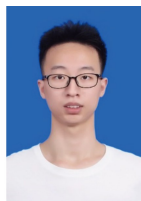


· 综合 ·



海啸波作用下浮式水平板防波堤 消浪性能试验研究*

何子豪¹, 孙宏月¹, 丁伟业¹, 赵西增², 李怡良¹

(1. 浙江海洋大学 海洋工程装备学院, 浙江 舟山 316022; 2. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021)

摘要: 通过物理模型试验, 对孤立波作用下浮式单排水平板、浮式双排水平板、浮式三排水平板和浮式开孔水平板防波堤的消浪性能开展研究, 对比分析在不同相对波高和系泊线倾角下4种浮式水平板防波堤的透射系数、反射系数、波能耗散系数和系泊张力。结果表明, 浮式单排水平板防波堤的透射系数最小, 浮式三排水平板防波堤的透射系数最大; 相较于浮式单排水平板防波堤, 浮式双排水平板、浮式三排板和浮式开孔水平板防波堤的系泊张力均明显减小; 适度调整系泊线的倾角能够改善浮式水平板防波堤的消浪效果和改变系泊线张力特性。

关键词: 浮式水平板防波堤; 孤立波; 消浪性能; 系泊线倾角; 系泊张力

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0011-09

Test of wave attenuation performance of floating flat-plate breakwater under tsunami waves

HE Zihao¹, SUN Hongyue¹, DING Weiye¹, ZHAO Xizeng², LI Yiliang¹

(1. School of Marine Engineering Equipment, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract: We study the wave attenuation performance of single-row floating flat-plate, double-row floating flat-plate, triple-row floating flat-plate, and perforated floating flat-plate breakwaters under the action of solitary waves through physical model tests, and compare and analyze four types of floating plate breakwaters in terms of their transmission coefficients, reflection coefficients, wave energy dissipation coefficients, and mooring tensions under different relative wave heights and mooring line inclinations. The results show that the transmission coefficient of the single-row floating flat-plate breakwater is the smallest, while that of triple-row floating flat-plate breakwater is the largest. Compared to the single-row floating flat-plate breakwater, double-row floating flat-plate, triple-row floating flat-plate, and the perforated floating flat-plate breakwaters exhibit significantly reduced mooring line tension. Moreover, moderately adjusting the inclination of the mooring line can also improve the wave attenuation effect of the floating plate and change the characteristics of mooring line tension.

Keywords: floating flat-plate breakwater; solitary wave; wave attenuation performance; mooring line inclination; mooring tension

收稿日期: 2024-02-28

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52171278, 51979245); 舟山市科技计划项目(2022C41008); 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202310340013); 浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划资助项目(2023R411018)

作者简介: 何子豪(2003—), 男, 研究方向为波浪与结构物相互作用。

通讯作者: 孙宏月(1985—), 男, 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: sunhy2012@zjou.edu.cn

随着人类对海洋资源的不断开发和利用,海洋工程的规模和复杂性不断增加,然而海浪的激烈和不可预测性给海洋结构的设计和维带来极大的挑战。水平板结构作为浮式防波堤、海洋平台和跨海桥梁等海工建筑物的基础,极端波浪对其冲击作用及水动力特性受到广泛的关注。

Ursell^[1]首先研究直板防波堤在无限水深时的波浪透反射系数;邱大洪等^[2]在考虑具有绕射现象的前提下,给出任意水深下的波浪透反射系数;考虑到孔隙率的影响,Liu等^[3]基于线性势流理论,提出有限厚度浸没水平多孔板水波散射的新解析解;Wang等^[4]对一组水下水平板的透反射系数进行研究,分析反射和透射系数随水平板长度、入射波长、顶板浸没以及板之间间隙的变化;Liu等^[5]在单层水平板的防波堤基础上提出一种双层防波堤,数值结果表明在上层水平板孔隙率合适的情况下,两块板的抬升波浪力都可以控制在较小范围内;王国玉等^[6]提出一种由多层水平板组成的新型防波堤,通过物理模型试验研究其几何参数和波陡等条件对消浪性能的影响;李雪艳等^[7]基于 Navier-Stokes 方程,建立波浪与弧板相互作用的模型,综合考虑各项因素后,下弧板式透空堤的消浪性能最优;Zhou等^[8]提出一种平板阵列防波堤,研究结果初步论证了平板阵列作为防波堤的潜在应用;王贤梦等^[9]通过数值模拟研究规则波作用下起伏水平板防波堤的消浪效果,结果表明该水平板有效减小板后波高;王塑等^[10]开展规则波与起伏板防波堤相互作用的模拟,得出起伏板透反射系数随支撑刚度的变化曲线,其结果可为起伏板防波堤的支撑刚度设计提供参考。

