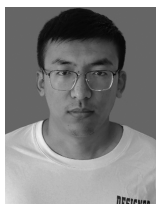


· 综 合 ·



# 平弧板与双平板式透空堤消浪性能比较<sup>\*</sup>

侯成义, 李雪艳, 孙家文, 万 祥, 解晓敏, 李 辉

(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:** 为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, 基于物理模型试验开展波浪与其相互作用的试验研究。结果表明: 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。在不同潜深条件下, 平弧板式透空堤的透射系数和反射系数均小于双平板式透空堤, 透射系数最高可减少 22%, 当相对板宽  $W/L=0.103$  时反射系数减小幅度最大为 82%。平弧板式透空堤能耗系数均大于双平板式透空堤, 相对板宽  $W/L$  在  $0.103\sim0.212$  范围内, 能耗系数平均增幅约为 22%。研究结果可为 2 种透空堤结构的工程应用提供必要的理论指导, 建议在实际工程中选择平弧板式透空堤。

**关键词:** 双平板式; 平弧板式; 透空堤; 透射系数; 反射系数; 能耗系数

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0001-07

## Comparative study on wave attenuation performance of flat-arc-plate and twin-flat-plate breakwater

HOU Cheng-yi, LI Xue-yan, SUN Jia-wen, WAN Xiang, XIE Xiao-min, LI Hui

(Coast Research Institute & Shandong Marine Aerospace Equipment Technological Innovation Center, Ludong University, Yantai 264025, China)

**Abstract:** To compare and analyze the wave-eliminating performance of the flat-arc-plate and the twin-flat-plate permeable breakwater structure under different incident wave conditions, we carry out an experimental study of the wave and its interaction based on the physical model test. The results show that the transmission coefficients of the flat-arc-plate and the twin-flat-plate transparent breakwater both fluctuate and decrease with the increase of the relative plate width, while the energy consumption coefficient is opposite. Under different diving depth conditions, the transmission coefficient and reflection coefficient of the flat-arc-plate transparent breakwater are both smaller than that of the twin-flat-plate transparent breakwater, and the transmission coefficient can be reduced by up to 22%. When the relative board width  $W/L=0.103$ , the maximum reduction in reflection coefficient is 82%. The energy consumption coefficient of flat-arc-plate permeable breakwater is greater than that of twin-flat-plate permeable breakwater. The relative  $W/L$  between the plates is in the range of  $0.103$  to  $0.212$ , and the average increase in dissipation coefficient is about 22%. The research results can provide necessary theoretical guidance for the application of the two permeable breakwater structures in engineering. It is recommended to choose the flat arc slab permeable dike in the actual project.

**Keywords:** twin-flat-plate type; flat-arc-plate type; permeable breakwater; transmission coefficient; reflection coefficient; dissipation coefficient

收稿日期: 2021-07-28

**\*基金项目:** 国家自然科学基金项目(51709140,41471005); 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:** 侯成义(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为岸线防护与利用。

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

随着我国经济社会的快速发展,港口、码头等海洋工程建设逐步向深海区域推进。与传统重力式防波堤所具有的不利于水体交换、破坏水域整体性、造价受水深影响较大等缺点相比,新型板式透空堤所具有的地基适应性强、结构简单、造价低、对环境破坏小等优点受到专家学者的广泛关注。

