面的研究。E-mail: yanzi03@126.com

随着海洋经济的蓬勃兴起,港口建设日益向水更深、浪更大的深海区域延伸拓展。而传统的重力式防波堤在面对长周期波浪工况条件下,将导致港内泥沙淤积和消浪效果下降。因此针对长周期波浪的特性,重新设计或改进防波堤的结构引起越来越多专家学者的关注^[1-3]。

Wiegel^[4]提出影响潜堤透射系数的因素包括相对堤顶宽度;孙天霆等^[5]通过潜堤断面物理模型试验,研究淹没水深、波高、堤顶宽度、潜堤坡度对透射系数的影响,并改进了前人的经验公式;Wang等^[6]通过物理试验对浮式防波堤、潜堤式防波堤及其组合式防波堤的性能进行研究,验证其在消浪方面的有效性及合理性;Xu等^[7]通过人工牡蛎礁波浪衰减试验,探讨了人工牡蛎礁工程保护海岸的方案;孙亮等^[8]基于OpenFOAM建立数值波浪水槽模型,成功模拟了波浪在潜堤地形的传播变形,与已有研究数据相吻合,为近岸结构物的研究与设计提供了可靠依据。

以往的研究表明潜堤能够通过波浪浅水变形有效地衰减波高和减弱波浪动力,优于传统坐底式防波堤,但在长周期波浪条件下消浪效果不够理想^[9]。关于潜堤式防波堤的消浪性能研究大多考虑潜堤形状等因素,而与其他结构相结合的组合形式研究较少。弧板式防波堤对海洋环境的影响较小,能够适应不同的水深和波浪条件,具有较高的稳定性,能够抵抗风浪、潮汐等自然力的侵蚀^[10]。王丽雪等^[11]基于物理模型研究双弧板式透空防波堤在不同工况下的消浪效果,比较弧板和平板两种透空堤对消浪特性的影响,得出在消浪性能方面,弧板式透空堤优于平板式透空堤。

以我国舟山附近海况为例,由相关文献可知该地区波浪周期集中于5~14 s,而国内防波堤设计波浪周期通常为8~10 s,业内已广泛认同将周期为10~30 s的波浪界定为长周期波^[12]。基于上述研究,提出一种潜堤-弧板式防波堤,利用OpenFOAM^[13]开源软件建立波浪与潜堤-弧板组合结构相互作用的数值模型,系统讨论潜堤-弧板式防波堤在长周期波浪条件下的水动力特性。

1 数值模型

1.1 数值模型概况

本文基于OpenFOAM开源程序,建立波浪与潜堤-弧板式防波堤作用的数值模型,采用雷诺平均 $N-S$ 方程作为控制方程。数值水槽造波采用推板造波法,利用动网格技术模拟推板波机的工作原理,以生成所需的波浪。为有效吸收造波板的二次反射波,引入主动吸收方法。为避免数值水槽在计算域末端发生壁面反射,在动量方程中加入阻尼层进行消波处理。应用流体体积函数法跟踪流体的自由表面。在构建数值水槽时,侧壁和底部均采用不可滑移的边界条件。计算区域的网格划分采用有限体积法。为捕捉到自由表面和结构物附近的精确数值结果,加密了关键部位的网格,在弧板式透空堤结构区域采用两次迭代的加密方法,显著提高了网格区域的分辨率,在确保模拟结果准确性的基础上,提升了计算效率。

1.2 数值模型建立

根据上述方法,建立基于interDyMFoam空水槽数值模型,见图1,水槽长24 m、宽0.6 m、高0.8 m,水槽内布置4根浪高仪,在造波区4和6 m处布置浪高仪,以验证推板造波的稳定性和准确性。在消波区域19.0和23.3 m处布置2根浪高仪,以验证阻尼消波层的有效性和可靠性。

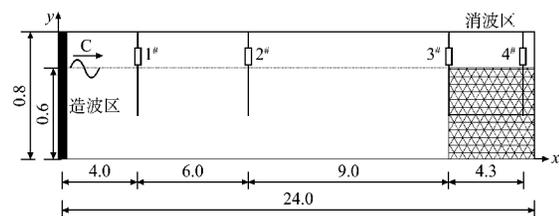


图1 空水槽数值模型(单位:m)