近年来海啸等极端天气频发,给近岸建筑物带来巨大破坏,威胁着沿岸人民的生命安全^[11-12]。在海洋工程中,常用孤立波模拟海啸等极端天气引起的巨浪^[13]。Seiffert等^[14]通过数值模拟研究孤立波作用下水平板上的水平和垂向波浪力,探讨波高和淹没深度等因素对波浪力的影响;You等^[15]基于紧致插值曲线(CIP)方法构建数值水槽,研究孤

立波与水下平板之间的极端非线性相互作用,直观地展示孤立波与平板相互作用的演化过程;高俊亮等^[16]通过数值模拟研究孤立波作用下水平板的水动力特性,结果表明透射系数和反射系数随着板宽和相对净空比的变化皆呈规则性变化;王千等^[17]通过物理模型试验,研究孤立波作用下淹没平板的水动力特性,结果表明当孤立波经过淹没平板时,平板上方波动传播减速且在平板尾缘处出现最大波高;纪巧玲等^[18]通过数值模拟研究孤立波与升沉水平板相互作用,得出升沉板对孤立波的消浪机理;李慧敏等^[19]基于 FLUENT 对孤立波作用下多排水平板的水动力特性进行研究,表明多排水平板在具有一定消浪性能的同时能减少结构受力。

前人已对水平板式防波堤进行了大量的研究,但其结构形式大多以固定式为主,较少涉及浮式结构。相较于传统的防波堤,浮式防波堤具有可适应大水深、经济和可移动^[20-21]等特点。季新然等^[22]研究不规则波与带腹板型浮式防波堤的相互作用,结果表明其透射系数随吃水深度和腹板高度的增大而减小;Han等^[23]通过物理模型试验与数值模拟相结合的方法,研究浮箱两侧凸体对其消浪性能的影响,结果表明反射系数和耗散系数随着板长度的增加而增加;杨亚菲等^[24]基于光滑粒子流体动力学(SPH)方法,研究规则波与单浮体和双浮体的相互作用,结果表明双浮体能显著提升消浪效果。上述研究主要集中在规则波或不规则波与浮式防波堤的相互作用,鲜有涉及海啸等极端波浪与浮式结构的相互作用问题。由于浮式结构的适应性较强,当海啸等极端海浪即将来临时,快速布置浮式水平板以减小波浪对近岸的破坏为一种应对措施。由此可见,对浮式水平板的结构消浪性能的研究很有必要。

本文以浮式单排水平板防波堤消浪特性的研究为基础,设计出浮式双排水平板、浮式三排水平板和浮式开孔水平板防波堤,研究不同波高和系泊线倾角对其消浪效果及系泊张力特性的影响,并与浮式单排水平板防波堤进行对比。

1 物理模型试验

1.1 试验设备和模型设计

试验在浙江海洋大学实验室波浪水槽中进行, 水槽长 32 m、宽 0.8 m、高 1.0 m。水槽前段为伺服电机驱动的推板式造波机, 尾部为倾斜设置的

末端消浪区。浮式水平板结构物布置在中部试验段, 在其两侧布置浪高仪采集入射波高、反射波高及透射波高等数据, 进而分析其消浪特性。在距浮式水平板迎浪侧前端 3 m 和背浪侧后端 2.3 m 处分别设置 2 根浪高仪(1#和 2#)。模型布置见图 1。

