一种反弧倾斜板透空防波堤结构消浪性能试验研究

于定勇[1], 高志洋[1], 窦志豪[1], 曲 铭[1], 葛晓蕾[2]

（1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266404;
2. 济南市科学技术馆, 山东 济南 250002）

摘 要：在垂直板透空堤结构基础上，提出了一种反弧倾斜板透空防波堤结构。通过物模试验研究了该结构在规则波作用下的消浪性能，分析了在不同相对波高（H/d）、不同相对宽度（W/L）、不同反弧板开孔率（N_d）、不同下挡板布置方案情况下该结构波能耗散和透射的变化规律。结果表明：与垂直板透空堤结构相比，该结构有更好的消浪性能，在全部试验工况内，最大波能耗散系数 K_s 为 0.86，最小透射系数 K_t 仅为 0.17；N_d 对 K_s 和 K_t 影响较大，与其他 N_d 相比，N_d 为 11%～15% 时消浪性能较好，K_s 最大可提高 10%；当增设下挡板且前部下挡板长度不断增大时，K_s 不断减小，最小仅为 0.69；增设下挡板能明显减小波浪透射。本文研究结果可为相关工程设计提供参考。

关键词：反弧倾斜板；物理模型试验；波能耗散系数；透射系数；开孔率

中图分类号：TV139.2$^+$5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-3682（2023）02-0111-10

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20230104001

引用格式：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.

透空式防波堤结构具有工程用料少、施工便利、水体交换能力好等特点，受到了广泛的关注，在实际工程中具有良好的应用前景，因此设计出消浪性能优良的透空式防波堤结构至关重要。防波堤结构设计备受关注，前人提出了多种型式的透空式防波堤结构并研究其消浪性能。Neelamani 和 Rajendran[1] 提出“T”型和“倒 T”型两种透空式防波堤结构，并分别对比研究了两者的消浪性能，结果发现“T”型结构型式在同等条件下消浪性能更优。沈丽玉[2] 提出了一种由 2 块开孔垂直板组合而成的防波堤结构，研究了该结构透、反射系数随挡板开孔面积的变化规律。周效国等[3] 提出了一种多层直立挡板透空式防波堤结构，利用干扰水质点的运动轨迹来阻挡波浪的传播，以提高透空式防波堤结构的消浪性能。陶佳伟等[4] 结合“T”型和“倒 T”型透空式防波堤结构的特点，提出了一种“十”型防波堤结构，并通过物理模型试验研究了该结构的消浪性能。金凤等[5] 提出了一种“厂”型组合板式防波堤结构，并通过数值模拟研究了该结构的消浪性能。杜沛霖等[6] 提出了 2 种带有透浪通道的防波堤结构，对比研究了 2 种结构的消浪性能，分析了在不同波浪要素和不同结构参数下透射系数的变化规律。

在透空式防波堤结构型式备受关注的情况下，带有弧形或倾斜板的透空式防波堤结构逐渐成为研究焦点。潘春昌[7] 提出了一种多层弧形板式防波堤结构，通过物理模型试验，对比了水平板结构和弧形板结构的消浪性能，结果发现弧形板具有更好的消浪性能。赵利平等[8] 提出了一种新型反弧形面防波堤结构并对其进行了物理模型试验，研究了该结构的波浪力和反射特性，结果表明反弧

收稿日期：2023-01-04
资助项目：国家自然科学基金项目（51739010）
作者简介：于定勇（1964—），男，教授，博士生导师，主要从事海浪与海上结构物相互作用方面研究. E-mail: dyyu01@ouc.edu.cn