邱大洪等<sup>[1]</sup>在 1986 年提出单层板式防波堤结构。Neelamani 等<sup>[2]</sup>通过物理模型试验方法对双平板式透空堤与单层平板进行研究,指出双层板式透空堤消浪效果优于单层平板式防波堤;王晶等<sup>[3]</sup>提出一种新型双层板式防波堤,分析在不同波浪参数对透射系数和反射系数的影响以及相对波高、相对水深及相对淹没程度对防波堤消浪性能的影响;Li 等<sup>[4]</sup>利用速度边界造波法建立二维数值模型,综合分析双弧板和双平板式透空堤的透射系数、反射系数和能耗系数,结果显示在某些条件下,双弧板式透空堤的消浪效果更显著。He 等<sup>[5]</sup>采用光滑粒子流体动力学方法建立模型,验证了不同潮位变化对淹没水平板防波堤的水动力特性的影响,并给出不同潮位下的防波堤的布置方案。王科等<sup>[6]</sup>对平板周围的流场进行分析,揭示了板式防波堤的消浪原理;He 等<sup>[7]</sup>采用 WCSPH 方法探讨淹没水平板防波堤在波能转换应用中的最佳长度及淹没深度等,并给出波能转换效率的经验公式,证明了淹没水平板防波堤在波浪能利用方面的广阔前景。

Wang 等<sup>[8]</sup>提出一种多层弧板式透空堤结构,通过物理模型试验研究不同板间距和弧板层数对多层弧板式透空堤的消浪性能的影响;李雪艳等<sup>[9]</sup>基于 N-S 方程构建了波浪与板式透空堤相互作用的数值模型,对平板式、上弧板式和下弧板式 3 种透空堤开展了消浪性能数值研究,得出下弧板式透空堤的消浪性能最优的结论。潘春昌等<sup>[10]</sup>在不同入射波高条件下,对圆弧板和水平板式防波堤的消浪性能进行分析,探讨板间距等对透空堤消浪性能的影响;Li 等<sup>[11]</sup>通过数值模型和

物理模型试验研究弧板式透空堤的透射系数、反射系数和波压力随  $W/L$ 、 $d/h$ 、 $H/h$  的变化,为弧板式透空堤的工程应用提供了理论参考。

为进一步提高透空式防波堤的消浪性能,程永舟等<sup>[12]</sup>提出一种新型开孔工字板组合式防波堤,并分析规则波作用下透空堤的消浪性能与所受波浪力,结果表明该结构消浪效果良好,波能耗散大,波陡对防波堤波浪力荷载影响较大;Young 等<sup>[13]</sup>对半圆形防波堤的消浪性能进行研究,提出 2 种半经验参数化方法预测半圆形防波堤的反射系数;Korain 等<sup>[14]</sup>提出一种新型开孔式防波堤并对其消浪性能进行研究。

在前人研究的基础上,本文提出一种新型平弧板式透空堤结构,并将其消浪效果与双平板式透空堤相比较,以期在实际工程应用提供参考。

## 1 试验设置

本试验在长 60.0 m、宽 2.0 m、深 1.8 m 的物理水槽中进行(图 1)。平弧板式透空堤模型位于水槽中后部,水槽尾部设置碎石消浪区域削减波能以减少波浪反射。2 种透空堤模型均采用有机玻璃制成,见图 2a)和 c)。对于平弧板式透空堤,弧板位于平板下方。弧板高 0.05 m,透空堤长 0.79 m,宽 0.45 m,板厚 0.01 m,板间距  $S$  为 0.05 m,见图 2b)。双平板式透空堤板长、板宽、板厚和板间距均与平弧板式透空堤相同,见图 2d)。其中,板间距  $S$  表示上平板下表面到弧板顶点切线或平板上表面的距离,潜深  $h$  表示上平板上表面到静水面的距离,潜深  $h$  为正值表示透空堤为入水状态;潜深  $h$  为 0 表示透空堤上层平板上表面与静水面齐平;潜深  $h$  为负值表示透空堤为出水状态。根据 Goda 两点法计算波浪反射系数,透空堤迎浪向 1 倍波长之外布置 1#浪高仪,间隔不等于半倍波长整数倍距离布置 2#浪高仪。在透空堤背浪向 1 倍波长之外布置 3#浪高仪,用以计算波浪的透射系数。

