



# 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 \*

杨沫遥，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：**为了提升水平板防波堤的消浪性能与透水性能，设计一种迎浪侧半开孔式水平板防波堤。在不同相对板宽、潜深及波高条件下，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透射系数  $K_t$ 、反射系数  $K_r$  及耗能系数  $K_h$ ，系统对比两种水平板防波堤的消浪性能。结果表明，在试验参数条件下，迎浪侧半开孔式水平板防波堤的透射系数整体上小于不开孔式水平板防波堤，且两种水平板防波堤的透射系数均在相对板宽为 0.166 或 0.212 时达到最小值；两种水平板防波堤反射系数的变化趋势相近，迎浪侧半开孔式水平板防波堤的反射系数整体偏小；迎浪侧半开孔式水平板防波堤的耗散系数整体大于不开孔式水平板防波堤，在相对板宽为 0.166 或 0.212 时达到最大值。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。

**关键词：**水平板防波堤；开孔；相对板宽；消浪性能

中图分类号：U656.2；TV139.2

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)04-0009-06

## Comparison of wave-dissipation performance of horizontal plate breakwaters with non-perforated and semi-perforated on wave-facing side

YANG Moyao, LI Xueyan, QU Hengliang, WANG Yukun, CHEN Lankai

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

**Abstract:** To improve the wave-dissipation and water permeability of the horizontal plate breakwater, we design a horizontal plate breakwater with semi-perforated on wave-facing side. Under different conditions of relative plate width, submerged depths, and wave heights, we use physical modeling tests to study the transmission coefficient  $K_t$ , reflection coefficient  $K_r$ , and energy dissipation coefficient  $K_h$  of the two types of horizontal plate breakwaters including the non-perforated type and the semi-perforated on the wave-facing side type, and systematically compare the wave-dissipation performances of the two types of horizontal plate breakwaters. The results show that under test parameters, the transmission coefficient of the semi-perforated horizontal breakwater on the wave-facing side is smaller than that of the non-perforated horizontal breakwater, and the transmission coefficients of the two types of horizontal plate breakwaters both reach the minimum value when the conditions of relative plate widths are 0.166 or 0.212. While the trend of the reflection coefficients of the two types of horizontal breakwaters is similar, and the reflection coefficients of the semi-perforated horizontal breakwater on the wave-facing side are small. The overall reflection coefficients of the two types of horizontal plate breakwaters are similar in trend, and the overall reflection coefficients of the semi-perforated horizontal plate breakwaters on the wave-facing side are small; the overall energy dissipation coefficients of the semi-perforated horizontal plate breakwaters on the wave-facing side are larger than that of the non-perforated horizontal plate breakwaters, and they reach the maximum values when the relative widths are 0.166 or 0.212. The wave dissipation performance of the horizontal plate breakwater with semi-perforated on the wave-facing side is better than that of the non-perforated breakwater.

**Keywords:** horizontal plate breakwater; perforated; relative plate width; wave-dissipation performance

收稿日期：2023-07-28

\*基金项目：山东省自然科学基金面上项目 (ZR2022ME145)

作者简介：杨沫遥（1999—），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：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

随着我国海洋强国战略的推进，海洋经济成为了推动国民经济发展的重要引擎，海岸工程的发展潜力巨大，而防波堤为各式各样的海岸工程提供了安全平稳运作的基础条件。目前已有的防波堤大多是传统式防波堤，虽然具有较好的防浪效果，但造价较高、施工周期较长。同时，随着海洋生态环境保护方面的观念越来越强，传统防波堤却会对海洋的水体交换造成较大影响，所以水平板防波堤等新式防波堤开始受到更多学者的关注。

