



# 开孔弧板式透空堤消浪性能研究\*

张英狄, 李雪艳, 曲恒良, 王玉坤, 陈澜铠

(鲁东大学海岸研究所, 山东省海上航天装备技术创新中心, 山东烟台 264025)

**摘要:** 弧板式透空堤因具有结构简单、成本低、工期短、适应外界环境能力强等优点逐渐受到关注与研究。弧板式透空堤开孔有利于进一步提升其消浪性能, 通过物理模型试验研究弧板式透空堤在不同的开孔方式下的消浪性能, 根据开孔位置及开孔形状, 可将开孔方式分为迎浪侧圆形开孔、迎浪侧方形开孔、背浪侧圆形开孔、背浪侧方形开孔。在不同潜深(-0.03 m、0.03 m)、波浪周期(1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 s)及波高(0.06、0.10 m)条件下开展物理模型试验, 考察不同开孔方式弧板式透空堤的透射系数和反射系数, 分析其消浪性能。结果表明, 当弧板式透空堤潜深为-0.03 m时, 开方孔有利于提升弧板式透空堤的消浪性能; 当弧板式透空堤潜深为0.03 m时, 相较于其他开孔方式, 迎浪侧开方孔可显著提升弧板式透空堤的消浪性能。

**关键词:** 弧板式透空堤; 开孔方式; 消浪性能; 潜深

中图分类号: U656.2; TV139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0023-09

## Wave dissipation performance of perforated arc plate permeable breakwater

ZHANG Yingdi, LI Xueyan, QU Hengliang, WANG Yukun, CHEN Lankai  
(Shandong Marine Aerospace Equipment Technological Innovation Center,  
Coast Research Institute, Ludong University, Yantai 264025, China)

**Abstract:** The arc plate permeable breakwater has gradually attracted attention and research due to its advantages of simple structure, low cost, short construction period and strong ability to adapt to the external environment. Opening on an arc plate permeable breakwater is beneficial to further improve its wave dissipation performance. The wave dissipation performance of an arc plate breakwater under different opening methods is studied through physical model tests. According to the opening position and opening shape, opening methods can be divided into circular openings on the wave-facing side, square openings on the wave-facing side, circular openings on the wave-back side, and square openings on the wave-back side. Physical model tests are carried out under different diving depths (-0.03 m, 0 m, 0.03 m), wave periods (1.2 s, 1.4 s, 1.6 s, 1.8 s, 2.0 s) and wave heights (0.06 m, 0.10 m) to study the transmittance and reflection coefficients of arc plate permeable breakwaters with different opening methods, and to analyze their wave dissipation performance. The results show that when the submergence depth of the arc plate permeable breakwater is -0.03 m, the square hole is conducive to improving the wave dissipation performance of the arc plate permeable breakwater. When the submergence depth of the arc plate permeable breakwater is 0.03 m, compared with other opening methods, the square hole on the wave-facing side can significantly improve the wave dissipation performance of the arc plate permeable breakwater.

**Keywords:** arc plate permeable breakwater; opening mode; wave dissipation performance; submergence depth

收稿日期: 2024-05-28

\*基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME145); 山东省青年基金项目(ZR2023QE075); 烟台市科技计划项目(2023XDRH016)

作者简介: 张英狄(2000—), 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。

通信作者: 曲恒良(1991—), 男, 博士, 讲师, 从事海洋可再生能源方面的研究。E-mail: quhengliang@ldu.edu.cn

我国是海洋大国,海域面积十分广阔。为落实海洋强国战略,发展海洋经济、海洋科研成为了推动强国战略的重要引擎,而防波堤的建造为海岸工程的平稳运行提供了基础。随着我国逐步对深海进行探索与开发,传统式防波堤的成本随着水深的加大而增大,同时我国对海洋生态环境的重视程度进一步提高,弧板式防波堤开始受到更多学者的关注。

吴瑶瑶等<sup>[1]</sup>利用 Fluent 软件基于 N-S 方程构建波浪与板式透空堤相互作用的数值模型,讨论相对潜深、入射波周期、相对波高、相对板宽和结构形式对透射系数的影响;王丽雪等<sup>[2]</sup>基于物理模型试验对双弧板透空式防波堤的消浪特性开展研究,在比较其与平板式透空堤消浪特性的基础上探讨相对波高、相对板间距、相对潜深和相对板宽对双弧板式透空堤消浪特性的影响;侯成义等<sup>[3]</sup>基于物理模型试验比较分析平弧板与双平板式透空堤结构在不同入射波浪条件下的消浪性能,得出平弧板和双平板式透空堤的透射系数均随相对板宽的增大而波动减小、能耗系数则相反的结论;潘春昌等<sup>[4]</sup>提出一种由多层圆弧板组成的新型透空式防波堤结构,并对其在二维规则波浪作用下的消浪性能进行物理模型试验研究,得出圆弧板透空式结构的消波效果优于水平板式透空结构的结论;王科等<sup>[5]</sup>基于边界单元法,应用波浪绕射和辐射理论对上弧形板结构的消浪性能进行研究,从而验证这一新型结构具有更好的消波效果;Wang et al.<sup>[6]</sup>提出由悬挂在支座桩上的数块弧板组成的弧板防波堤,与由数个水平板组成的类似防波堤的消浪性能进行比较,得出弧板防波堤的性能优于水平板式防波堤的结论;Li et al.<sup>[7]</sup>探讨双平板防波堤与双弧板防波堤在消浪性能方面的异同,研究结果为透空式防波堤的工程应用提供必要的理论指导。