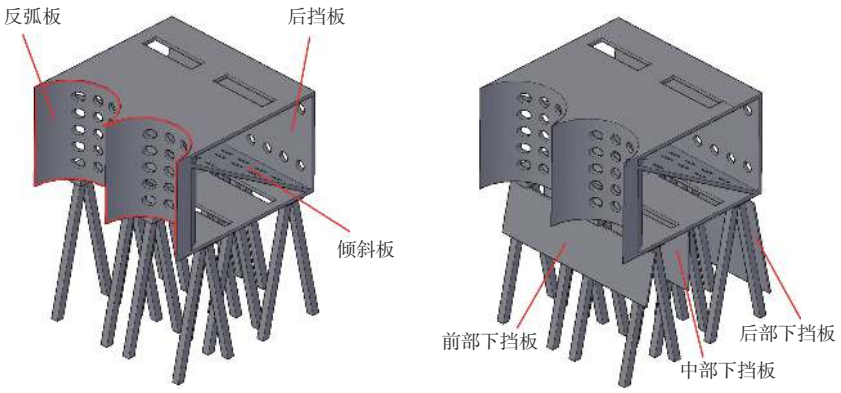
（王 燕 编辑）

形面防波堤结构的受力小于相同条件下的直立堤。吴瑶瑶等[9]基于 Fluent 数值软件研究了弧形板透空式防波堤结构的消浪性能，结果表明弧形板结构的消浪性能要优于水平板结构。王晓亮等[10]将反弧形结构应用于浮箱式防波堤，提出了一种新型带有反浪弧的浮箱式防波堤结构，基于 SPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）法的数值模拟和物理模型试验对比研究了该结构与矩形浮箱式防波堤结构的消浪性能，结果表明带有反浪弧的防波堤结构具有更大的波能耗散作用，消浪效果更优。基于在规则波作用下对弧形板水动力特性的研究，王丽雪[11]研究了不规则波与双弧形板的相互作用，并分析了该结构的消浪性能、受力特性和流场特性。Cho 和 Kim[12]根据二维线性势流理论和达西定律，研究了斜入射波与水平、倾斜和双层多孔板的相互作用，通过数值模拟和物理模型试验研究了结构的消浪性能。Rao 等[13]通过物理模型试验研究了浸没倾斜板结构的水动力特性。Gayen 和 Mondal[14]提出了一种在垂直波浪方向上对称的双倾斜板结构，通过数值模拟研究了该结构的消浪性能，结果表明 2 个对称倾斜板的反射系数大于 1 个倾斜板，同时小于 2 个垂直板。王国玉等[15]研究了±15°开孔倾斜板结构的消浪性能，得到了透射系数和反射系数随开孔率和相对宽度的变化规律，发现 15°开孔倾斜板对波能的耗散更佳。范玉平等[16]通过物理模型试验研究了一种双层开孔斜挡板透空式防波堤结构的消浪性能，结果表明开孔斜挡板较开孔平挡板具有更好的消浪性能。桂劲松和夏曦[17]通过数值模拟研究了前倾斜、后垂直的双层挡板的消浪性能和受力特性，结果发现倾斜挡板较垂直挡板消浪性能和受力特性更佳。

因此，弧形结构在具有良好的消浪性能的同时还兼有减小结构受力的特点，倾斜板较垂直、水平板具有更好的消浪性能，但目前缺少反弧板和倾斜板结合设计的防波堤结构和对其消浪性能的研究。基于此，本文提出了新型透空防波堤结构，通过物理模型试验研究了该结构的消浪性能与波浪条件和结构参数之间的关系。

1 一种反弧倾斜板透空防波堤结构

反弧倾斜板透空防波堤结构由 2 个消浪单元组成，每个消浪单元又可分为上部的消浪箱体和下部的桩基，每个消浪箱体由反弧板、倾斜板、垂直板及水平板构成，反弧板、倾斜板和垂直板均设置了开孔。为研究增设下挡板和不同下前挡板增设长度对波能耗散系数和透射系数的影响，在原有结构基础上，在防波堤下部的前、中、后各增设挡板，具体防波堤结构示意图见图 1。



(a) 未增设下挡板防波堤结构　　(b) 增设下挡板防波堤结构

图 1 反弧倾斜板透空防波堤结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the permeable breakwater structure with reverse arc inclined plate

由于斜桩较直桩受到水平荷载引起的桩轴向力较小[18]，同时考虑防波堤整体受力和抗震性能，桩基采用结对斜桩，斜桩倾斜角度 θ 均为 12°，共错列布置 3 排，桩基布置型式如图 2 所示。

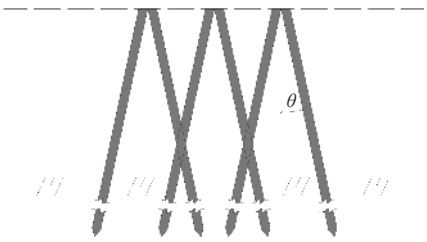


图 2　桩基布置型式

Fig. 2　Pattern of the pile foundation layout

2　物理模型试验

2.1　试验设备与仪器

该试验在中国海洋大学工程水动力学实验室的清水水槽中进行。水槽长 30 m，宽 1 m，高 1.8 m，最大工作水深为 1 m。在水槽的前端设有推板式造波机，由相对应的计算机系统控制，可造波高范围为 0.05～0.30 m，造波周期为 0.5～3.0 s，造出的波浪波形稳定，重复性好。水槽的末端设有多孔消波网，可以很大程度上减小波浪在末端的反射。波面采集使用 40 cm 波高传感器，接入 2018 型数据采集系统，系统终端能实时显示波高传感器位置处的波面数据。