水平板防波堤相关的研究始于在 20 世纪 50 年代，Heins<sup>[1]</sup>基于势函数以及 Wiener-Hopf 方法，提出了半无限长水平板防波堤的透反射系数理论表达式；Stoker<sup>[2]</sup>用数学方法分析具有一定潜深的固定水平板防波堤对于长波的消浪性能；Carmignani 等<sup>[3]</sup>通过使用二维光滑粒子 (smoothed particle hydrodynamics, SPH) 方法研究水平板防波堤的水动力特性；高俊亮等<sup>[4]</sup>利用 OpenFOAM 开源流体计算软件对水平板在孤立波作用下的水动力特性进行了数值模拟研究，得到水平板在孤立波作用下透反射系数随板宽和相对净空比的变化规律；卢超等<sup>[5]</sup>通过试验研究双层水平板在斜向波、畸形波和不规则波作用下的水动力特性，分析相对板宽、相对波高及相对水深对结构物透射系数的影响，并阐述其消浪机理；李雪艳等<sup>[6]</sup>对上、下弧板防波堤与水平板防波堤在各项水动力指标下的消浪效果进行对比，得到下弧板防波堤的消浪性能最优的结论；Wang 等<sup>[7]</sup>通过物理模型试验研究多层弧板防波堤结构，给出多层板结构在不同板间距和板层数时的消浪性能。这些研究对于不同类型的水平板防波堤水动力特性及其工程优缺点进行详尽的分析，但在防波堤结构设计上仍有一定的改进空间。

对结构物进行开孔处理会对该结构物的消浪效果和透水性产生一定的影响。开孔措施在沉箱式防波堤得到广泛应用。Ketabdri 等<sup>[8]</sup>构建开孔防波堤透反射系数的计算模型，并利用该模型研究

相对消波室宽度、相对波高、波周期和开槽壁孔隙率等有效参数对透射以及反射系数的影响，认为适当调整结构物的几何参数可降低反射系数，并给出特定工况下的计算方法与公式；Tabet-Aoul 等<sup>[9]</sup>通过二维模型试验总结了开孔沉箱防波堤表面压力分布计算方法，并在实际工程中进行验证；施晓迪等<sup>[10]</sup>对迎浪侧不同开孔率的沉箱进行物理模型试验，探讨沉箱开孔率对结构物反射系数的影响，得到开孔沉箱的最佳开孔率范围；姚卓琳<sup>[11]</sup>提出一种新型半潜式 Jarlan 型防波堤，并对该结构的透、反射和耗能系数进行试验分析，研究表明开孔结构的反射系数比实体结构小，且耗能系数更大，对小周期波浪的消浪效果更好。在重力式沉箱甚至是支撑结构上开孔不仅提高防波堤的经济效益，并且能显著提升防波堤的消浪性能，所以在板式防波堤的应用研究上开孔措施也受到了广泛关注。Huang 等<sup>[12]</sup>通过对物理模型试验结果与理论计算结果，基于波长理论，验证在不同波高、结构物与压强因素下，二维开孔板的透反射系数计算公式；郭传胜等<sup>[13]</sup>通过模型试验研究双层开孔水平板防波堤在规则波作用下的水动力特性，得到相对板间距与透射系数、潜深与消浪效果的关系，并对结构不同位置的受力进行分析。

本文以已有的水平板防波堤水动力特性研究为基础，提出一种新型迎浪侧半开孔式水平板防波堤结构，对其消浪效果进行研究，并与不开孔式水平板防波堤进行比较。

## 1 物理模型试验

### 1.1 试验设备与模型设计

本文试验均在鲁东大学港口海岸及近海工程实验中心波流水槽中进行，水槽长 60.0 m、宽 2.0 m、高 1.8 m，如图 1 所示。水槽前段是由伺服电机驱动的推波板造波机，尾部为倾斜设置的消浪区。试验设备主要有操作台、造波主机、数据采集仪、浪高仪，水槽系统的整个外框架及其

隔断均为玻璃材质。水平板防波堤布置在中部试验段, 在其前后两侧共布置 4 个浪高仪, 用于采集入射波、反射波及透射波, 进而分析水平板防波堤的消浪特性。

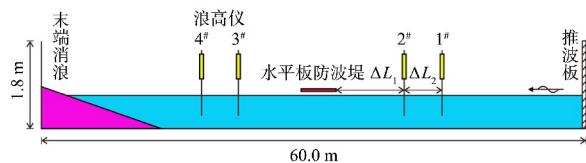


图 1 水槽及模型布置

尾部消浪区由大小不一的不规则棱角石块堆砌而成, 堆积为斜坡状, 坡长 6.3 m、宽 1.8 m, 坡度为 1:5。浪高仪长 0.77 m, 其中 1#、2#浪高仪根据 Goda 两点法进行布置, 对入、反射波进行分离, 用以计算波浪反射系数。2#浪高仪靠近水平板防波堤, 与水平板防波堤的距离  $\Delta L_1 = 4.46$  m, 大于试验所设工况的最大波长, 1#浪高仪靠近推波板, 与 2#浪高仪距离  $\Delta L_2 = 0.74$  m, 不等于试验所设任意工况的半倍波长。同时, 3#、4#浪高仪与 1#、2#浪高仪对称布置检测透射波, 用以计算透射系数。