刘必劲等<sup>[8]</sup>基于 OpenFoam 的数值模拟方法,采用物理模型试验,对一种由双浮筒、双竖板与水平连接板组成的新型浮式防波堤结构进行消浪性能研究,其成果可为防波堤的工程运用提供理论参考;唐忠时等<sup>[9]</sup>提出倒  $\pi$  型浮式防波堤,并

基于 N-S 方程,应用 STAR-CCM+ 软件对该防波堤的消浪效果进行分析,得出该防波堤结构的消浪效果明显好于矩形防波堤的结论;于定勇等<sup>[10]</sup>在垂直板透空堤的基础上,提出一种反弧倾斜板透空防波堤结构,通过物理模型试验对该结构的消浪性能进行研究,得出该结构的消浪性能明显好于垂直板透空堤的结论;刘传林等<sup>[11]</sup>提出一种半椭圆形新型防波堤结构,采用 FLOW 3D 建立数值波浪水槽进行数值模拟,并通过物理模型试验验证了数值模型的合理性;陈城等<sup>[12]</sup>提出一种带翼板的新型浮式防波堤结构,在三维势流理论的基础上对该结构的消波性能进行计算分析,得出该结构比传统箱式和浮式防波堤具有更好消波能力的结论;季新然等<sup>[13]</sup>建立不规则波与带腹板型浮式防波堤相互作用的数值模型,通过进行水槽试验,对该模型进行验证,进而对该结构的水动力特性进行模拟分析,研究结果可为实际工程提供理论参考;杨沫遥等<sup>[14]</sup>设计一种迎浪侧半开孔式水平板防波堤,通过物理模型试验研究不开孔式与迎浪侧半开孔式两种水平板防波堤的水动力特性,得出迎浪侧半开孔式水平板防波堤的消浪性能优于不开孔式水平板防波堤的结论。

目前水平板防波堤、浮式防波堤的研究已经较为全面,而弧板式透空堤的研究较为有限,需要进一步深入系统研究。本文以已有的弧板式透空堤水动力特性研究为基础,对多种开孔方式的弧板式透空堤的消浪性能进行研究及对比分析。

## 1 物理模型试验

### 1.1 设备和仪器

试验在鲁东大学港口海岸及近海工程实验中心的波浪水槽系统中开展。水槽长 60 m、宽 2 m、高 1.8 m,见图 1。测试设备主要包括造波主机、操作台、浪高仪和数据采集仪,水槽的整个框架和中间隔板均采用玻璃制成。弧板防波堤放置在水槽的中部试验段,在防波堤两侧共布置 4 根浪高仪(1#~4#),用于采集入射波、反射波及透射波,进而分析弧板防波堤的消浪特性。

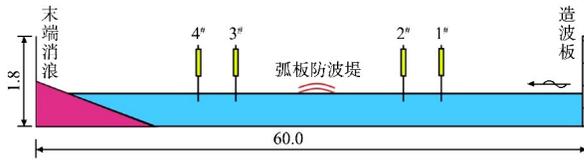


图 1 水槽及模型布置 (单位: m)

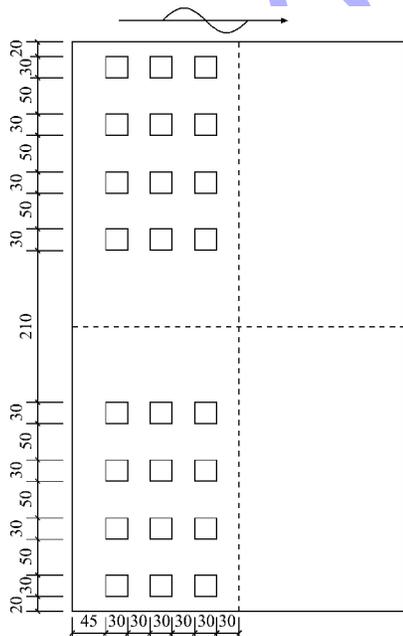
Fig. 1 Arrangement of water tank and model (unit: m)

尾部消浪段是由大小不同的不规则碎石堆积而成, 堆积成斜坡状, 与池底和水槽后墙形成直角三角形的横截面, 坡长 6.8 m、高 1.3 m, 坡度约为 1:5。浪高仪长 0.77 m, 采用两点法布置, 从而使浪高仪避开波长的整数倍, 结构物最近两侧的浪高仪布置在距离结构物 1 倍波长以上, 1#~4#浪高仪对称布置, 2#、3#浪高仪与模型距离  $\Delta L_1 = 0.74$  m, 1#与 2#、3#与 4#浪高仪距离  $\Delta L_2 = 4.46$  m。