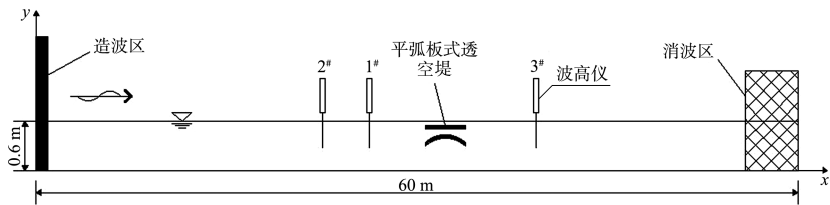
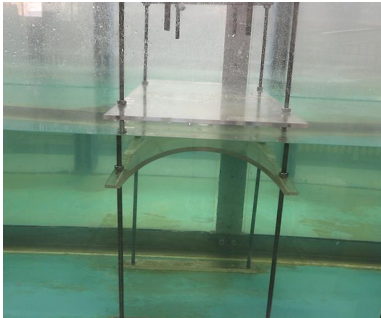
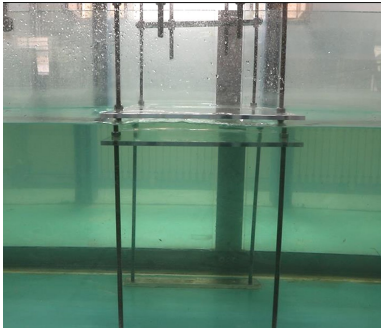


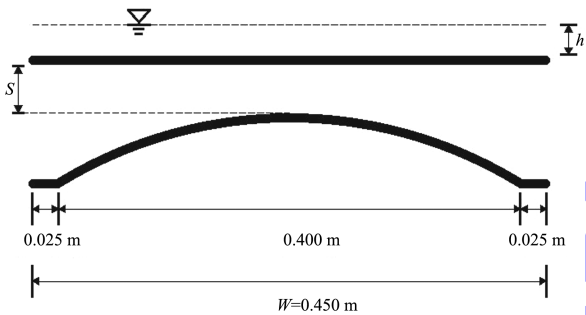
图 1 试验水槽布置



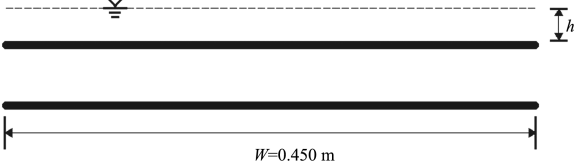
a) 平弧板式透空堤



c) 双平板式透空堤



b) 平弧板式透空堤示意



d) 双平板式透空堤示意

图 2 试验模型

试验采用规则波，试验工况如表 1 所示。为减小试验误差，每组工况进行 3 次试验，取 3 次试验结果的平均值。

表 1 试验工况

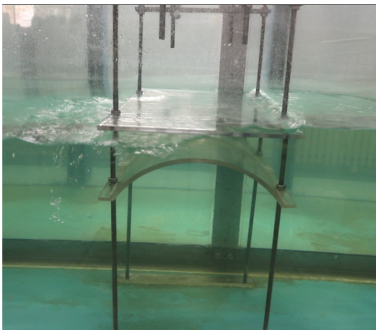
防波堤结构	水深 $d/\text{m}$	波高 $H/\text{m}$	周期 $T/\text{s}$	板间距 $S/\text{m}$	潜深 $h/\text{m}$
平弧板/双平板	0.60	0.06、0.10	1.2、1.4、1.6、1.8、2.0	0.05	-0.03、0、0.03