试验模型为单层水平板防波堤, 材质为有机玻璃, 分为不开孔水平板防波堤(P-BK)和迎浪侧半开孔水平板防波堤(P-FK-YK)。水平板的长、宽及厚度分别为 0.79、0.45 及 0.01 m。一般来说, 结构物迎浪侧半开孔的消浪性能优于其他开孔位置。因此, 本文采用迎浪侧方形孔洞对称开孔的形式, 与不开孔水平板防波堤做对比分析, 它们的尺寸及开孔布置见图 2。开孔参数为: 方形孔边长为 0.03 m, 布置 8 行 3 列, 共 24 个孔。分布在迎浪向对称轴最近的方形孔与短对称轴的间距为 0.105 m, 最外侧两行方形孔距板短边 0.02 m, 最内侧一列方形孔距离长对称轴 0.03 m, 最外侧一列方形孔距离板长边为 0.045 m, 方形孔的行、列间距分别为 0.05、0.03 m, 开孔率为 6.83%; 开孔位置为以垂直迎浪向对称轴为分界线的迎浪侧。

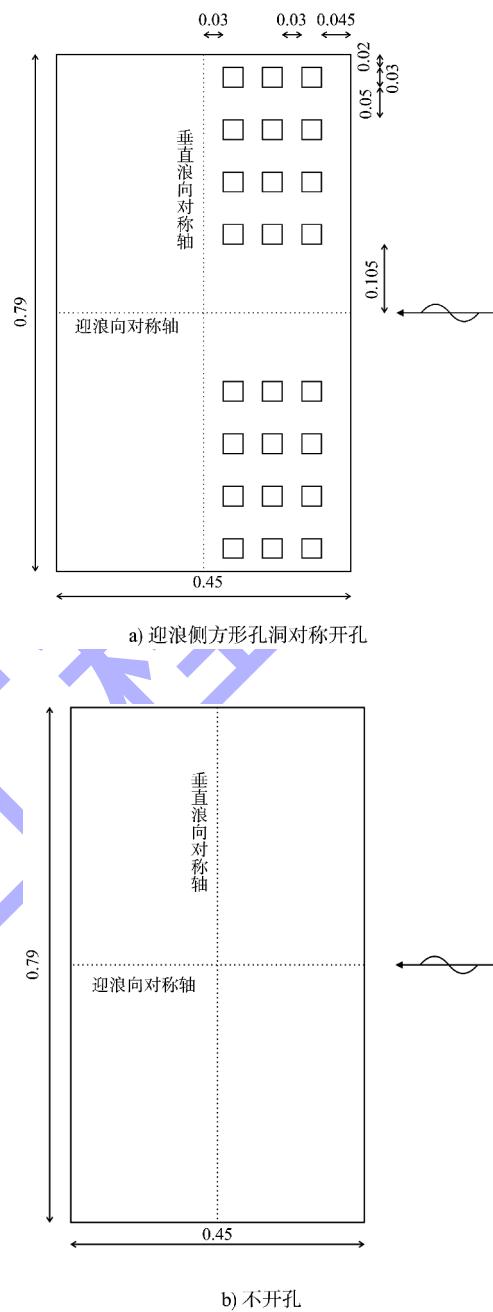


图 2 迎浪侧半开方形孔和不开孔水平板防波堤  
(单位: m)