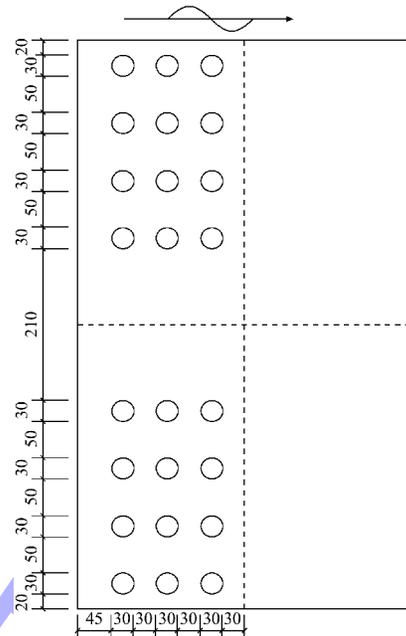
### 1.2 模型设计

试验模型材质为有机玻璃制成, 弧板竖向投影的长和宽为 0.79 和 0.45 m, 弧板厚度为 0.10 m。

弧板防波堤开孔方式分为圆形和方形, 它们的尺寸和布置方式见图 2。开孔参数为: 当开孔方式为圆形时, 直径为 0.03 m, 共布置 3 行 8 列, 24 个孔, 沿对称轴均匀铺开; 当开孔方式为方形时, 边长为 0.03 m, 共布置 3 行 8 列, 24 个孔, 沿对称轴均匀铺开。



a) 方形开孔



b) 圆形开孔

图 2 迎浪侧开孔尺寸及布置 (单位: mm)

Fig. 2 Opening size and layout on wave-facing side (unit: mm)

### 1.3 试验工况

试验采用规则波, 共 120 个工况。水深  $d$  为 0.6 m, 弧板透空堤采用迎浪侧圆形开孔、迎浪侧方形开孔、背浪侧圆形开孔、背浪侧方形开孔 4 种开孔形式, 波高  $H$  为 0.06、0.10 m, 周期  $T$  为 1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 s, 对应的波长  $L$  分别为 2.12、2.71、3.27、3.82、4.36 m, 潜深  $h$  为 -0.03、0、0.03 m, 模型宽度  $W$  为 0.45 m, 得到 5 种相对板宽  $W/L$  分别为 0.212、0.166、0.138、0.118、0.103。采集间隔为 0.02 s, 每组测试重复 3 次, 取平均值作为每组测试的最终结果。

### 1.4 数据处理

#### 1.4.1 透射系数

透射系数所需要的试验数据由 3# 和 4# 浪高仪获得, 且必须选取较稳定的波段, 选取 10 个及 10 个以上的波长, 并将其输入 C 语言程序计算求得, 入射系数  $k_t$  的计算公式为:

$$k_t = \frac{H_t}{H} \quad (1)$$

式中:  $k_t$  为透射系数;  $H_t$  为波面稳定后的结构物后方波面稳定后的波高, m;  $H$  为设定波高, m。

### 1.4.2 反射系数

反射系数所需要的反射波高  $H_r$  由 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>浪高仪获得,且所需数据必须选取较稳定的波段。选取 10 个及 10 个以上的波长,并用 C 语言程序求得,同时对每组试验的 3 次试验结果综合选取,尽量减小试验误差。反射系数  $k_r$  的计算公式为:

$$k_r = \frac{H_r}{H} \quad (2)$$

式中:  $k_r$  为反射系数;  $H_r$  为波面稳定后结构物前方波面稳定后的波高, m。

## 2 弧板式透空堤消浪性能比较

### 2.1 迎浪侧开圆孔式透空堤消浪特性

#### 2.1.1 透射系数分析

弧板式透空堤迎浪侧开圆孔的透射系数  $k_t$  的变化规律见图 3。

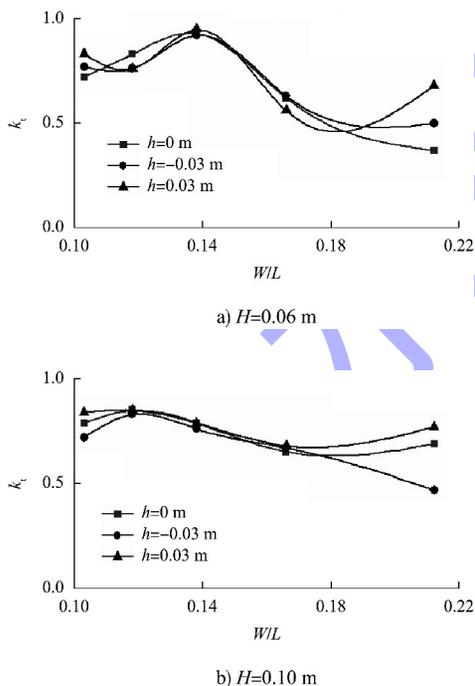


图 3 迎浪侧开圆孔式透空堤  $k_t$  比较

Fig. 3 Comparison of  $k_t$  for circular perforated permeable breakwater on wave-facing side

由图 3a)可知,波高为 0.06 m,在 3 种不同潜深下,弧板式防波堤的透射系数呈相似的变化趋势,  $k_t$  值先增大后减小。潜深为 0 m、 $W/L = 0.212$  时,弧板式透空堤的  $k_t$  值最小为 0.37; 潜

深为 0.03 m、 $W/L = 0.138$  时,弧板式透空堤  $k_t$  的最大值为 0.95。由图 3b)可知,波高为 0.1 m,在 3 种不同潜深下,弧板式透空堤的透射系数变化情况略有差异,当  $W/L$  在 0.103~0.166 时,变化趋势相同,均呈先增大后减小趋势。潜深为 -0.03 m、 $W/L = 0.212$  时,  $k_t$  最小值为 0.47; 当潜深为 0.03 m 和 0 m、 $W/L = 0.118$  时,  $k_t$  最大值为 0.85。