图2为水深 $d=0.6$ m、波高 $H=0.06$ m、周期 $T=2.0$ s时,上述4根浪高仪所监测的波面高程 η 与二阶Stokes波理论结果对比。浪高仪1#、2#测量的波面历时曲线与理论结果相符,说明数值模型成功模拟了推板造波试验;浪高仪3#位于消波区起始位置,波面数值结果明显低于理论结果,证明阻尼层减弱了波浪;浪高仪4#记录到的波面

历时曲线近乎于零, 表明数值模拟中设置的阻尼层的消浪效果显著。

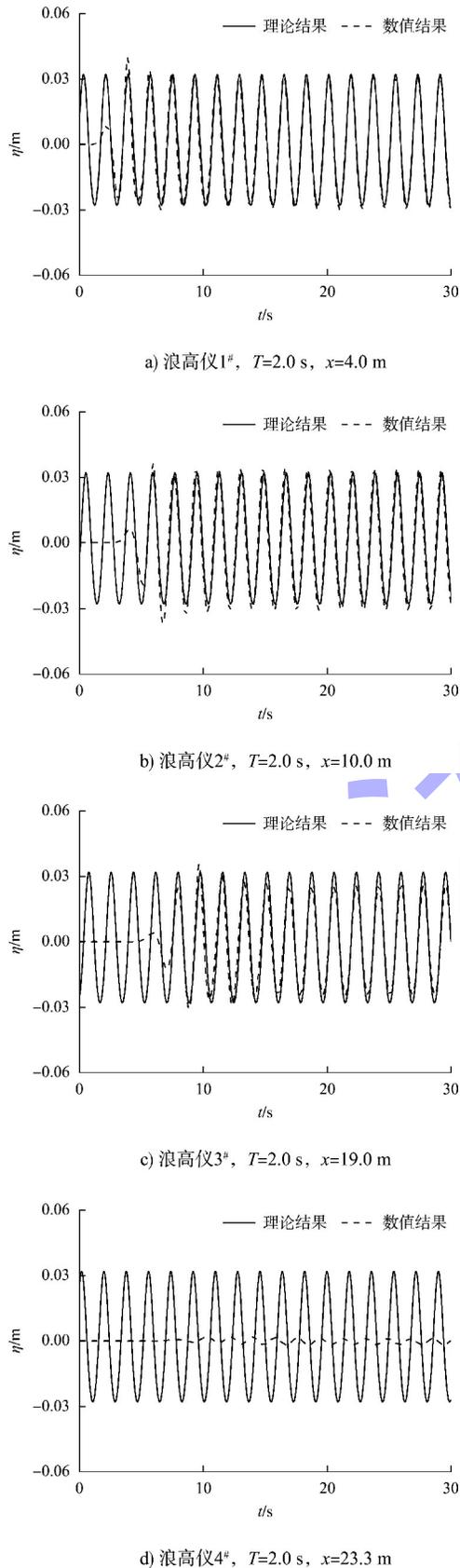


图 2 波面历时曲线与理论结果对比

1.3 数值模型设计

试验模型结构为潜堤-弧板式防波堤, 见图 3。潜堤迎浪向前端距造波板 6 m, 潜堤底部长度为 1.65 m, 高度为 0.25 m, 坡度为 1:3。弧板位于潜堤后方 0.3 m 处, 弧板长度分别为 0.675、0.900、1.125 m, 板厚为 0.01 m。潜堤-弧板组合结构整体位于数值水槽的中前部位置, 其前方设 2 根浪高仪 1#、2#, 利用 goda 两点法^[13] 计算波浪反射数据, 后方设 1 根浪高仪 3# 用于计算波浪透射系数。

如图 4 所示, 在弧板上布置 12 个等间距压力测点, 其中 1~6 号测点位于弧板上表面, 7~12 号测点位于弧板下表面, 1~12 号测点用于监测弧板上下表面压力值。

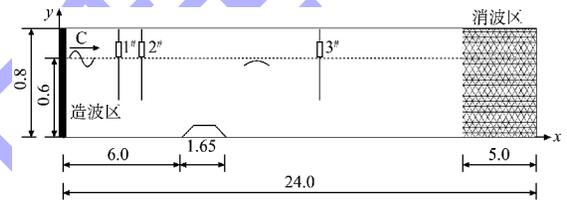


图 3 模型结构 (单位: m)