2 试验结果与分析

2.1 波面变化

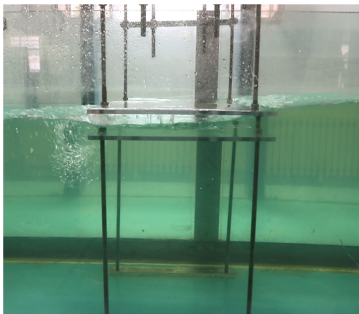
图 3 给出水深  $d=0.60\text{ m}$ 、周期  $T=1.6\text{ s}$ 、波高  $H=0.10\text{ m}$ 、板间距  $S=0.05\text{ m}$ 、潜深  $h=-0.03\text{ m}$  时，平弧板与双平板式透空堤结构物周围波面变化的比较。由图 3 可见，在一个波浪周期内， $t=0.25\text{ }T$ ，波浪刚刚达到透空堤附近，平弧板式透空堤两板之间出现较大的紊动，而双平板式透空堤下层板背浪向下方有漩涡产生； $t=0.5\text{ }T$  时，平弧板式透空堤迎浪向水体猛烈冲击上层平板，此时，双平板式透空堤迎浪向的水体紊动现象更加显著； $t=0.75\text{ }T$  时，平弧板式透空堤迎浪向水体开始回落，并激起浪花，而双平板式透空堤有

部分水体越过上层板上表面； $t=T$  时，平弧板式透空堤迎浪向水体几乎完全回落，并激起更大的浪花，双平板式透空堤的回落较弱，浪花较平弧板式透空堤迎浪向不显著。



a)  $t=0.25T$

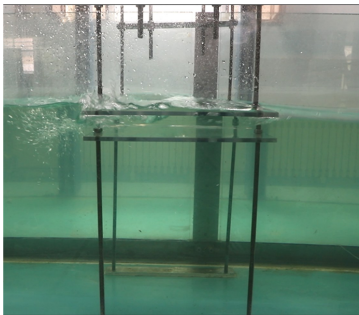




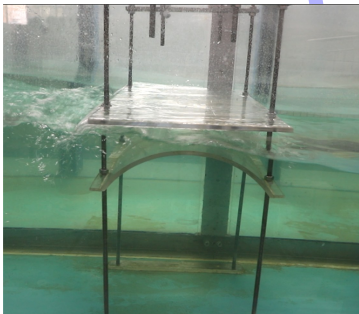
b)  $t=0.25T$



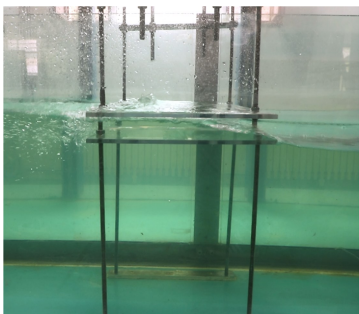
c)  $t=0.5T$



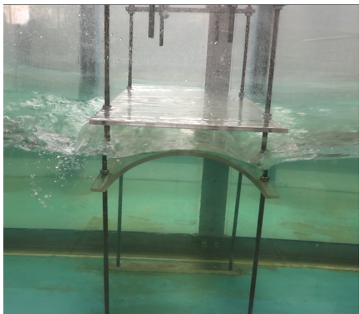
d)  $t=0.5T$



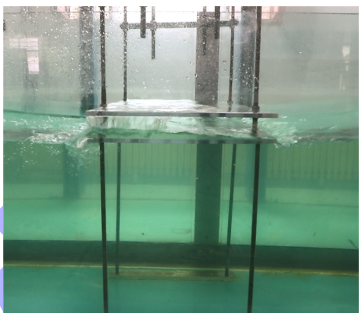
e)  $t=0.75T$



f)  $t=0.75T$



g)  $t=T$

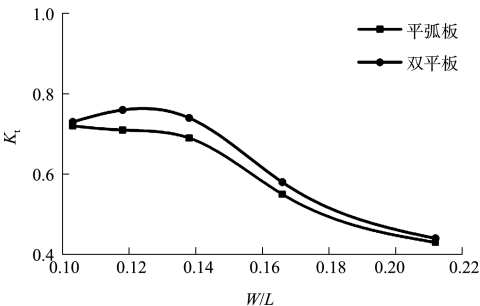


h)  $t=T$

图 3 平弧板与双平板式透空堤波面变化比较

2.2 透射系数

图 4 给出平弧板与双平板式透空堤在不同入射波高和潜深条件下的透射系数比较。由图 4 可见，相对板宽  $W/L$  在 0.103~0.212 范围内，潜深  $h$  为 -0.03 和 0、0.03 m 时，透射系数有随相对板宽增大而减小的趋势，且平弧板式透空堤的透射系数均小于双平板式透空堤。在本次试验的范围内，平弧板式透空堤的消浪效果更为显著，当  $T=1.2$  s、 $H=0.06$  m、 $S=0.05$  m、 $h=0.03$  m、 $W/L=0.166$  时，透射系数  $K_t$  最高减小幅度约为 22%。在一定的工况中相对板宽对透射系数的影响较为显著，适当增加相对板宽能减小透射系数，提高透空堤的消浪效果。