整体而言,当波高为 0.06 和 0.10 m 时,迎浪侧开圆孔的透射系数差异不大。

#### 2.1.2 反射系数分析

弧板式透空堤迎浪侧开圆孔反射系数  $k_r$  的变化规律见图 4。

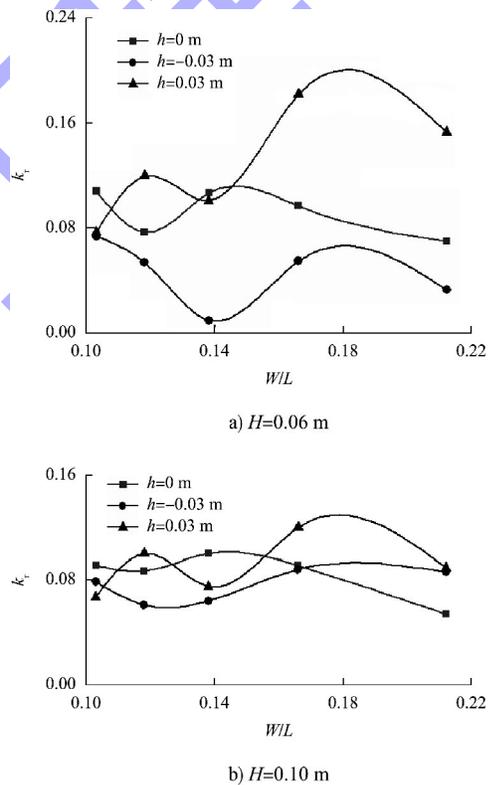


图 4 迎浪侧开圆孔式透空堤  $k_r$  比较

Fig. 4 Comparison of  $k_r$  for circular perforated permeable breakwater on wave-facing side

由图 4a)可知,波高为 0.06 m,当潜深为 0.03 m 时,弧板式透空堤的  $k_r$  值先增大后减小,再增大后减小,弧板式透空堤  $k_r$  的最大和最小值分别为 0.182 和 0.077; 当潜深为 0 m 时,弧板式透空堤的  $k_r$  值先减小后增大再减小,弧板式透空堤  $k_r$  的最大和最小值分别为 0.108 和 0.070; 潜深

为-0.03 m时, 弧板式透空堤的  $k_r$  值呈先减小后增大再减小的趋势,  $k_r$  的最大和最小值分别为 0.074 和 0.010。由图 4b) 可知, 波高为 0.1 m, 当潜深为 0 m 时, 弧板式透空堤  $k_r$  整体呈减小的趋势, 变化趋势较小, 弧板式透空堤  $k_r$  的最大和最小值分别为 0.100 和 0.054; 潜深为 0.03 m 时, 弧板式透空堤的  $k_r$  先增大后减小, 再增大后减小, 弧板式透空堤  $k_r$  的最大和最小值分别为 0.120 和 0.067; 潜深为-0.03 m 时, 弧板式透空堤的  $k_r$  值先减小后增大, 而后趋于平稳, 变化幅度不大,  $k_r$  的最大和最小值分别为 0.088 和 0.061。

整体而言, 当潜深为 0.03 m 时, 两种波高下的反射系数整体上大于其他两种潜深下的不同工况, 弧板式防波堤迎浪侧开圆孔的反射表现更好。

## 2.2 迎浪侧开方孔式透空堤消浪特性

### 2.2.1 透射系数分析

弧板式透空堤迎浪侧开方孔的透射系数  $k_t$  的变化规律见图 5。由图 5a) 可知, 波高为 0.06 m, 当潜深为 0 m 时, 弧板式透空堤的  $k_t$  值呈减小的趋势, 当  $W/L=0.118$  时, 弧板式透空堤  $k_t$  的最大值为 0.84; 当  $W/L=0.212$  时, 弧板式透空堤  $k_t$  的最小值为 0.47。潜深为-0.03 m 时, 弧板式透空堤  $k_t$  的值先增大后减小, 当  $W/L=0.138$  时弧板式透空堤  $k_t$  的最大值为 0.91; 当  $W/L=0.212$  时,  $k_t$  的最小值为 0.45。潜深为 0.03 m 时, 弧板式透空堤的  $k_t$  值呈现出先增大后减小的趋势, 当  $W/L=0.138$  和  $W/L=0.212$  时,  $k_t$  最大和最小值分别为 0.98 和 0.65。由如图 5b) 可知, 波高为 0.1 m, 在 3 种不同潜深下, 弧板式防波堤的透射系数变化差异不大, 均呈而先增加后减小的趋势。潜深为 0 m, 在  $W/L=0.138$  时,  $k_t$  最大值为 0.89;  $W/L=0.212$  时,  $k_t$  值最小为 0.66。潜深为 0.03 m, 当  $W/L=0.138$  时, 弧板式透空堤的  $k_t$  最大值为 0.88、最小值为 0.70。潜深为-0.03 m 时,  $W/L=0.138$  和  $W/L=0.212$  时,  $k_t$  的最大和最小值分别为 0.91 和 0.59。