2.2　模型制作与试验参数

根据重力相似准则设计了模型，采用的几何比尺 λ=20，模型材料采用有机玻璃板。具体结构模型如图 3 所示。

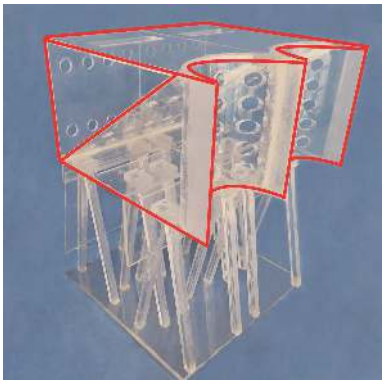
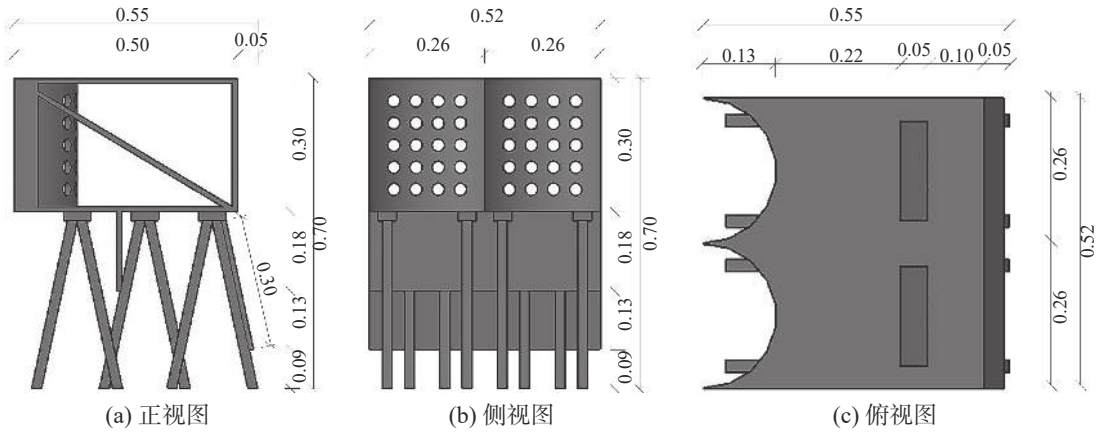


图 3　试验采用的反弧倾斜板透空防波堤结构模型

Fig. 3　The model of the permeable breakwater structure with reverse arc inclined plate used for the experiment

防波堤结构模型高 0.70 m，沿波浪传播方向宽 0.55 m，垂直于波浪传播方向长 0.52 m，板厚 0.01 m。上部消浪箱体中单个反弧板为半圆弧型，弧度为 180°，直径 0.26 m，高 0.30 m，倾斜、后部垂直、上、下水平板开孔率分别为 5%、7%、9%、10%。下部桩基高 0.40 m，单个桩柱采用 0.02 m×0.02 m 的方桩，防波堤中、后部下挡板增设长度分别为 0.18 m、0.30 m，前部下挡板增设长度 l 不固定，具体长度设置见表 1。具体防波堤结构尺寸如图 4 所示。



(a) 正视图　　(b) 侧视图　　(c) 俯视图

注：尺寸数据的单位为 m。

图 4　防波堤结构模型尺寸

Fig. 4　Dimensions of the breakwater structure model

为了使挡板开孔达到较好的消减波能效果，根据微幅波理论水质点运动的轨迹方程和周效国等[3]可知，挡板开孔半径应小于水质点的运动尺寸 a 和 b，且 a 和 b 由研究工况中最小波浪周期、最小波高和最大水深计算得到。水质点运动的轨迹方程为：

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2}+\frac{(z-z_0)^2}{b^2}=1, \tag{1}$$

式中：(x_0, z_0)为静水中水质点的坐标；(x, z)波浪运动中水质点的瞬时位置坐标；a 和 b 分别为运动尺寸长轴和短轴长度，$a=\frac{H}{2}\frac{\cosh k(z_0+d)}{\sinh kd}$，$b=\frac{H}{2}\frac{\sinh k(z_0+d)}{\sinh kd}$，其中 H 为波高，k 为波数，d 为水深。

本文最小波浪周期、最小波高和最大水深分别为 1.1 s、0.10 m 和 0.55 m，此时上部开孔消浪箱体底部距自由液面 0.15 m，即 z_0=−0.15 m，可得运动尺寸 a=0.029 m、b=0.027 m，并结合防波堤结构模型尺寸和挡板开孔率要求，最终确定了模型挡板开孔半径为 0.015 m。

在本次试验中，物理模型试验参数共设置 4 种不同的水深、4 种不同的波浪周期、1 种波高、4 种不同反弧板开孔率和 4 种不同下挡板布置方案，具体的物理模型试验参数如表 1 所示。

表 1 物理模型试验参数

Table 1 Parameters for the model test

d/m	T/s	H/m	W/m	N_d/%	下挡板布置方案
0.45	1.1	0.10	0.50	7	未增设下挡板
0.48	1.3	0.10	0.50	11	增设中、后部下挡板
0.50	1.6	0.10	0.50	15	增设下挡板且 l=0.15 m
0.55	1.9	0.10	0.50	18	增设下挡板且 l=0.30 m

注：d 为水深，T 为波浪周期，H 为波高，W 为堤宽，N_d 为反弧板开孔率，l 为下前挡板增设长度。

2.3 试验方案布置

将结构模型放置在距水槽造波机 12 m 处，在堤前和堤后共布置了 5 个波高仪。水槽的末端设有多孔消波网，可以很大程度上减小波浪在末端的反射。数据采集总时长为 60 s，采集间隔为 0.01 s。一组工况重复 3 次试验，试验过程中待水面平静后开始造波，在波面稳定后开始采集波面过程线，确保试验数据的有效性。具体试验方案布置如图 5 所示。