## 1.2 试验工况

试验使用规则波, 水深  $d$  为 0.6 m, 水平板防波堤结构物为不开孔式和迎浪侧半开方形孔 2 种形式, 波高  $H$  为 0.06、0.10 m, 潜深  $h$  为 -0.03、0、0.03 m, 周期  $T$  为 1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 s, 对应波长  $L$  分别为 2.12、2.71、3.27、3.82 和 4.36 m。模型宽度  $W$  为 0.45 m, 得到 5 种相对板宽  $W/L$  为 0.212、0.166、0.138、0.118 和 0.103。

## 2 结果与分析

### 2.1 透射系数 $K_t$

不开孔式水平板防波堤与迎浪侧半开方孔式水平板防波堤在不同相对板宽、潜深及波高作用下  $K_t$  的变化规律见图 3。

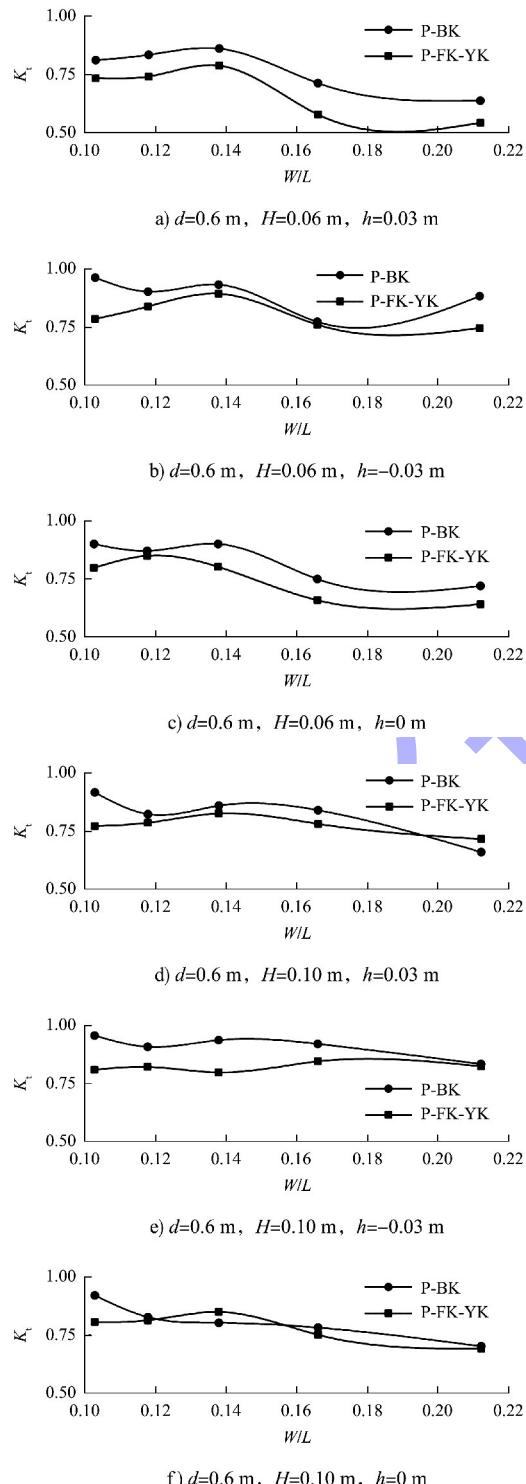


图 3 不开孔式与迎浪侧半开方孔式水平板防波堤  $K_t$  比较

由图 3a) 可知, 当波高为 0.06 m、潜深为 0.03 m 时, 两结构物透射系数均呈现先增大后减小的变化趋势, 迎浪侧半开孔式水平板防波堤透射系数整体小于不开孔式水平板防波堤, 当相对板宽为 0.166 时, 最大差距为 0.135; 由图 3b) 可知, 当波高为 0.06 m、潜深为 -0.03 m 时, 两结构物透射系数呈相似的变化趋势, 迎浪侧半开孔式水平板防波堤透射系数整体略小于不开孔式水平板防波堤, 当相对板宽为 0.103、0.212 时, 两透射系数差分别为 0.187、0.137; 由图 3c) 可知, 当波高为 0.06 m、潜深为 0 m 时, 两结构物透射系数变化趋势略有差异, 当相对板宽在 0.103 ~ 0.138 时, 不开孔式水平板防波堤的透射系数呈先减小后增加趋势, 迎浪侧半开孔式水平板防波堤的透射系数呈先增加后减小趋势。整体上迎浪侧半开孔式水平板防波堤的透射系数小于不开孔式水平板防波堤, 最大差距为 0.102。