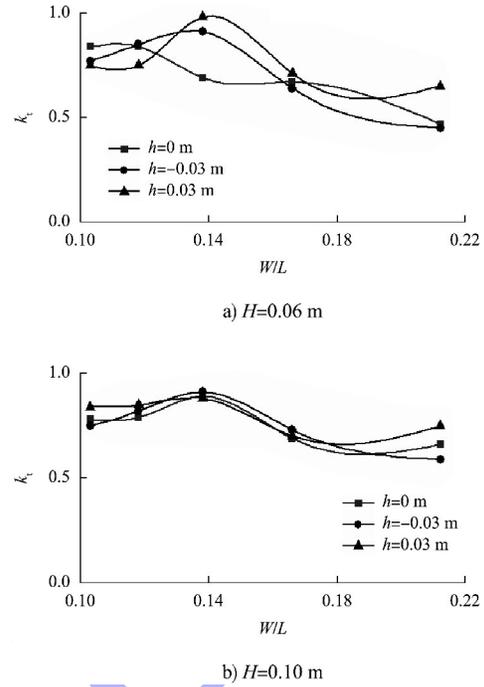


图 5 迎浪侧开方孔式透空堤  $k_t$  比较

Fig. 5 Comparison of  $k_t$  for square perforated permeable breakwater on wave-facing side

整体而言, 当波高为 0.06 和 0.10 m 时, 迎浪侧开方孔的透射系数差异不大。

### 2.2.2 反射系数分析

弧板式透空堤迎浪侧开方孔  $k_r$  的变化规律见图 6。由图 6a) 可知, 波高为 0.06 m, 当潜深为-0.03 m 时, 弧板式透空堤的  $k_r$  值先减小后增大再减小,  $k_r$  的最大和最小值分别为 0.108 和 0.033; 潜深为 0.03 m 时, 弧板式透空堤的  $k_r$  值先增大后减小, 再增大后减小, 弧板式透空堤  $k_r$  的最大和最小值分别为 0.372 和 0.072; 潜深为 0 m 时, 弧板式透空堤的  $k_r$  值先减小后增大再减小, 最大和最小值分别为 0.13 和 0.072。由图 6b) 可知, 波高为 0.1 m, 当潜深为 0 m 时, 弧板式透空堤的  $k_r$  值减小, 变化幅度差异很小,  $k_r$  的最大和最小值分别为 0.129 和 0.092; 潜深为 0.03 m 时, 弧板式透空堤的  $k_r$  值呈先增大后减小的趋势, 最大和最小值分别为 0.124 和 0.072; 潜深为-0.03 m 时, 弧板式透空堤的  $k_r$  值呈先减小后增大, 再减小后增大的趋势, 最大和最小值分别为 0.098 和 0.045。

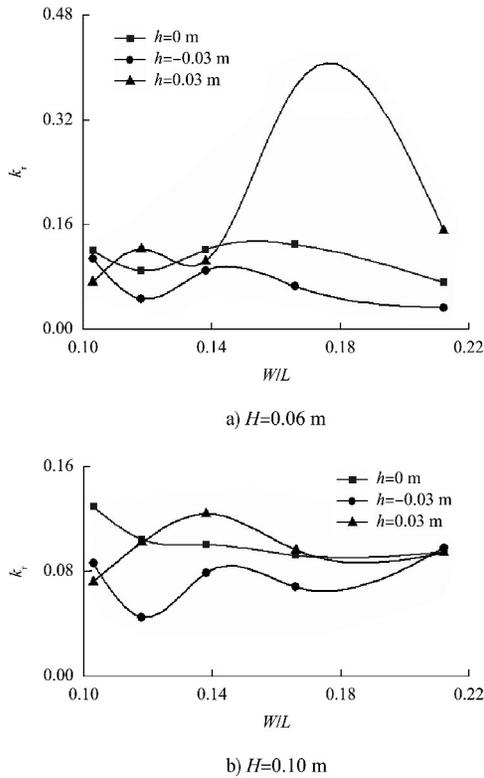


图 6 迎浪侧开方孔式透空堤  $k_r$  比较

Fig. 6 Comparison of  $k_r$  for square perforated permeable breakwater on wave-facing side

整体而言，当潜深为 0.03 m 时，两种波高下的反射系数整体上大于其他两种潜深。另一方面，当波高为 0.06 m、潜深为 0.03 m、相对板宽为 0.166 时，反射系数最大，弧板式防波堤迎浪侧开方孔的反射表现更好。

### 2.3 背浪侧开圆孔式透空堤消浪特性

#### 2.3.1 透射系数分析

弧板式透空堤背浪侧开圆孔透射系数  $k_t$  的变化规律见图 7。

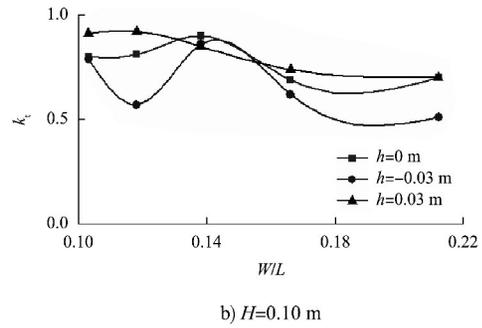
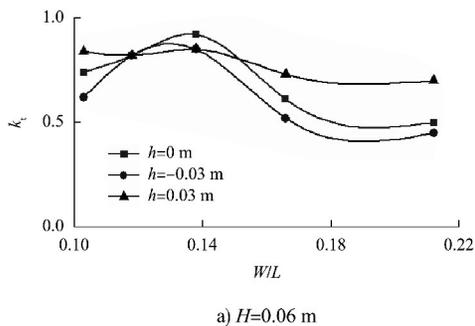


图 7 背浪侧开圆孔式透空堤  $k_t$  比较

Fig. 7 Comparison of  $k_t$  for circular perforated permeable breakwater on wave-back side