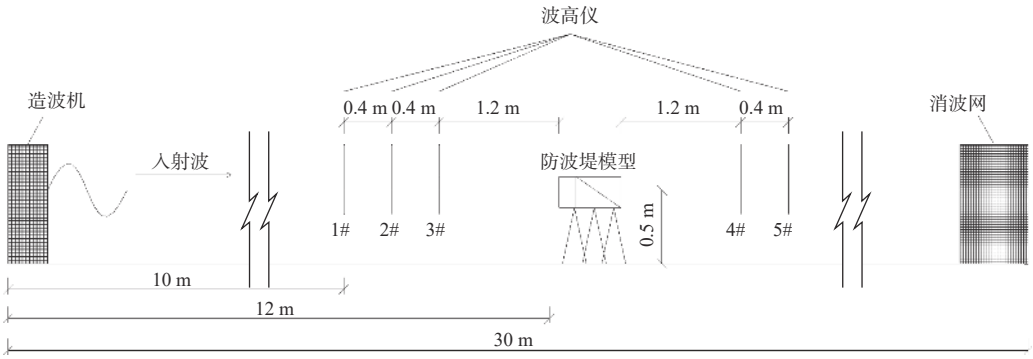


图 5 试验方案布置

Fig. 5 Arrangement of the test

2.4　试验数据处理

当波浪与防波堤结构作用时，会有一部分波浪透过防波堤结构传播至后方的水域，使得后方水域的水面发生波动。透射系数作为衡量堤后水面波动的重要指标，是透射波高与入射波高的比值，计算式为：

$$K_t = \frac{H_t}{H_i}, \tag{2}$$

式中：K_t 为透射系数；H_t 为透射波高；H_i 为入射波高。

防波堤结构堤前反射波与入射波相互叠加，导致反射波高和入射波高无法直接测得，而波高仪测得的波高数据是由两者叠加而成，可采用 Goda 两点法[19] 分离入、反射波高。在堤前布设 3 个波高仪以减小试验误差，使用入、反射波分离程序对堤前 3 个波高仪位置处的波面数据进行处理，得到 2 组结果，取两者的平均值，进而可得反射系数，计算式为：

$$K_r = \frac{H_r}{H_i}, \tag{3}$$

式中：K_r 为反射系数；H_r 为反射波高。

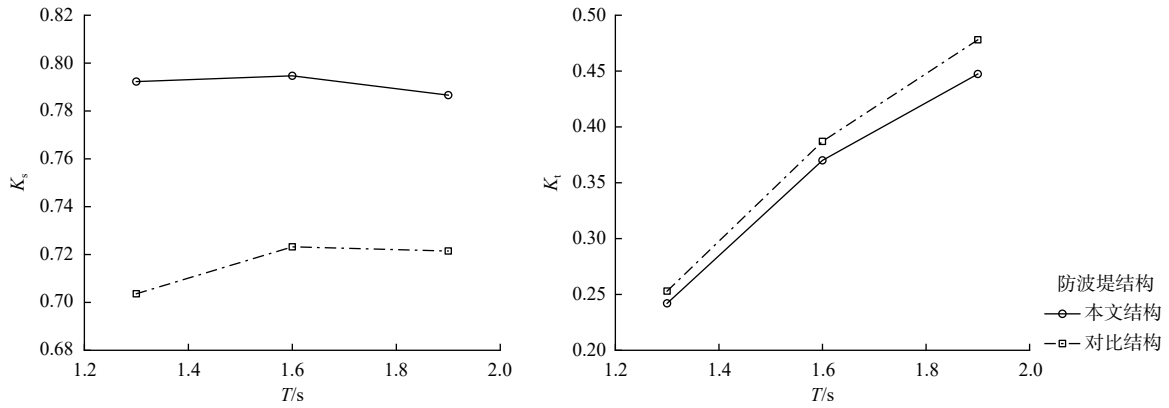
根据能量守恒定律，入射波能量应为反射波能量、透射波能量与耗散的能量之和，因此，波能耗散系数 K_s 计算式为：

$$K_s = \sqrt{1-(K_r^2 + K_t^2)}。 \tag{4}$$

3　结果分析

3.1　不同防波堤结构消浪性能对比分析

在波高 H=0.10 m，水深 d=0.50 m，波浪周期 T=1.3 s、T=1.6 s 和 T=1.9 s 情况下，对比本文防波堤结构与谢雨嘉[20] 中垂直板透空堤结构的 K_s 和 K_t 随 T 的变化情况（图 6）可见，本文防波堤结构较对比结构具有更好的消浪性能，波能耗散系数较大，透射系数较小，波能耗散最大可提高 12.9%，且随着周期的增大，2 种结构透射系数差距增大。