a)  $H=0.06$  m,  $S=0.05$  m,  $h=-0.03$  m

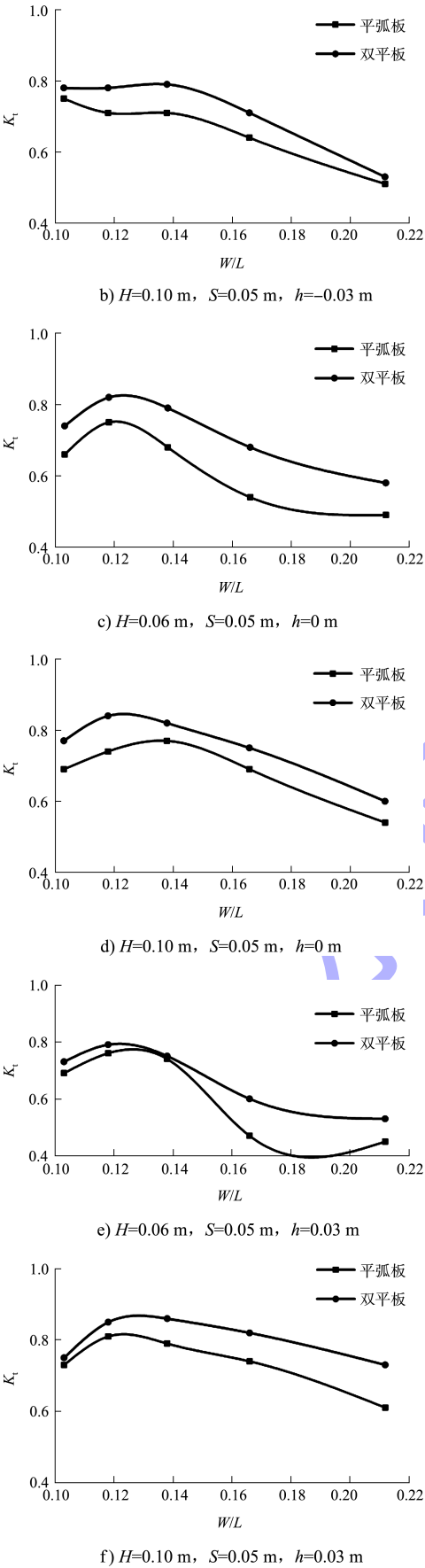
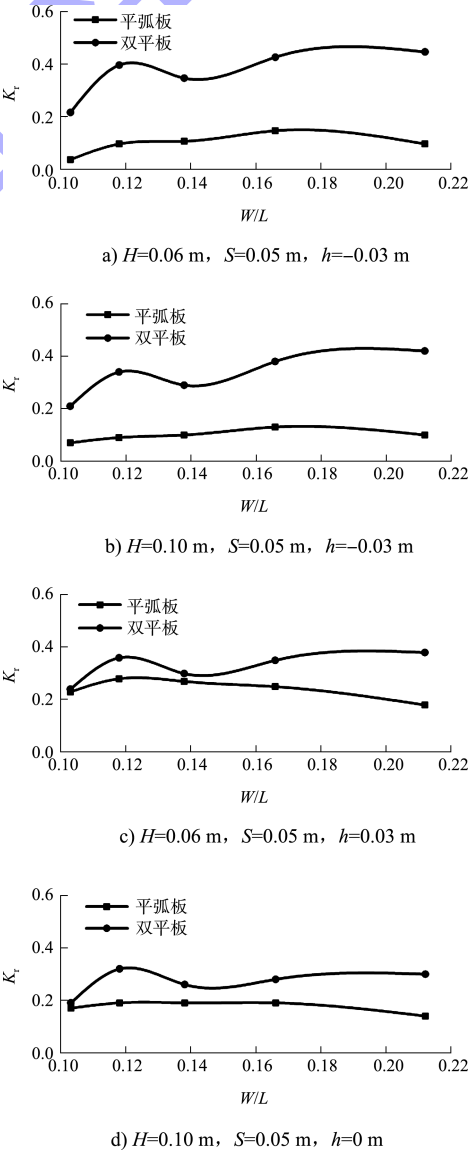