由图 7a) 可知，波高为 0.06 m，在 3 种不同潜深下，弧板式透空堤变化趋势相同，均呈先增大后减小的趋势，但有较小的差异。潜深为 0 m， $W/L=0.138$  和  $W/L=0.212$  时， $k_t$  的最大和最小值分别为 0.92 和 0.50。潜深为 0.03 m， $W/L=0.138$  时， $k_t$  达到峰值 0.85；当  $W/L=0.212$  时，最小值为 0.70。潜深为 -0.03 m， $W/L=0.138$  时， $k_t$  达到 0.85 的峰值；当  $W/L=0.212$  时， $k_t$  最小值为 0.45。由图 7b) 可知，波高为 0.1 m，弧板式防波堤在潜深为 -0.03 m 时较其他 2 种潜深的透射系数变化趋势有差异。潜深为 0 m 时， $k_t$  先增大后减小；当  $W/L=0.138$  时， $k_t$  值达到 0.90 的峰值，最小值为 0.69。潜深为 0.03 m 时， $k_t$  值呈减小的趋势，整体变化差异不大；当  $W/L=0.118$  时， $k_t$  达到峰值 0.92，最小值为 0.7。潜深为 -0.03 m 时， $k_t$  值先减小后增大，再减小后增大；当  $W/L=0.138$  时， $k_t$  达到 0.86 的峰值；当  $W/L=0.212$  时， $k_t$  最小值为 0.51。

整体而言，当潜深为 -0.03 m 时，背浪侧开圆孔式透空堤在两种波高下的透射系数整体上小于其他两种潜深，此时的透射表现更好。

#### 2.3.2 反射系数分析

弧板式透空堤背浪侧开圆孔  $k_t$  的变化规律见图 8。

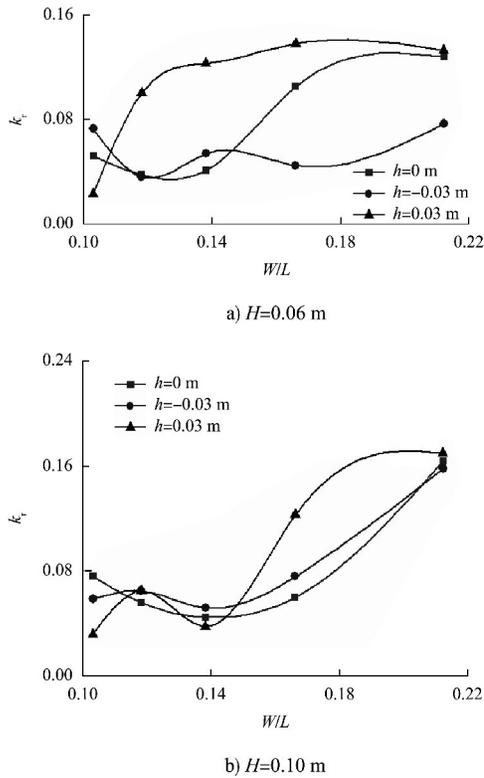


图 8 背浪侧开圆孔式透空堤  $k_r$  比较

Fig. 8 Comparison of  $k_r$  for circular perforated permeable breakwater on wave-back side

由图 8a)可知, 波高为 0.06 m, 当潜深为 0 m 时,  $k_r$  先减小后增大, 最大和最小值分别为 0.128 和 0.038; 潜深为 0.03 m 时,  $k_r$  呈增大的趋势, 最大和最小值分别为 0.138 和 0.023; 潜深为 -0.03 m 时,  $k_r$  先减小后增大, 最大和最小值分别为 0.077 和 0.036。由图 8b)可知, 波高为 0.1 m, 当潜深为 0 m 时,  $k_r$  先减小后增大, 最大和最小值分别为 0.164 和 0.045; 潜深为 0.03 m 时,  $k_r$  先增大后减小再增大, 最大和最小值分别为 0.170 和 0.032; 潜深为 -0.03 m 时,  $k_r$  先减小再增大, 最大和最小值分别为 0.158 和 0.052。

整体而言, 当潜深为 0.03 m 时, 背浪侧开圆孔两种波高下的反射系数整体上大于其他两种潜深; 当潜深为 0 m 时, 两种波高下的反射系数整体上最小。另一方面, 相对板宽为 0.212、潜深为 0.03 m 情况下, 反射系数最大, 此时的反射表现更好。

## 2.4 背浪侧开方孔式透空堤消浪特性

### 2.4.1 透射系数分析

弧板式透空堤背浪侧开方孔  $k_t$  的变化规律见图 9。

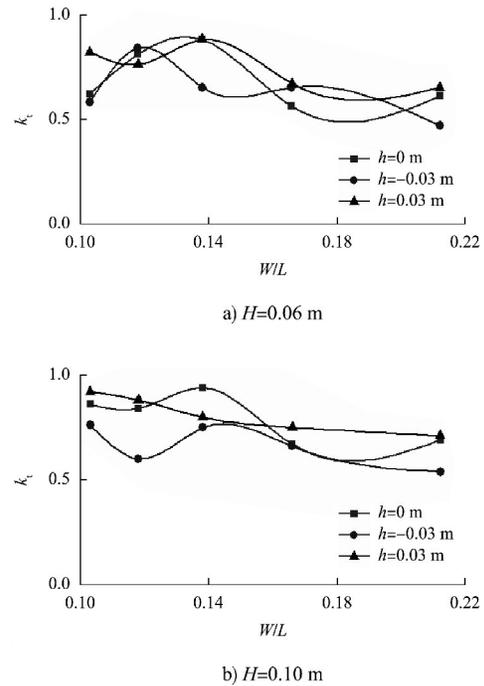


图 9 背浪侧开方孔式透空堤  $k_t$  比较

Fig. 9 Comparison of  $k_t$  for square perforated permeable breakwater on wave-back side