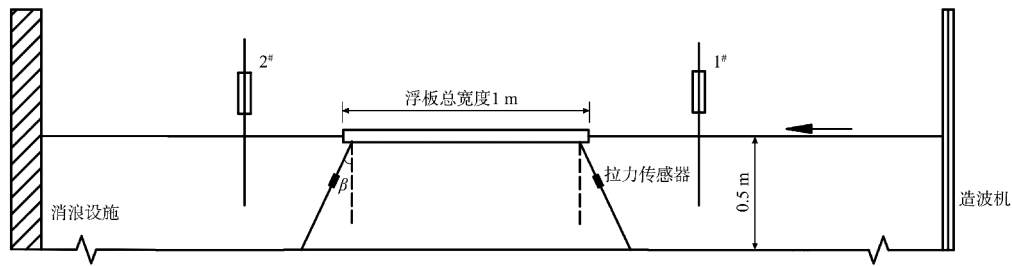


图 1 模型布置

试验模型为浮式水平板防波堤, 采用厚 6 mm 的有机玻璃制作, 内部填充珍珠棉泡沫板以保证其具有良好的浮力。防波堤模型见图 2, 分为浮式单排水平板、浮式双排水平板、浮式三排水平板和浮式开孔水平板 4 种形式。其中, 浮式单排水平板防波堤模型的长、宽和厚分别为 0.78、1.00 和 0.025 m; 浮式双排水平板防波堤模型的每块板长、宽和厚分别为 0.78、0.40 和 0.025 m, 板与板的间距为 0.2 m; 浮式三排水平板防波堤模型的每块板长、宽和厚分别为 0.78、0.20 和 0.025 m, 板与板的间距为 0.2 m; 浮式开孔水平板防波堤模型的长、宽和厚分别为 0.78、1.00 和 0.025 m,

开孔参数为: 方形孔的边长为 0.05 m, 布置 4 行 6 列, 共 24 个孔, 分布在短对称轴最近的方形孔与短对称轴的间距为 0.05 m, 最外侧两列的方形孔距板短边 0.1 m, 最外侧两行的方形孔距离板长边为 0.14 m, 方形孔的列间距和行间距均为 0.1 m, 开孔率为 7.69%。本文选用 4 根直径为 1.5 mm 的钢丝作为系泊线模拟系泊系统进行张紧式锚固。共设置 2 个拉力传感器, 迎浪侧和背浪侧各设置 1 个, 拉力传感器通过吊钩安装在系泊线中段位置, 向下依次用吊钩连接系泊线、刚度为 6.5 kg/cm 弹簧和水槽底部锚固点。浮式单排水平板防波堤模型在水槽中的侧视图与俯视图见图 3。

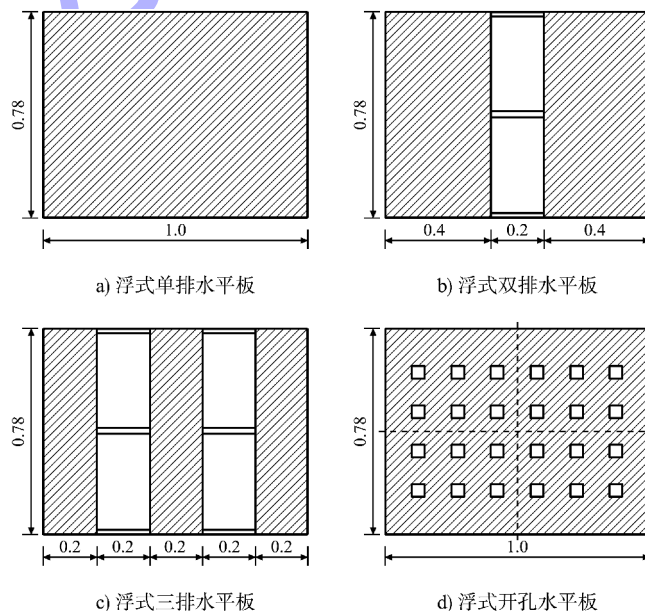


图 2 4 种浮式水平板防波堤模型 (单位: m)



a) 侧视图



b) 俯视图

图3 浮式水平板防波堤模型

1.2 试验参数设置

试验水深 d 为 0.5 m，试验入射波为孤立波。选用的孤立波波高 H 为 4、6、8、10 cm，故相对波高 H/d 为 0.08、0.12、0.16、0.20，试验中设置系泊线倾角 β 为 0° 、 30° ，浮板总宽度 W 为 1 m。

1.3 波浪与系泊张力数据处理

物理模型试验中，1#浪高仪测得的波高即为入射波高 H_i ，见图 4a)。随着波浪继续向前传播，波浪与浮式水平板发生相互作用后产生部分反射，定义反射波中第 1 个波峰到波谷的垂直距离为反射波高 H_r 。透射波高 H_t 由 2#测点测得，见图 4b)。为分析结构物的波浪反射与透射特性，将相关反射系数 K_r 和透射系数 K_t 定义为：