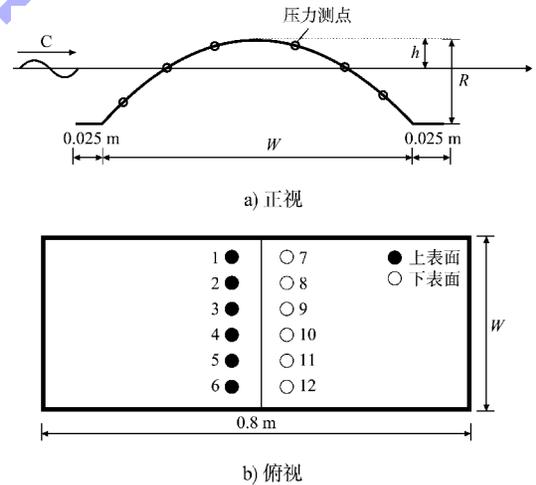


图 4 弧板模型压强测点布置

1.4 试验条件

根据舟山海域的波浪及水深条件, 试验过程采用规则波浪, 选取实际水深 $d=12$ m、有效波高 $H=1.2$ m、周期 $T=9、10、11、12$ s 的长周期波浪。试验模型比尺选取 1:20, 则数值模拟试验水深 $d=0.6$ m、波高 $H=0.06$ m、波浪周期 $T=2.0、2.2、2.4、2.6$ s。其中 h 为弧板顶点相切的直线与静水面的距离。试验工况参数见表 1。

表1 试验工况设计

d/m	T/s	弧板高度 R/m	H/m	潜深 h/m	弧板宽度 W/m	相对波高 H/d	相对潜深 h/d
0.6	2.0、2.2、2.4、2.6	0.1	0.06	-0.03、0、0.03	0.675、0.900、1.125	0.10、0.17	-0.05、0、0.05

2 数值模型验证

为验证数值模型的精度，本文计算单弧板式防波堤的数值结果与张俊斌等^[15]的试验结果对比，数值计算的模型尺寸同张俊斌等物模试验保持一致。数值结果和试验结果对比见图5，其中横坐标为相对板宽，即板宽 W 与波长 L 的比值。图5a)的纵坐标为透射系数 K_t ，图5b)的纵坐标为反射系数 K_r 。由图5可以看出， K_t 与物理模拟试验结果最大误差为 1.25%， K_r 与物理模拟试验结果最大误差为 3%，数值结果与试验结果较为吻合。

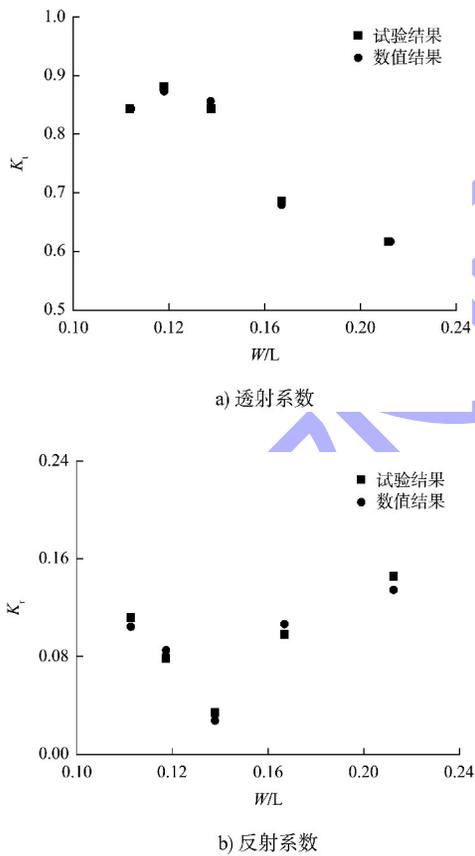


图5 数值结果和试验结果对比

3 水动力特性

3.1 潜堤与潜堤-弧板式防波堤消浪特性对比

当 $d = 0.6\text{ m}$ 、 $H = 0.06\text{ m}$ 、 $W = 0.675\text{ m}$ 时，在不同潜深的情况下，潜堤-弧板式防波堤与潜堤

的透射系数比较结果见图6。由图6可知，潜堤-弧板式防波堤 K_t 值为 $0.57 \sim 0.72$ ，潜堤 K_t 值为 $0.68 \sim 0.85$ 。两种结构的最大值相差 0.18 ，不同潜深条件下的潜堤-弧板式防波堤的透射系数均小于潜堤的透射系数。因此，相较于潜堤式防波堤，潜堤-弧板式防波堤消浪效果更优。