由图 9a)可知, 波高为 0.06 m, 当潜深为 -0.03 m 时,  $k_t$  值先增大后减小, 当  $W/L=0.138$  和  $W/L=0.212$  时,  $k_t$  最大和最小值分别为 0.88 和 0.65。潜深为 0.03 m, 当  $W/L=0.118$  和  $W/L=0.212$  时,  $k_t$  的最大和最小值分别为 0.84 和 0.47。潜深为 0 m 时,  $k_t$  值先增大后减小再增大, 当  $W/L=0.138$  时, 弧板式透空堤的  $k_t$  最大值为 0.88; 当  $W/L=0.212$  时, 最小值为 0.56。由图 9b)可知, 波高为 0.1 m, 当潜深为 0.03 m 时,  $k_t$  值变化较小, 总体呈减小趋势, 当  $W/L=0.103$  时,  $k_t$  最大值为 0.92;  $W/L=0.212$  时,  $k_t$  最小值为 0.71。潜深为 -0.03 m 时, 当  $W/L=0.103$  和  $W/L=0.212$  时,  $k_t$  的最大和最小值分别为 0.76 和 0.54。潜深为 0 m 时,  $k_t$  值先增大后减小, 当  $W/L=0.138$  时,  $k_t$  最大值为 0.94; 当  $W/L=0.166$  时,  $k_t$  最小值为 0.67。

整体而言, 当潜深为 -0.03 m 时, 背浪侧开方孔在两种波高下的透射系数整体上小于其他两种潜深。另一方面, 相对板宽为 0.212、潜深为 -0.03 m 时的透射系数最小, 此时的透射表现更好。

## 2.4.2 反射系数分析

弧板式透空堤背浪侧开方孔  $k_r$  的变化规律见图 10。

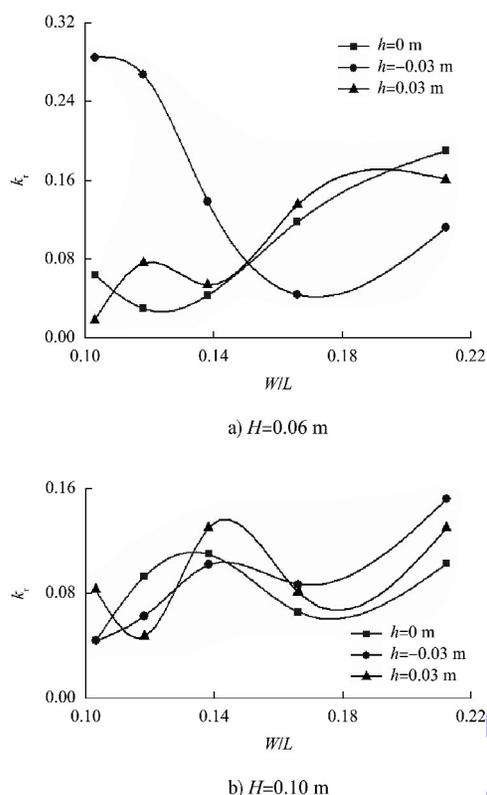


图 10 背浪侧开方孔式透空堤  $k_r$  比较

Fig. 10 Comparison of  $k_r$  for square perforated permeable breakwater on wave-back side

由图 10a) 可知, 波高为 0.06 m, 当潜深为 0.03 m 时,  $k_r$  值先增大后减小再增大, 最大和最小值分别为 0.161 和 0.018, 潜深为 -0.03 m 时,  $k_r$  值整体呈先减小趋势, 最大和最小值分别为 0.285 和 0.044; 潜深为 0 m 时,  $k_r$  值先减小后增大, 最大和最小值分别为 0.19 和 0.03。由图 10b) 可知, 波高为 0.1 m, 当潜深为 0.03 m 时,  $k_r$  值先减小后增大, 再逐渐减小后增大,  $k_r$  的最大和最小值分别为 0.130 和 0.047; 潜深为 0 m 时,  $k_r$  值先增大后减小再增大, 最大和最小值分别为 0.11 和 0.044; 潜深为 -0.03 m 时,  $k_r$  值整体呈逐渐增大的趋势, 最大和最小值分别为 0.152 和 0.044。

整体而言, 波高为 0.06 m, 当潜深为 -0.03 m、相对板宽为 0.103 时的反射系数最大; 波高为 0.1 m, 当潜深为 -0.03 m、相对板宽为 0.212 时的反射系数最大, 此时的反射表现更好。

## 3 结论

1) 比较不同开孔方式的透射系数, 当开孔位置不变且处于迎浪侧时, 整体上方孔弧板式透空堤  $k_t$  值大于圆孔弧板式透空堤; 当开孔位置不变且处于背浪侧时, 整体上方孔弧板式透空堤的  $k_t$  小于圆孔弧板式透空堤。当开孔方式相同而位置不同时, 在弧板开方孔的情况下, 整体上背浪侧的  $k_t$  小于迎浪侧; 开圆孔情况下, 整体上背浪侧的  $k_t$  小于迎浪侧。