由图 3d)、f) 可知, 当波高为 0.1 m、潜深为 0.03 和 0 m 时, 两结构物的透射系数差距极小, 甚至有迎浪侧半开孔式水平板防波堤的透射系数大于不开孔式水平板防波堤的情况出现; 同时由图 3e) 可知, 当潜深为 -0.03 m 时, 开孔式水平板防波堤的透射系数上下变化不大, 但整体小于不开孔式水平板防波堤。

整体而言, 当波高为 0.06 m 时, 迎浪侧半开孔式水平板防波堤的透射系数较明显小于不开孔式水平板防波堤; 当潜深为 0 m 时两者的透射系数整体上小于其他潜深下的不同工况; 另一方面, 相对板宽为 0.103 时, 迎浪侧半开孔式水平板防波堤的透射系数整体明显小于不开孔式水平板防波堤, 即周期大、波长大时, 迎浪侧半开孔式水平板防波堤的透射表现更好。

### 2.2 反射系数 $K_r$

两种结构物  $K_r$  的变化规律比较见图 4。由图 4a)、d) 可知, 当潜深为 0.03 m 时, 不同波高下两结构物的反射系数变化趋势相似, 迎浪侧半开方孔式水平板防波堤反射系数明显小于不开孔式水平板, 当相对板宽为 0.103, 即周期大、波长

大时, 迎浪侧半开方孔式水平板防波堤的反射系数更小; 由图 4c)、f) 可知, 当潜深为 0 m 时, 不同波高下两结构物的反射系数变化趋势相似, 呈波浪式起伏变化, 迎浪侧半开方孔式水平板防波堤反射系数明显小于不开孔式水平板; 由图 4b)、e) 可知, 当潜深为 -0.03 m、波高为 0.06 m 时, 两结构物的反射系数差异很小, 呈先增大后减小的趋势, 当相对板宽为 0.212 时, 不开孔结构物的反射系数有所上升; 当潜深为 -0.03 m、波高为 0.1 m 时, 两结构物的反射系数变化较平稳, 迎浪侧半开方孔式水平板防波堤的反射系数整体小于不开孔式水平板防波堤。整体而言, 结构物在水平面和入水状态时, 迎浪侧半开方孔式水平板防波堤的反射系数小于不开孔式水平板防波堤。

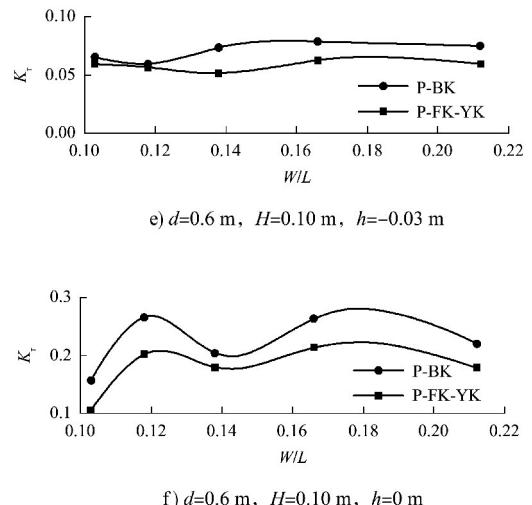
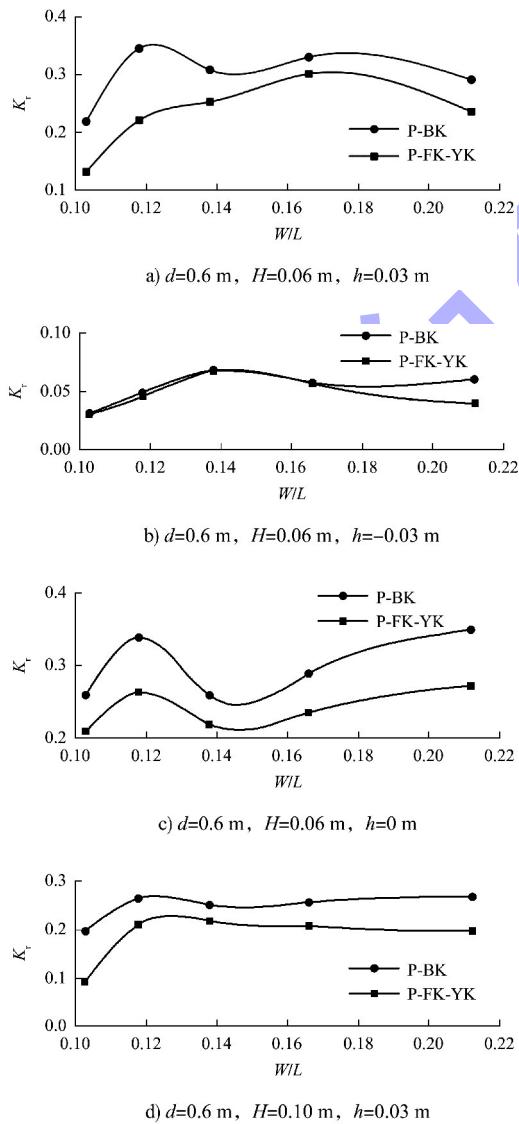