图 4 平弧板与双平板式透空堤透射系数比较

2.3 反射系数

图 5 给出在波高  $H=0.06$  和  $0.10\text{ m}$ 、板间距  $S=0.05\text{ m}$ 、潜深  $h=-0.03$ 、 $0$ 、 $0.03\text{ m}$  条件下的双平板式透空堤与平弧板式透空堤在不同入射条件的反射系数试验结果。结果表明：双平板式透空堤的反射系数明显大于平弧板式透空堤。在  $H=0.06$  和  $0.10\text{ m}$ 、 $S=0.05\text{ m}$ 、 $h=-0.03\text{ m}$  时 2 种透空堤的反射系数相差较大，当  $W/L$  等于  $0.103$  (即波浪周期  $T=2.0\text{ s}$ 、 $H=0.06\text{ m}$ ) 时，平弧板式透空堤的反射系数较双平式透空堤减幅最大为  $82\%$ 。当相对板宽  $W/L=0.103$  时，双平板式透空堤的反射系数最小，且平弧板式透空堤的反射系数在相对板宽  $W/L$  在  $0.103\sim0.212$  范围内时反射系数变化不显著。



d)  $H=0.10\text{ m}$ ,  $S=0.05\text{ m}$ ,  $h=0\text{ m}$

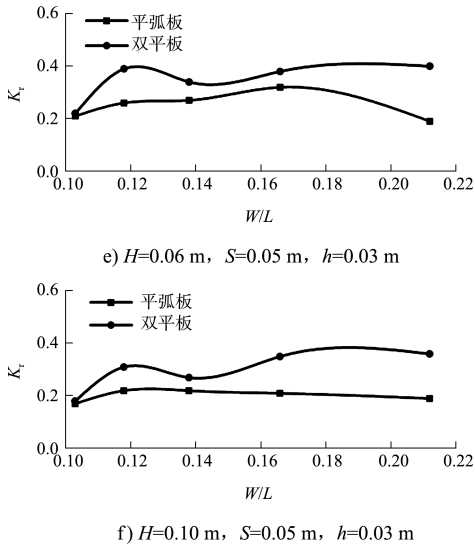


图 5 平弧板与双平板式透空堤反射系数比较

2.4 能耗系数

利用公式  $K_d^2 = 1 - K_r^2 - K_t^2$ ，通过对 2 种结构物的透射系数  $K_t$  和反射系数  $K_r$  的计算得出能耗系数  $K_d$ 。如图 6 显示在全部工况中平弧板式透空堤能消耗更多波浪能量，能耗系数更高，且随相对板宽的增大而增大。相较于双平板式透空堤，相对板宽  $W/L$  在 0.103~0.212 范围内，平弧板式透空堤的能耗系数  $K_d$  平均增幅约为 22%。由此可知，平弧板式透空堤的消浪性能优于双平板式透空堤。其原因在于当波浪打在弧板上时沿弧面爬升，消耗一部分波能，弧板同时破坏水质点的横向和竖向运动轨迹导致浅水效应比平板更显著，波能衰减比平板更快。