(a) 波能耗散系数　　(b) 透射系数

图 6　不同防波堤结构波能耗散系数 K_s 和透射系数 K_t 的对比

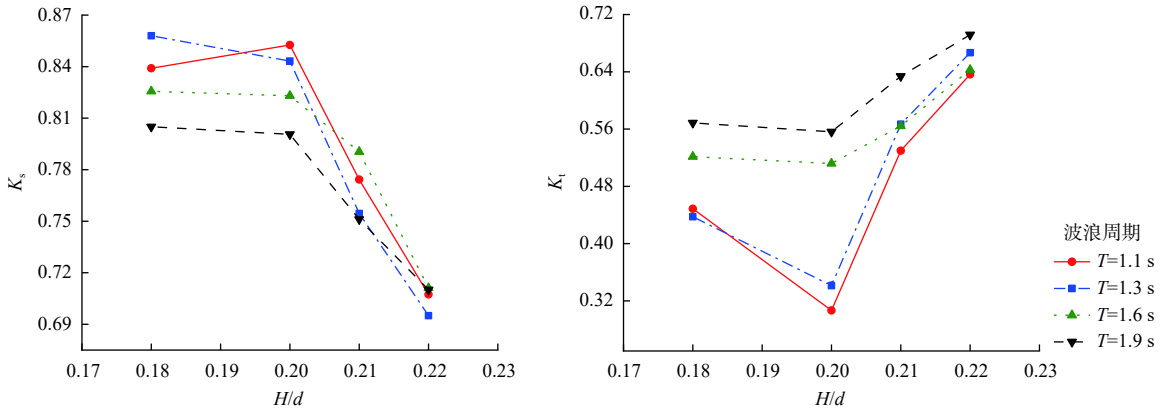
Fig. 6　The wave energy dissipation coefficient K_s and transmission coefficient K_t of different breakwater structures

3.2 不同波浪要素对消浪性能的影响

为探究相对波高和相对宽度对防波堤结构消浪性能的影响，在 H=0.10 m 、N_d=18% 且未增设下挡板的参数下进行了试验，具体结果分析如下。

3.2.1 相对波高对波能耗散系数和透射系数的影响

根据物理试验数据，分析在不同波浪周期下 K_s 和 K_t 随 H/d 的变化情况，如图 7 所示，结果表明：在试验范围内，H/d 对消浪性能的影响较为显著。除 T=1.1 s 情况外，K_s 随着 H/d 的增大而减小，且随着 H/d 的增大（从 0.18 增加到 0.25），T 对 K_s 的影响越来越小。在小周期 T=1.1 s 和 T=1.3 s 时，K_t 随着 H/d 变化幅度较大，变化率最大可达 52% 左右，且随着 H/d 的增大，K_t 先减小后增大，H/d=0.20 时 K_t 出现较小值（0.30），这可能与防波堤结构的开孔设计有关，当 H/d=0.20 时，静水面正好没过第一排开孔，位于第二排开孔的中间位置，此时透过的波浪正好能被中间的斜挡板挡住并反射回去，达到更好的消浪效果；而较大的相对波高使得更多的波浪从上部消浪箱体的下方绕流透射到堤后，导致消浪箱体并未起到很好的阻挡波浪和耗散波能作用。



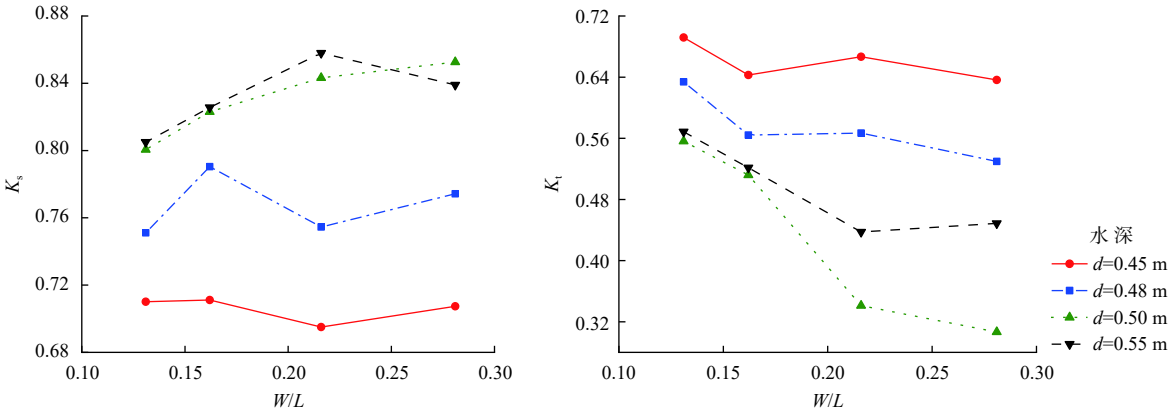
(a) 波能耗散系数 (b) 透射系数

图 7 波能耗散系数 K_s 和透射系数 K_t 随相对波高 H/d 的变化情况

Fig. 7 Variation of wave energy dissipation coefficient K_s and transmission coefficient K_t with relative wave height H/d