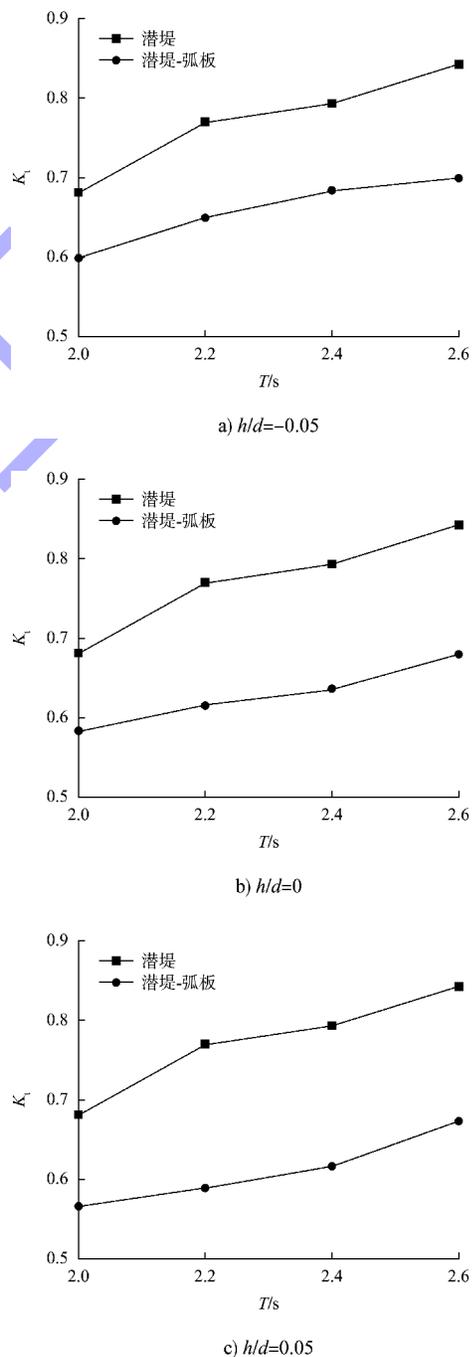


图6 潜堤-弧板式防波堤与潜堤透射系数对比

3.2 潜深对消浪性能影响

图 7、8 为潜堤-弧板式防波堤在 $d = 0.6 \text{ m}$ 、 $H = 0.06 \text{ m}$ 、 $W = 0.675$ 、 0.900 、 1.125 m 时, K_t 和 K_r 随相对潜深和波浪周期的变化对比。