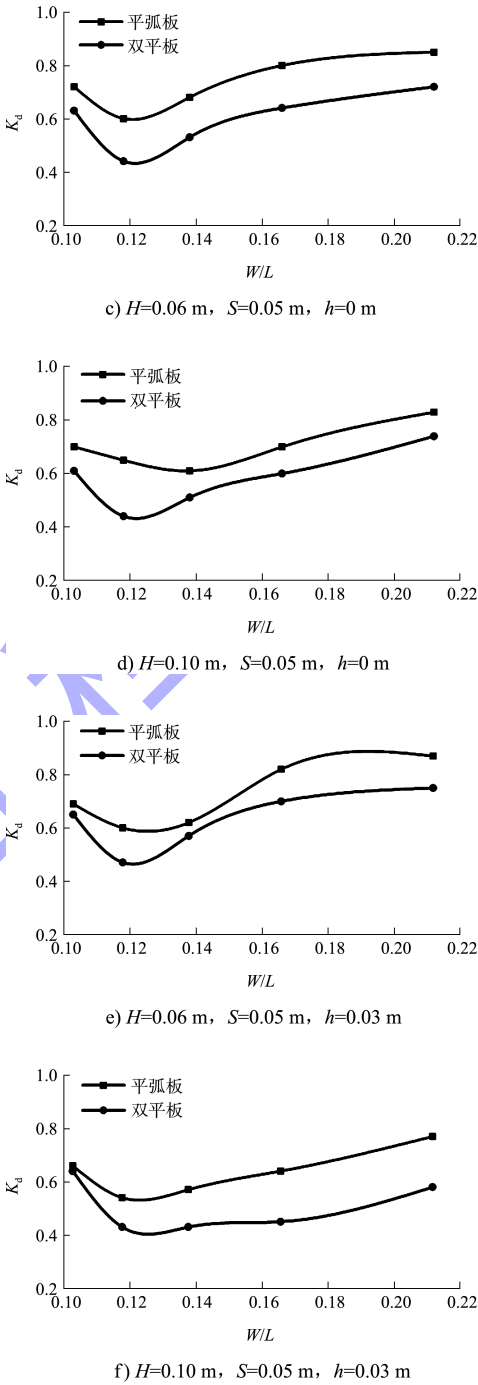
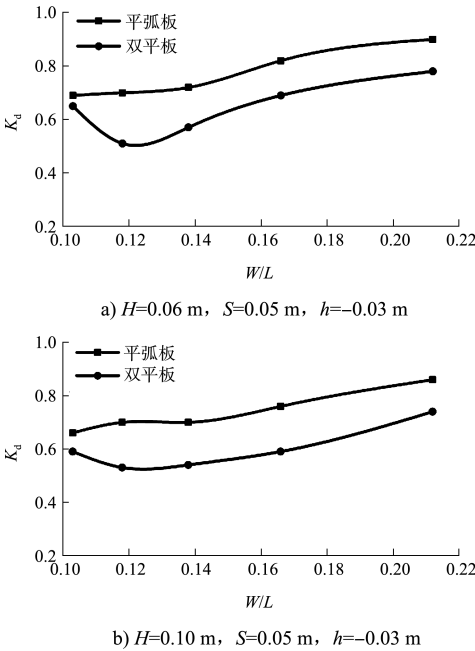


图 6 平弧板与双平板式透空堤能耗系数比较

3 讨论

当  $h=-0.03\text{ m}$  时，平弧板与双平板式透空堤的透射系数随相对板宽的增大而减小，能耗系数随相对板宽的增大而增大，此时，平弧板式透空堤的透射系数、反射系数小于双平板式透空堤，其能耗系数大于双平板式透空堤，表明平弧板式透空堤能加剧波浪水体破碎紊动，消耗更多的波能。当  $h=0\text{ m}$  和  $0.03\text{ m}$  时，平弧板式透空堤的透