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (1)$$

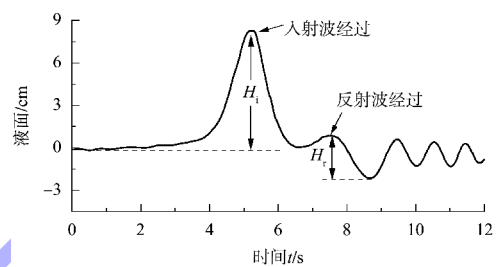
$$K_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (2)$$

式中： H_t 为透射波波高， H_i 为入射波波高， H_r 为反射波波高。

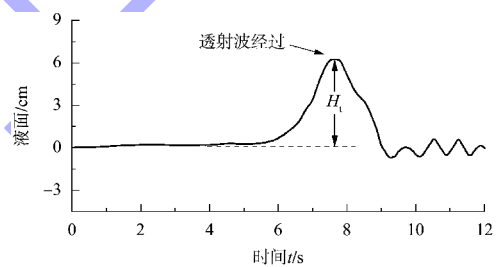
根据能量守恒定律，入射波能量应为反射波能量、透射波能量与耗散的能量之和，波能耗散系数计算公式为：

$$K_d = \sqrt{1 - (K_r^2 + K_t^2)} \quad (3)$$

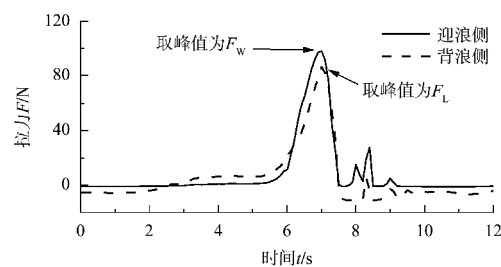
系泊线连接有拉力传感器，在采集波面过程线同时采集系泊线受力，见图 4c)。对迎浪侧系泊线张力 F_w 和背浪侧系泊线张力 F_L 数据具体提取方法均为取其受波浪作用过程中的峰值。



a) 1#浪高仪数据



b) 2#浪高仪数据



c) 拉力传感器数据

注：以 $H=8$ cm 浮式单排水平板防波堤为例。

图4 1#和2#浪高仪自由液面及迎浪侧和背浪侧系泊线受力变化历程

2 试验结果分析

2.1 不同浮式水平板防波堤消浪性能的影响

为探究不同浮式水平板防波堤的消浪性能，分别对 4 种不同结构形式的浮式水平板防波堤进

行试验, 对比分析不同结构下波浪透射系数、波浪反射系数和波能耗散系数的差异。

4 种浮式水平板防波堤透射系数随相对波高 H/d 增大的变化趋势见图 5(图例中简称 4 种形式防波堤分别为单排板、双排板、三排板、开孔板)。当系泊线倾角 β 为 0° 和 30° 时, 从整体上看, 4 种浮式水平板防波堤透射系数随相对波高 H/d 增大呈现逐渐减小的趋势, 这是由于随着波高的增大, 其波速相应增大, 在与浮式水平板防波堤的相互作用中, 更多的波能被消耗和反射。在试验范围内, 浮式单排水平板防波堤的透射系数最小, 浮式三排水平板防波堤的透射系数最大, 这是由于当波浪经过浮式水平板防波堤时发生了浅水效应, 消减了部分波浪, 而浮式单排水平板防波堤作为无透空密实结构, 浅水效应最明显, 透射系数最小。由图 5a) 可看出, 当相对波高 $H/d=0.16$ 时, 浮式双排水平板和浮式开孔水平板防波堤的透射系数达到最小值, 且在该波高下, 浮式单排水平板、浮式双排水平板和浮式开孔水平板防波堤的透射系数差距最小, 消浪效果相差不大; 由图 5b) 可看出, 当相对波高 $H/d=0.12$ 时, 浮式单排水平板、浮式双排水平板和浮式开孔水平板防波堤的透射系数差距最大(当相对波高 $H/d=0.12$ 时, 浮式单排水平板防波堤透射系数为 0.81, 浮式开孔水平板防波堤为 0.84, 浮式双排水平板防波堤为 0.88), 当相对波高 $H/d>0.12$ 后, 浮式三排水平板防波堤的透射系数与另外 3 种形式的差距逐渐变大, 而另外 3 种形式的差距则越来越小。