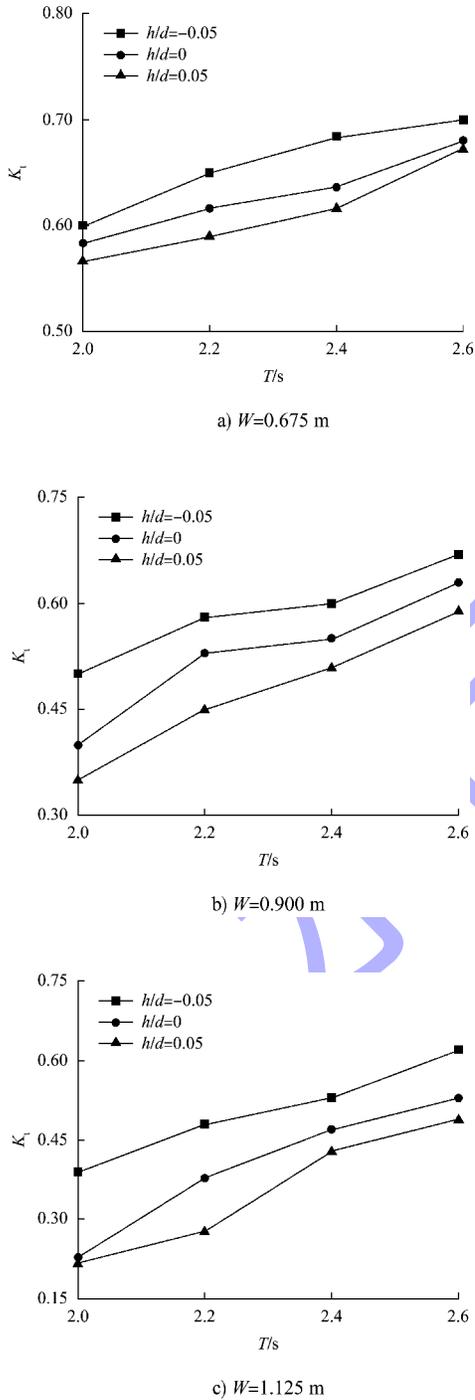


图 7 相对潜深不同时透射系数变化对比

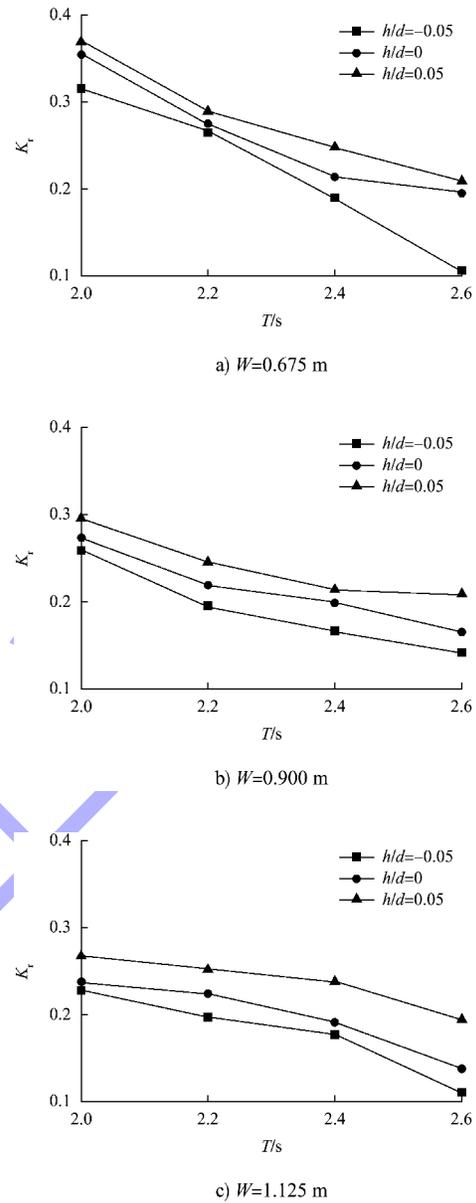


图 8 相对潜深不同时反射系数变化对比

由图 7 可知, 在 $W = 0.675$ 、 0.900 、 1.125 m 3 种条件下, K_t 、 K_r 整体变化趋势相同。在同一相对潜深条件下, K_t 随波浪周期 T 的增大而增大; 在相同波浪周期条件下, K_t 随相对潜深增大而减小。因此, 在其他条件相同的情况下, 相对潜深越大透射系数越小, 消浪效果越好。

由图 8 可知, 在同一相对潜深条件下, K_r 随波浪周期 T 的增加而减小; 在同一波浪周期条件

下, K_t 随相对潜深的增加而逐渐增大。原因是当弧板位于静水面上方时 ($h/d=0.05$), 相较于位于静水面下方时 ($h/d=-0.05$), 其有效挡水面积更大, 因此透过的波浪减少, K_t 变小; 反射的波浪增多, K_r 变大。

3.3 板宽对消浪的影响

图 9、10 为潜堤-弧板式防波堤在水深 $d=0.6\text{ m}$, 波高 $H=0.06\text{ m}$, 相对潜深 $h/d=-0.05、0、0.05$ 时, 结构物的 K_t 和 K_r 随波浪周期和弧板宽度 $W=0.675、0.900、1.125\text{ m}$ 的变化。

由图 9 可知, 在相对潜深 $h/d=-0.05、h/d=0、h/d=0.05$ 这 3 种条件下, $K_t、K_r$ 整体变化趋势相同。在弧板宽度相同时, K_t 随波浪周期 T 的增大而增大。弧板宽度对透射系数的影响较大, 在同一波浪周期下, 结构物的弧板宽度越大透射系数越小。

由图 10 可知, 在弧板宽度相同时, 反射系数随波浪周期的增加而减小。在同一波浪周期条件下, 随着弧板宽度的增加结构物反射系数总体呈增大的趋势。因此在其他工况一致时, 弧板宽度越大消浪效果越好。