射系数较双平板式透空堤最高减小约 22%。3 种潜深状态下，平弧板式透空堤的能耗系数较双平板式透空堤平均增幅约为 22%。其原因在于平弧板式透空堤的弧板两端增加了结构入水深度，能削弱波浪传播过程中的能量输送，提高平弧板式透空堤的消浪性能。综上所述，平弧板式透空堤的消浪性能优于双平板式透空堤，建议在实际工程中采用。

4 结论

1)在相同情境下，平弧板与双平板式透空堤的透射系数均随相对板宽的增大而减小，而反射系数随相对板宽的增大变化不显著。平弧板式透空堤的透射系数与反射系数均小于双平板式透空堤，当  $T = 1.2\text{ s}$ 、 $H = 0.06\text{ m}$ 、 $S = 0.05\text{ m}$ 、 $h = 0.03\text{ m}$ 、 $W/L = 0.166$  时，平弧板式透空堤的透射系数较双平板式透空堤的减小量最大，约为 22%；当  $T = 2.0\text{ s}$ 、 $H = 0.06\text{ m}$ 、 $S = 0.05\text{ m}$ 、 $h = -0.03\text{ m}$ 、 $W/L = 0.103$  时，平弧板式透空堤的反射系数较双平板式透空堤的减小量最大，约为 82%。

2)综合分析透射系数与能耗系数可知，在本次试验范围内，平弧板式透空堤的透射系数较双平板式小，而其能耗系数较双平板式透空堤大。可见，平弧板式透空堤能够更大程度地阻止波浪透过，对后方掩护港区的保护效果更佳，且其在相同情况下能够损耗更多的波浪能量，故建议在实际工程中采用平弧板式透空堤。此外，适当增大板宽，也可达到较好的防浪效果。

参考文献：

[1] 邱大洪, 王学庚.深水薄板式防波堤的理论分析[J].水运工程, 1986(4): 8-12.

[2] NEELAMANI S, GAYATHRI T. Wave interaction with twin plate wave barrier[J]. Ocean engineering, 2005, 33(3): 495-516.

[3] 王晶, 程永舟, 杨小桦, 等.新型透空板式防波堤消浪效果试验研究[J].船舶力学, 2015, 19(Z1): 86-94.

[4] LI X Y, XIE T, WANG Q, et al. Numerical study of the wave dissipation performance of two plate-type open breakwaters based on the Navier-Stokes equations[J]. Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering, 2021, 43(4): 1-18.

[5] H E M, XU W, GAO X, et al. The layout of submerged horizontal plate breakwater ( SHPB) with respect to the tidal-level variation[J]. Coastal engineering journal, 2018, 60(3): 280-298.

[6] 王科, 张志强, 贺大川.水下平板式防波堤流场分析[J].船舶力学, 2013, 17(4): 360-368.

[7] HE M, GAO X F, XU W H, et al. Potential application of submerged horizontal plate as a wave energy breaker: A 2D study using the WCSPH method[J].Ocean engineering, 2019, 185: 27-46.

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

[9] 李雪艳, 王庆, 朱小松, 等.不同板式透空堤消浪性能的数值研究[J].船舶力学, 2019, 23(10): 1198-1209.

[10] 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.

[11] LI X Y, LI Q, WANG Q, et al. Numerical and experimental investigation on the hydrodynamic characteristics of an arc-shaped plate-type breakwater under the action of long-period waves[J]. Ocean engineering, 2021, 219: 108198.

[12] 程永舟, 胡有川, 鲁显赫, 等.新型开孔工字板组合式防波堤消浪特性与波浪力试验[J].长沙理工大学学报 (自然科学版), 2016, 13(2): 61-69.

[13] YOUNG D M, TESTIK F Y. Wave reflection by submerged vertical and semicircular breakwaters [J]. Ocean engineering, 2011, 38(10): 1269-1276.

[14] KORAIM A S, HEIKAL E M, ZAID A A A. Hydrodynamic characteristics of porous seawall protected by submerged breakwater[J]. Applied ocean research, 2014, 46: 1-14.

( 本文编辑 郭雪珍)