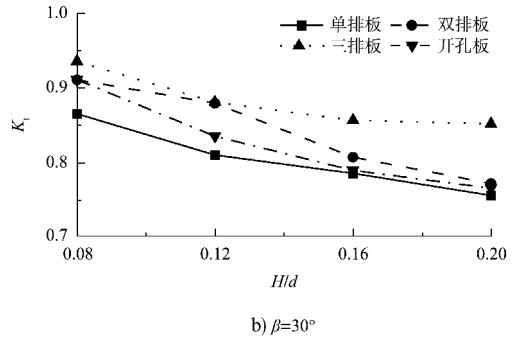
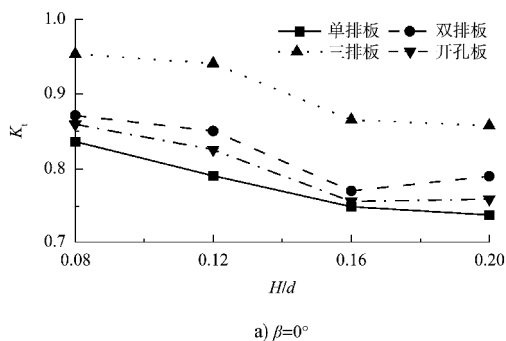
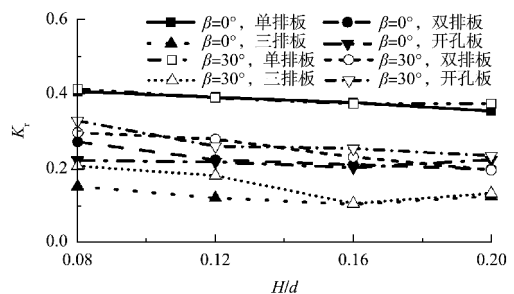
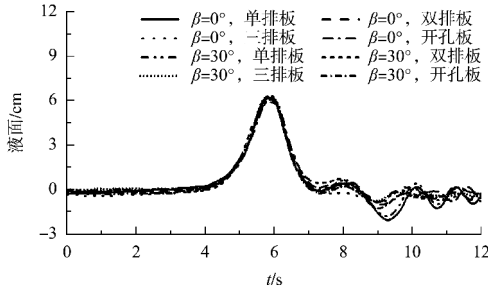


图 5 4 种浮式水平板防波堤波浪透射系数 K_t 随相对波高 H/d 的变化曲线

4 种浮式水平板防波堤反射系数随相对波高 H/d 增大的变化趋势和液面历时曲线见图 6。由图 6a) 可看出, 当系泊线倾角 β 为 0° 和 30° 时, 浮式水平板防波堤的反射系数随相对波高 H/d 增大的变化均呈现略微减小的趋势, 且相对波高变化对 4 种浮式水平板防波堤的反射系数影响不大(如当 $\beta=0^\circ$ 、相对波高在 $0.08\sim 0.20$ 时, 浮式开孔水平板防波堤的反射系数仅在 $0.20\sim 0.22$ 间变化), 浮式单排水平板防波堤的反射系数始终大于另外 3 种形式。在试验范围内, 浮式双排水平板和浮式开孔水平板防波堤的反射系数差距较小; 当相对波高 $H/d>0.16$ 后, 反射系数由大到小依次为浮式单排水平板、浮式开孔水平板、浮式双排水平板、浮式三排水平板防波堤。当入射波波高 $H=6\text{ cm}$ 时 1# 浪高仪处的自由液面变化历程见图 6a), 可以看出, 相较于另外 3 种形式, 浮式单排水平板防波堤的反射波出现更加明显的波谷, 且反射波的周期更大, 余波也更明显; 浮式三排水平板防波堤的余波最弱, 液面最快趋于平缓。