3.2.2 相对宽度对波能耗散系数和透射系数的影响

分析在不同水深下 K_s 和 K_t 随 W/L 的变化情况（图 8）可得：在试验范围内，W/L 对消浪性能影响也较为显著。K_s 随 W/L 变化时，其值均保持在 0.70 以上，最大可达到 0.86，该防波堤结构能够消减大量的波能，这主要与其独特的消浪结构有关，波浪与开孔反弧板相互作用消减部分波能，通过开孔进入到消浪箱体的波浪，会遇到倾斜板的阻挡，其中一部分波浪被倾斜板反射回去，并在第一个消浪室里发生剧烈的水体紊动；另一部分波浪在与开孔倾斜板作用的同时进入到第二个消浪室，进一步消减波能。在较小水深（d=0.45 m 和 d=0.48 m）处，K_t 随着 W/L 的增大发生波动，但变化较小；当 d 增大到 0.50 m 及以上时，K_t 随着 W/L 的增大而减小，尤其当 d=0.50 m 时，变化幅度最大，变化率可达到 46.4%。



(a) 波能耗散系数　　(b) 透射系数

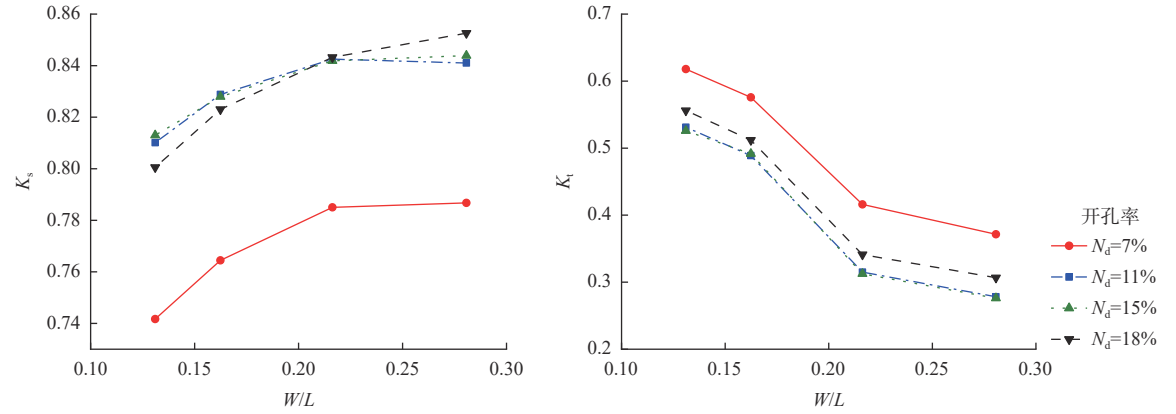
图 8　波能耗散系数 K_s 和透射系数 K_t 随相对堤宽 W/L 的变化情况

Fig. 8　Variation of wave energy dissipation coefficient K_s and transmission coefficient K_t with relative width W/L

3.3　不同结构参数对消浪性能的影响

3.3.1　反弧板开孔率对波能耗散系数和透射系数的影响

在 d=0.50 m 和 H=0.10 m 的情况下，对 4 种不同反弧板开孔率防波堤结构(未增设下挡板)进行了试验研究。分析 K_s 和 K_t 随 W/L 的变化情况(图 9)可得：K_s 在 N_d=7% 时最小，其他开孔率下 K_s 均较大且相差不多，当 W/L=0.22 时，K_s 相等，均为 0.84，最大波能耗散系数可提高 10% 左右。当 N_d 增大时，K_t 呈先减小后增大的趋势。总体而言，在试验范围内，4 种不同反弧板开孔率的防波堤结构均具有良好的消浪性能，而 N_d 在 11%～15% 的防波堤结构的消浪性能相对更优。



(a) 波能耗散系数　　(b) 透射系数

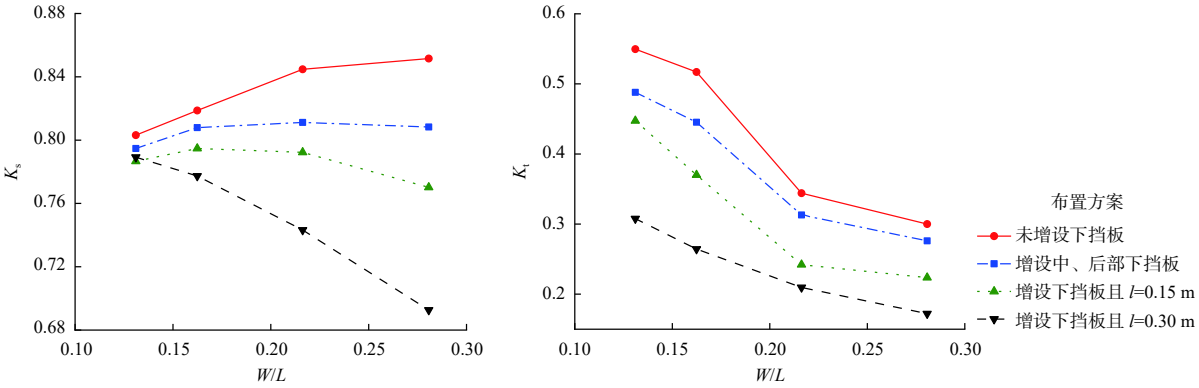
图 9　反弧板开孔率 N_d 对波能耗散系数 K_s 和透射系数 K_t 的影响