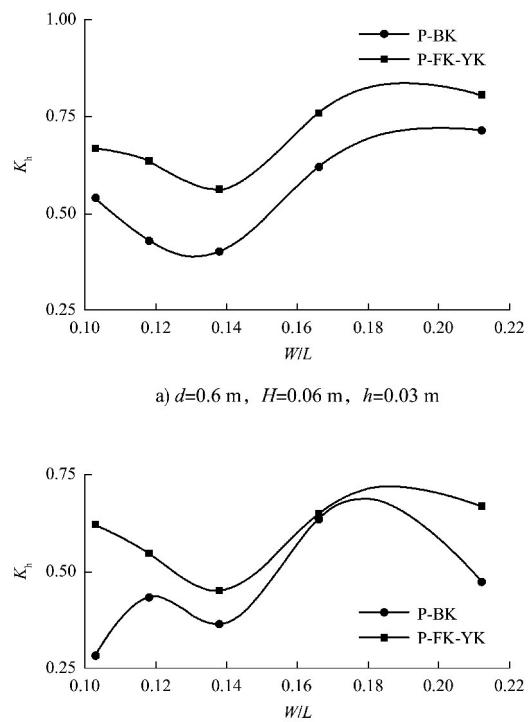
图 4 不开孔式与迎浪侧半开孔式水平板防波堤  $K_r$  比较

### 2.3 耗散系数 $K_h$

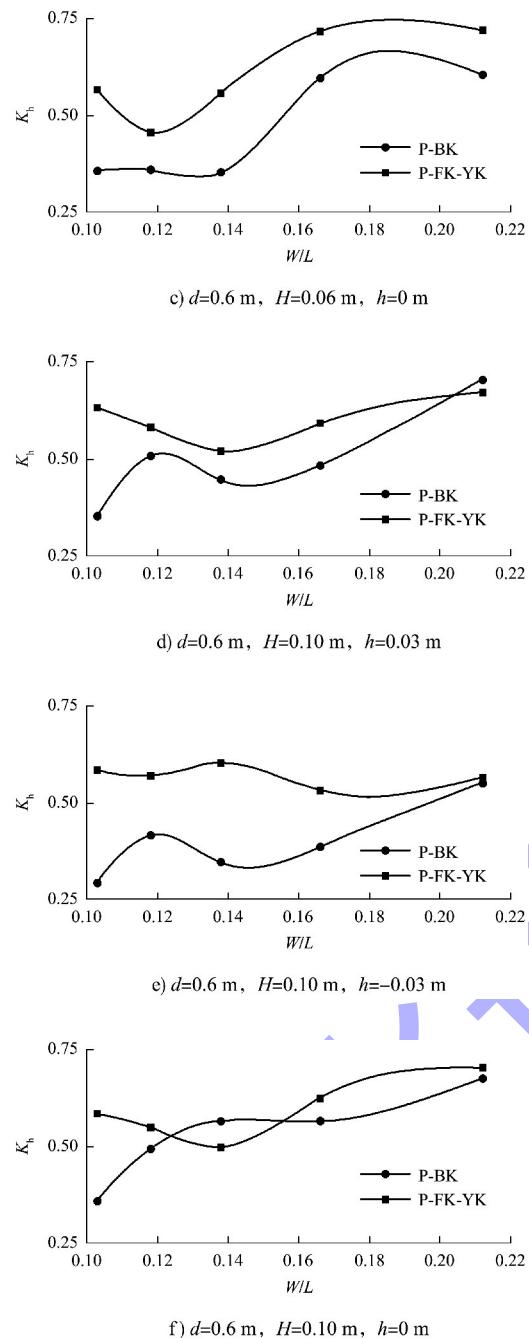
综合上述对透射系数  $K_t$  和反射系数  $K_r$  的分析, 迎浪侧半开孔式水平板防波堤透反射系数均小于不开孔式水平板防波堤, 说明前者在结构上对于波能有较好的耗散作用。根据能量守恒, 波能耗散系数的计算公式为:

$$K_h = 1 - K_t^2 - K_r^2 \quad (1)$$

两种结构物耗散系数  $K_h$  的变化规律比较见图 5。



b)  $d=0.6\text{ m}$ ,  $H=0.06\text{ m}$ ,  $h=-0.03\text{ m}$

图 5 不开孔式与迎浪侧半开方孔式水平板防波堤  $K_d$  比较

由图 5 可以看出, 除了在波高为 0.1 m、潜深为 0.03 m、相对板宽为 0.212, 以及波高为 0.1 m、潜深为 0 m、相对板宽为 0.138 工况下迎浪侧半开孔式水平板防波堤的耗散系数略小于不开孔式水平板防波堤之外, 其余参数条件下, 前者的耗散系数整体上大于后者, 对于波能的耗散作用更加明显, 符合上述对于透射系数  $K_t$  和反射系数  $K_r$  的分析。

同时, 除了波高为 0.1 m、潜深为 -0.03 m 工况下迎浪侧半开孔式水平板防波堤的耗散系数集中在 0.6 之外, 迎浪侧半开孔式水平板防波堤在其他工况下的耗散系数呈现出先减小再增加最后减小的趋势, 不同工况下的耗散系数集中在相对板宽为 0.166 和 0.212 时最大。

### 3 结论

1) 不开孔式水平板防波堤在波高 0.06 m、潜深 -0.03 m 时, 透射系数随着相对板宽的增加先减小后增加; 在其他波高和潜深条件下, 透射系数随着相对板宽的增加整体呈现减小的趋势, 相对板宽为 0.16~0.20 时达到最小值。反射系数在潜深为 -0.03 m 时最小, 稳定在 0.05 附近; 其他潜深条件下, 反射系数随着相对板宽的增加, 整体呈现先增加后减小再增加的趋势。

2) 迎浪侧半开方孔式水平板防波堤在波高 0.1 m、潜深 -0.03 m 时, 相对板宽对透射系数的影响较小; 在其他波高和潜深条件下, 透射系数随着相对板宽的增加, 整体呈现先增加后减小的趋势, 在相对板宽为 0.16~0.20 时达到最小值。反射系数在潜深为 -0.03 m 时最小, 稳定在 0.05 附近; 在不同波高和不同潜深下, 随着相对板宽的增加, 整体呈现先增加后减小的趋势。耗散系数整体上大于不开孔式水平板防波堤, 对波能消耗更大, 且耗能系数在相对板宽为 0.166 或 0.212 时达到最大值。

3) 迎浪侧半开方孔式水平板防波堤和不开孔水平板防波堤在不同工况试验下的整体趋势相似, 但前者的透射系数和反射系数均小于后者, 而耗散系数整体上大于后者。综合分析三者关系, 整体而言, 迎浪侧半开方孔式水平板防波堤的消浪效果整体优于不开孔式水平板防波堤, 从消波机制上来看, 主要是因为方孔对于波浪的阻滞作用, 并且产生来涡旋, 对波能的消耗较大。同时, 当波浪的波长较大时, 迎浪侧半开方孔式水平板防波堤较不开孔水平板防波堤的消浪表现更优。

(下转第 27 页)