2) 比较不同开孔方式的反射系数, 当开孔位置不变且处于迎浪侧时, 整体上方孔弧板式透空堤的  $k_r$  大于圆孔弧板式透空堤; 当开孔位置不变且处于背浪侧时, 整体上方孔弧板式透空堤  $k_r$  大于圆孔弧板式透空堤。当开孔方式相同而位置不同时, 在弧板开方孔的情况下, 整体上背浪侧的  $k_r$  大于迎浪侧; 开圆孔情况下, 整体上背浪侧的  $k_r$  大于迎浪侧。

## 参考文献:

- [1] 吴瑶瑶, 李雪艳, 王庆, 等. 弧板式透空堤消浪性能影响因素数值研究[J]. 海洋工程, 2019, 37(2): 59-67.  
WU Y Y, LI X Y, WANG Q, et al. Numerical study on the influence factors of the wave attenuation performance of an arc-plate type open breakwater [J]. The ocean engineering, 2019, 37(2): 59-67.
- [2] 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.  
WANG L X, LI X Y, WANG Q, et al. Physical model test on wave dissipation characteristics of double arc-plate permeable breakwater [J]. Journal of Xiamen University (natural science), 2020, 59(4): 534-539.
- [3] 侯成义, 李雪艳, 孙家文, 等. 平弧板与双平板式透空堤消浪性能比较[J]. 水运工程, 2022(4): 1-7.  
HOU C Y, LI X Y, SUN J W, et al. Comparative study on wave attenuation performance of flat-arc-plate and twin-flat-plate breakwater [J]. Port & waterway engineering, 2022(4): 1-7.
- [4] 潘春昌, 王国玉, 任冰, 等. 圆弧板透空式防波堤消浪性能试验研究[J]. 海洋工程, 2014, 32(4): 33-40.  
PAN C C, WANG G Y, REN B, et al. Experimental study on the performance of arc-plate type breakwater [J]. The ocean engineering, 2014, 32(4): 33-40.

- [5] 王科, 施鹏飞, 陈彧超, 等. 水上上弧形板结构的水动力特性研究[J]. 船舶力学, 2016, 20(5): 549-557.  
WANG K, SHI P F, CHEN Y C, et al. Study on hydrodynamic characteristics of submerged upper arc-shaped plate type breakwater [J]. Journal of ship mechanics, 2016, 20(5): 549-557.
- [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] LI X Y, WANG L X, WANG Q, et al. A comparative study of the hydrodynamic characteristics of permeable twin-flat-plate and twin-arc-plate breakwaters based on physical modeling[J]. Ocean engineering, 2021, 219: 108270.
- [8] 刘必劲, 吴厚仪, 傅丹娟, 等. 双筒双板式浮式防波堤消浪性能研究[J]. 海洋通报, 2024, 43(4): 471-482.  
LIU B J, WU H Y, FU D J, et al. Study on the wave dissipation performance of double-cylinder and double-plate floating breakwater [J]. Marine science bulletin, 2024, 43(4): 471-482.
- [9] 唐忠时, 吴维武, 赵书恒, 等. 一种倒 $\pi$ 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.  
TANG Z S, WU W W, ZHAO S H, et al. Study on wave dissipation characteristics of inverted  $\pi$ -shaped floating breakwater[J]. Chinese journal of hydrodynamics(series A), 2023, 38(1): 52-58.
- [10] 于定勇, 高志洋, 窦志豪, 等. 一种反弧倾斜板透空防波堤结构消浪性能试验研究[J]. 海岸工程, 2023, 42(2): 111-120.  
YU D Y, GAO Z Y, DOU Z H, et al. Experimental study on the wave dissipation performance of a permeable breakwater structure with reverse-arc inclined plate[J]. Coastal engineering, 2023, 42(2): 111-120.
- [11] 刘传林, 韩新宇, 董胜. 半椭圆型防波堤水动力特性的数值模拟[J]. 工程力学, 2023, 40(10): 247-256.  
LIU C L, HAN X Y, DONG S. Numerical simulation of hydrodynamic characteristics of semi-elliptic breakwater[J]. Engineering mechanics, 2023, 40(10): 247-256.
- [12] 陈城, 陈新权, 杨启, 等. 翼板浮式防波堤消浪性能[J]. 水运工程, 2022(9): 8-14, 85.  
CHEN C, CHEN X Q, YANG Q, et al. Wave suppression performance of wing-plate floating breakwater[J]. Port & waterway engineering, 2022(09): 8-14, 85.
- [13] 季新然, 焦文翰, 车志伟, 等. 不规则波浪作用下带腹板型浮式防波堤的水动力特性研究[J]. 船舶力学, 2023, 27(5): 683-689.  
JI X R, JIAO W H, CHE Z W, et al. Numerical research on hydrodynamic characteristics of floating breakwaters with web under random wave action[J]. Journal of ship mechanics, 2023, 27(5): 683-689.
- [14] 杨沫遥, 李雪艳, 曲恒良, 等. 不开孔式与迎浪侧半开孔式水平板防波堤消浪性能比较研究[J]. 水运工程, 2024(4): 9-14, 27.  
YANG M Y, LI X Y, QU H L, et al. Comparison of wave-dissipation performance of horizontal plate breakwaters with non-perforated and semi-perforated on wave-facing side [J]. Port & waterway engineering, 2024 (4): 9-14, 27.

(本文编辑 王璁)

## 著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部