Fig. 9　Influence of the porosity N_d of the reverse arc plate on the wave energy dissipation coefficient K_s and the transmission coefficient K_t

3.3.2　下挡板布置方案对波能耗散系数和透射系数的影响

当 d=0.50 m 和 H=0.10 m 时，对 4 种不同下挡板布置的防波堤结构(N_d=18%)进行了试验研究，分析 K_s 和 K_t 随 W/L 的变化情况(图 10)可得：K_s 在未增设下挡板时随着 W/L 的增大而增大，在增设下挡板且 l 从 0 m 到 0.15 m 变化时，K_s 随着 W/L 的增大，变化较为平稳，当 l=0.30 m 时，K_s 大幅度

减小。当 W/L 不变时，除了在 W/L=0.13 时 l=0.30 m 比 l=0.15 m 处的 K_s 较大外，K_s 均随下挡板的增设和 l 的增大而不断减小，但最小也仅为 0.69。K_t 随着 W/L 的增大而不断减小，当 W/L 不变时，增设下挡板 K_t 明显减小且随着 l 的增加，K_t 逐渐减小，当 l=0.30 m 时，K_t 在任意 W/L 下均处于最低值。上述结果表明，在相对宽度较大、增设下挡板且 l=0.15 m 情况下，K_t 相对较小，K_s 相对较大，消浪性能更好。



(a) 波能耗散系数 (b) 透射系数

图 10 下挡板布置方案对波能耗散系数 K_s 和透射系数 K_t 的影响

Fig. 10 Influence of lower baffle layout scheme on wave energy dissipation coefficient K_s and transmission coefficient K_t

4 结 论

本文提出了一种反弧倾斜板透空防波堤结构，通过物理模型试验，研究了该结构在不同试验参数下的消浪性能，分析了相对波高、相对宽度对波能耗散和透射的影响。同时通过改变防波堤结构参数，进一步探究了不同反弧板开孔率、不同下挡板布置方案对消浪性能的影响，得到以下结论。

1)反弧倾斜板透空防波堤结构与垂直板透空堤相比，具有更大的波能耗散作用，消浪性能更优，在全部试验工况内，最大 K_s 值可达到 0.86，最小 K_t 值为 0.17。

2)相对波高、相对宽度均对防波堤结构消浪性能有一定的影响。H/d 增大，防波堤结构的 K_s 减小，K_t 先减小后增大，在 H/d=0.2 时防波堤结构具有较小的 K_t 值(0.30)；随着 W/L 的变化，K_s 在 0.70～0.86 内变化，其值均较大，且 W/L 越大，K_t 越小，即消浪效果越好。

3)根据 K_s 和 K_t 的变化情况，不同的反弧板开孔率、不同下挡板布置方案有不同的适用情况。随着 N_d 的增大，K_t 先减小后增大，当 N_d=11%、N_d=15% 和 N_d=18% 时，防波堤结构均具有较大 K_s 值；增设下挡板且增大 l，K_s 减小，K_t 增大。当对防波堤结构的消浪性能要求较高时，N_d 为 11%～15%，增设下挡板且 l 为 0.15 m 或 0.30 m 的防波堤结构较为适用；当对防波堤结构的消浪性能要求较低时，可不增设下挡板或仅增设中、后下挡板以提高防波堤结构的波能耗散作用，同时还可设置 N_d=18% 的反弧板。

在后续研究中，将继续研究在不规则波作用下不同波浪要素和不同结构参数该防波堤结构的消浪性能，并研究其结构受力和海床动力响应问题。

参考文献 (References):

[1] NEELAMANI S, RAJENDRAN R. Wave interaction with T-type breakwaters[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(2):

151-175.

[2] 沈丽玉. 双层开孔直立式消浪板结构研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2011. SHEN L Y. Research on two-lay perforated vertical type wave dissipation plate structure[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2011.

[3] 周效国, 李雨, 江沭淮. 多层直立开孔挡板透空式防波堤结构消浪性能试验研究[J]. 水运工程, 2014(1): 31-35. ZHOU X G, LI Y, JIANG S H. Experiment study on wave dissipation performance of permeable breakwater of multi-layer upright wave board with holes[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(1): 31-35.

[4] 陶佳伟, 吴静萍, 郑晓伟. “十”形防波堤消波性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(2): 349-352. TAO J W, WU J P, ZHENG X W. Experimental study on wave attenuation performance of 十-type breakwater[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2018, 42(2): 349-352.

[5] 金凤, 钱慧, 马佑. “厂”形板式防波堤结构消波性能数值模拟[J]. 水运工程, 2020(4): 15-21. JIN F, QIAN H, MA Y. Numerical simulation for wave dissipation mechanism of ‘厂’ -type breakwater[J]. Port & Waterway Engineering, 2020(4): 15-21.