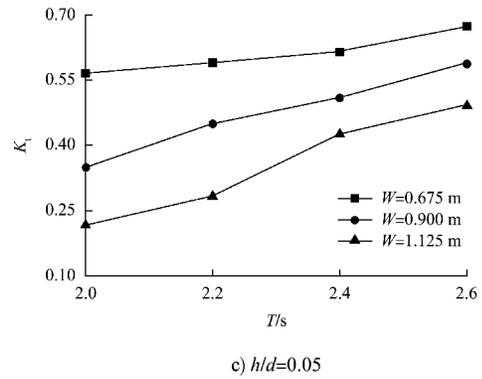
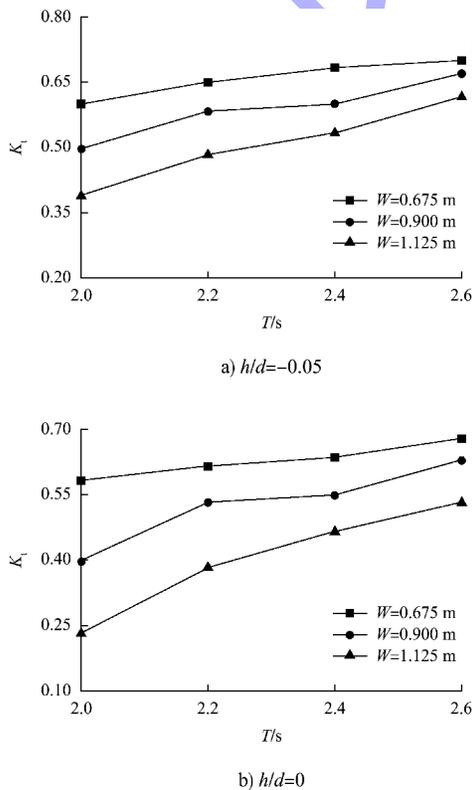


图 9 弧板宽度不同时透射系数对比

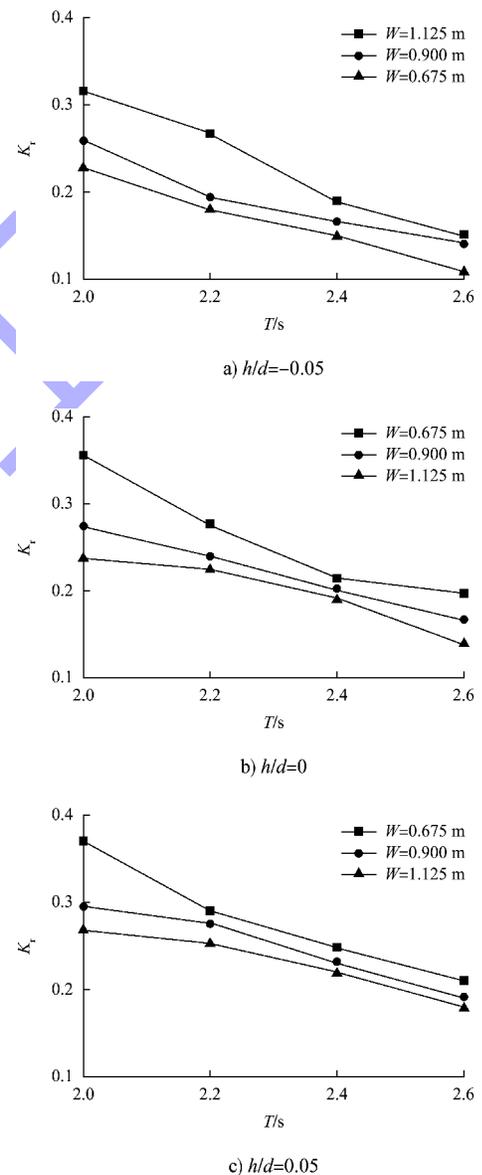


图 10 弧板宽度不同时反射系数对比

3.4 波浪压力

图 11、12 为潜堤-弧板式防波堤在 $d=0.6\text{ m}$, $T=2.4\text{ s}$, $H/d=0.1$, $W=0.675、0.900、1.125\text{ m}$ 时,

不同相对潜深情况下压力包络图。弧板的正压值和负压值在下表面的分布较为对称。除个别压力点外,弧板上表面所受正、负(绝对值)压力值总体呈先减小再增大的趋势。弧板下表面变化趋势平稳,所受正、负(绝对值)压力值总体呈现逐渐减小的趋势。弧板下表面在静水面上方,波浪作用于弧板时,由于波浪的正向冲击和沿弧面的爬升,对弧板产生的冲击作用力较大,导致负压力值较高。相比之下,在静水面下方,波浪的冲击作用力减弱,因此负压力值相对较小。这种现象表明波浪在不同位置对弧板的作用力存在显著差异,对于理解和优化波浪与结构物的相互作用具有重要意义。

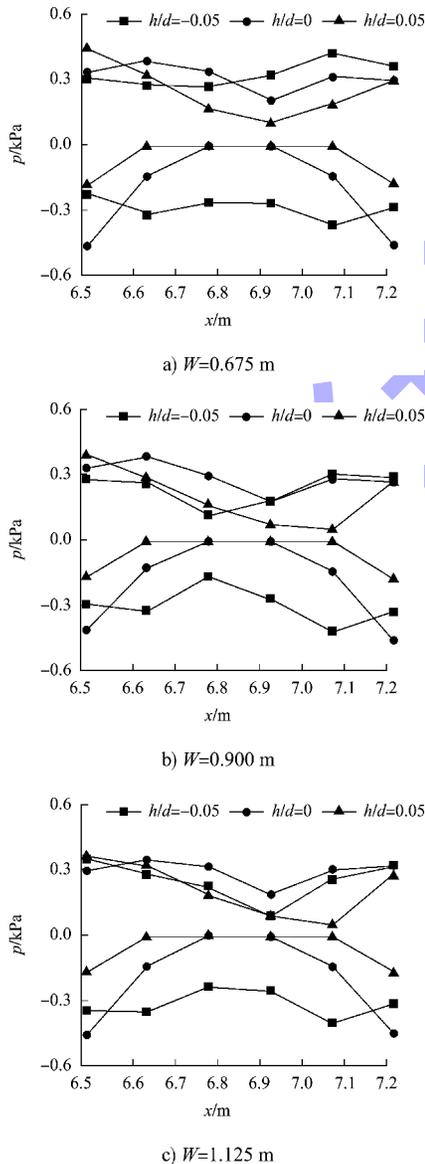


图 11 弧板上表面压力包络分布

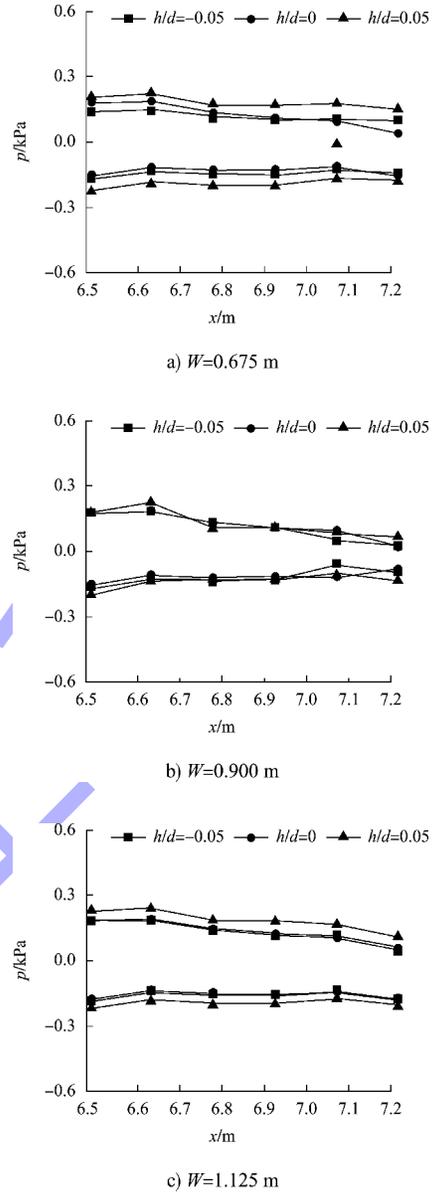


图 12 弧板下表面压力包络分布

4 结论

1) 在工况一定的条件下,潜堤-弧板式防波堤的透射系数随潜深和弧板宽度的增大而减小;反射系数随潜深和弧板宽度的增大而增大。

2) 潜堤-弧板式防波堤弧板下表面正负压力值的分布呈现出较高的对称性。对于绝大多数工况,弧板上表面在静水面以上时的正、负(绝对值)压力值小于弧板在静水面及以下;弧板下表面在静水面以上时的正、负(绝对值)压力值大于弧板在静水面及以下。

3) 提高潜堤-弧板式防波堤消浪性能最有效的方法是增加弧板宽度。在进行结构物布置时,

若以长周期波浪为主要考虑因素,实际上对相对较短周期的波浪也可产生更好的防护效果。

参考文献:

[1] 王国玉. 特种防波堤结构型式及水动力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.