[6] 杜沛霖, 孙昭晨, 梁书秀. 新型直立式透空堤消浪性能数值研究[J]. 海洋工程, 2021, 39(1): 12-20. DU P L, SUN Z C, LIANG S X. Numerical study on wave dissipation performance of new type vertical permeable breakwater[J]. The Ocean Engineering, 2021, 39(1): 12-20.

[7] 潘春昌. 多层圆弧板透空式防波堤水动力特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014. PAN C C. Experimental investigation on the hydrodynamic characteristics of arc-plate type breakwater[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

[8] 赵利平, 朱亚州, 谢奥运, 等. 弧形防波堤结构波浪力试验研究[J]. 海洋工程, 2015, 33(5): 35-41. ZHAO L P, ZHU Y Z, XIE A Y, et al. Experimental study on wave forces on curved breakwater[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(5): 35-41.

[9] 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.

[10] 王晓亮, 陈永焜, 刘勇, 等. 新型带反浪弧浮箱式防波堤消浪特性的数值和试验研究[J]. 水道港口, 2021, 42(5): 567-581. WANG X L, CHEN Y K, LIU Y, et al. Numerical and experimental study on wave dissipation characteristics of a new-type floating breakwater with anti-arc surface[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2021, 42(5): 567-581.

[11] 王丽雪. 随机波浪对双弧板式透空堤作用研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2021. WANG L X. Study on random wave action on twin-arc-plate permeable breakwater[D]. Yantai: Ludong University, 2021.

[12] CHO I H, KIM M H. Wave absorbing system using inclined perforated plates[J]. Fluid Mech, 2008, 608: 1-20.

[13] RAO S, SHIRLAL K G, VARGHESE R V, et al. Physical model studies on wave transmission of a submerged inclined plate breakwater[J]. Ocean Engineering, 2009, 36: 1199-1207.

[14] GAYEN R, MONDAL A. Water wave interaction with two symmetric inclined permeable plates[J]. Ocean Engineering, 2016, 124: 180-191.

[15] 王国玉, 赵唯佼, 项竹青, 等. 开孔倾斜平板消波效果试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(1): 22-26, 83. WANG G Y, ZHAO W J, XIANG Z Q, et al. Experimental study on wave-damping performance of porous inclined plate[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1): 22-26, 83.

[16] 范玉平, 李金宣, 柳淑学, 等. 双层开孔斜挡板透空式防波堤结构消浪性能研究[J]. 水运工程, 2020(7): 7-12. FAN Y P, LI J X, LIU S X, et al. Study on wave dissipation performance of permeable breakwater of double porous inclined baffle[J]. Port & Waterway Engineering, 2020(7): 7-12.

[17] 桂劲松, 夏曦. 倾斜挡浪板桩基透空堤水动力特性[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 32-38. GUI J S, XIA X. Hydrodynamic characteristics of permeable breakwater with inclined baffle on pile foundation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 32-38.

［18］ 王云岗, 章光, 胡琦. 斜桩基础受力特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2184-2190. WANG Y G, ZHANG G, HU Q. Study of force characteristics of battered pile foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2184-2190.

［19］ GODA Y, SUZUKI Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiment[C]//Proceedings of 15th Conference on Coastal Engineering. Honolulu, American, 1976.

［20］ 谢雨嘉. 一种新型桩基透空式结构防波堤及其水动力特性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2019. XIE Y J. Study on a new type of piled penetrated breakwater and its hydrodynamic characteristics[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2019.

Experimental Study on the Wave Dissipation Performance of a Permeable Breakwater Structure With Reverse-Arc Inclined Plate

YU Dingyong[1], GAO Zhiyang[1], DOU Zhihao[1], QU Ming[1], GE Xiaolei[2]

（1. *College of Engineering*, *Ocean University of China*, Qingdao 266100, China；
2. *Jinan Science and Technology Museum*, Jinan 250002, China）

Abstract: A permeable breakwater structure with reverse arc inclined plate is proposed on the basis of the permeable breakwater with vertical plate. Through the physical model tests, the wave dissipation performance of the proposed structure under the action of regular waves is studied and the variations of wave energy dissipation and transmission are analyzed under the conditions of different relative wave height (H/d), different relative width (W/L), different porosity of the reverse arc plate (N_d) and different lower baffle layout scheme. The results show that compared to the permeable breakwater structure with vertical plate, the proposed structure has a better wave dissipation performance. Within the scope of all the test operating conditions, the maximum wave energy dissipation coefficient (K_s) of the structure is 0.86 and its minimum transmission coefficient K_t is 0.17. The energy dissipation coefficient K_s and the transmission coefficient K_t are greatly affected by N_d. When the N_d ranges from 11% to 15%, the wave dissipation performance of the structure is better, with the K_s being maximally increased by 10%. When the lower baffle is added and the length of its front is increasing, the K_s decreases continuously, with the minimum value of K_s being only 0.69, implying that the adding of the lower baffle can significantly reduce the wave transmission. This study can provide reference for related engineering design.

Key words: reverse arc inclined plate； physical model test； wave energy dissipation coefficient； transmission coefficient； porosity

Received: January 4, 2023