[2] 王曦巍. 中长周期波浪作用下多层板浮式防波堤尺寸特征对消浪性能的影响[J]. 水运工程, 2022(S2): 89-94.

[3] SHI J, FENG X B, TOUMI R, et al. Global increase in tropical cyclone ocean surface waves [J]. Nature communications, 2024, 15(1): 174.

[4] WIEGEL R L. Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier [J]. Journal of the waterway and harbors division, 1960, 86(1): 1-12.

[5] 孙天霆, 刘清君, 王登婷. 可渗潜堤波浪透射系数试验研究[J]. 水运工程, 2018(4): 20-25, 42.

[6] WANG G Y, REN B, WANG Y X. Experimental study on hydrodynamic performance of arc plate breakwater [J]. Ocean engineering, 2016, 111: 593-601.

[7] XU W, TAO A F, WANG R S, et al. Review of wave attenuation by artificial oyster reefs based on experimental analysis[J]. Ocean engineering, 2024, 298: 117309.

[8] 孙亮, 那鑫宇, 陈柯宇, 等. 波浪在潜堤和潜堤地形上的传播变形[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(1): 139-144.

[9] 边峰, 黄哲, 琚烈红. 不同结构形式潜堤消浪性能物理模型试验研究[J]. 水运工程, 2020(8): 36-41, 58.

[10] 肖宇, 陈杰. 不同波浪作用下特种防波堤对岸滩剖面变化影响分析[C]// 第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会, 重庆: [出版者不详], 2019: 446-451.

[11] 王丽雪, 李雪艳, 王庆, 等. 双弧板式透空堤消浪特性物理模型试验[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(4): 534-539.

[12] 王绿卿, 唐筱宁, 夏运强, 等. 舟山群岛海域波浪能资源评估[J]. 可再生能源, 2014, 32(12): 1939-1944.

[13] 王东旭, 孙家文, 桂劲松, 等. 基于 InterDyMFoam 的潜礁孤立波传播数值模拟[J]. 海洋工程, 2018, 36(2): 47-55.

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

[15] 张俊斌, 李雪艳, 王庆, 等. 基于物模试验的平板与弧板式防波堤水动力特性对比[J]. 水运工程, 2020(6): 9-14, 27.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 36 页)

参考文献:

[1] DHI Group. MIKE 21 Boussinesq wave module scientific documentation[S]. New York: DHI Group, 2009.

[2] 董胜, 董祥科, 张华昌. 人工岛游艇码头泊稳试验与数值模拟研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(6): 102-108.

[3] 丁兆宽, 宋荔钦. 日照港石臼港区港内泊稳条件优化研究[J]. 水运工程, 2014(4): 63-68.

[4] 杨锦凌, 王绿卿, 饶永红, 等. Mike 21-BW 在游艇码头平面规划布置中的应用[J]. 水运工程, 2019(11): 47-53.

[5] 杨锦凌, 张成刚, 韩炳辰, 等. 直立码头前沿波高模型及数值模拟[J]. 水运工程, 2021(1): 56-59, 65.

[6] 王鑫珏. 扭王块体护面斜坡堤越浪模拟的非静压模型

研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.

[7] 邹国良, 张庆河. 非静压波浪模型无反射造波[J]. 海洋工程, 2012, 30(4): 55-61.

[8] 张娜, 邹国良. 斜坡上波浪破碎与越浪非静压数值模拟[J]. 海洋工程, 2015, 33(2): 32-41.

[9] 吴辰, 张庆河, 张金凤, 等. 基于非静压方程的斜坡堤越浪数值模拟[J]. 港工技术, 2014, 51(6): 1-6.

[10] 王鑫珏, 张庆河. 人工块体护面斜坡堤越浪模拟的非静压模型研究[J]. 港工技术, 2018, 55(6): 1-5.

[11] RATHNAYAKA D, TAJIMA Y. Influence of the permeability of submerged breakwaters on surrounding wave and current fields[J]. Coastal engineering journal, 2023, 65(3): 369-382.

(本文编辑 王璵)