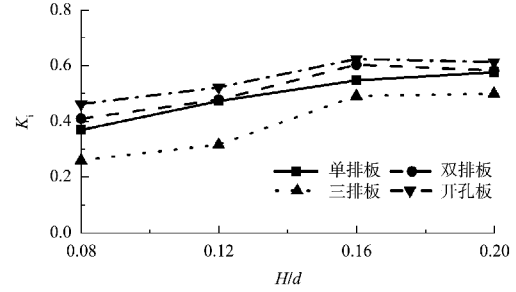
a) 波浪反射系数 K_r 随相对波高 H/d 的变化曲线



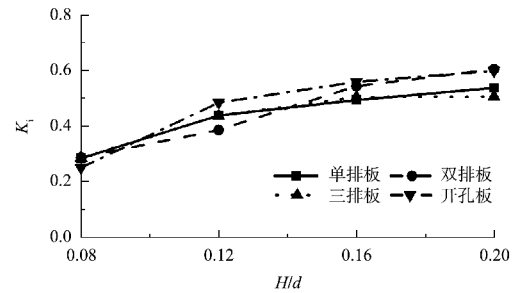
b) 1#浪高仪自由液面变化历程

图 6 4 种浮式水平板防波堤的波浪反射系数 K_r 随相对波高 H/d 的变化及 1#浪高仪自由液面变化历程

4 种浮式水平板防波堤能散系数随相对波高 H/d 增大的变化趋势见图 7。当 $\beta=0^\circ$ 时，浮式双排水平板、浮式三排水平板和浮式开孔水平板防波堤的波能耗散系数随相对波高 H/d 的增大呈现先增大后趋于平稳的趋势，其余不同倾角和浮式水平板组合均呈逐渐增大的趋势。由图 7a) 可看出，当 $\beta=0^\circ$ 时，浮式开孔水平板的波能耗散系数最大，浮式三排水平板防波堤最小，开孔水平板防波堤为波浪的浅水变形过程提供了接近于单排水平板防波堤的结构形式，同时开孔的存在增加了对波能的耗散；本文设置的浮式三排水平板防波堤中，板与板之间的透空面积过大，波浪的浅水变形过程较短，波能耗散就相对较小。由图 7b) 可看出，当 $\beta=30^\circ$ 、相对波高较大时，浮式双排水平板和浮式开孔水平板防波堤的波能耗散系数相差不大，且都大于浮式单排水平板防波堤(当相对波高 $H/d=0.16$ 时，浮式双排水平板防波堤的波能耗散系数为 0.54，浮式开孔水平板防波堤为 0.56，浮式单排水平板防波堤为 0.49；当相对波高 $H/d=0.20$ 时，浮式双排水平板防波堤的波能耗散系数为 0.61，浮式开孔水平板防波堤为 0.60，浮式单排水平板防波堤为 0.54)。整体上看，当 β 由 0° 增大到 30° 后，浮式单排水平板、浮式双排水平板和浮式开孔水平板防波堤的波能耗散系数均有所减小(当相对波高 $H/d=0.08$ 时，浮式单排水平板、浮式双排水平板、浮式开孔水平板防波堤分别减小 22.8%、29.6%、45.5%)，而浮式三排水平板防波堤却略微增大。



a) $\beta=0^\circ$

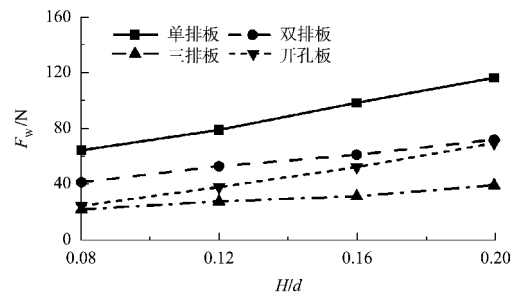


b) $\beta=30^\circ$

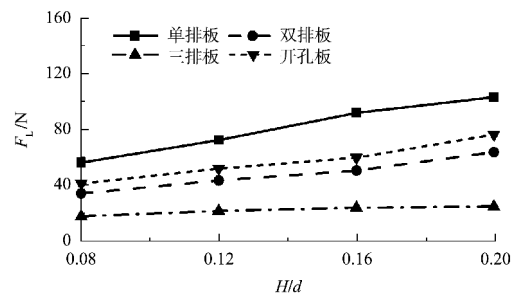
图 7 4 种浮式水平板防波堤的波能耗散系数 K_d 随相对波高 H/d 的变化

2.2 不同浮式水平板对系泊张力的影响

4 种浮式水平板防波堤迎浪侧系泊张力 F_w 和背浪侧系泊张力 F_L 在两种不同系泊线倾角下随相对波高 H/d 的变化关系见图 8。当系泊线倾角 β 为 0° 和 30° 时，4 种浮式水平板防波堤的迎浪侧和背浪侧系泊张力均随相对波高 H/d 增大呈现逐渐增大的趋势。



a) $\beta=0^\circ$ 迎浪侧



b) $\beta=0^\circ$ 背浪侧

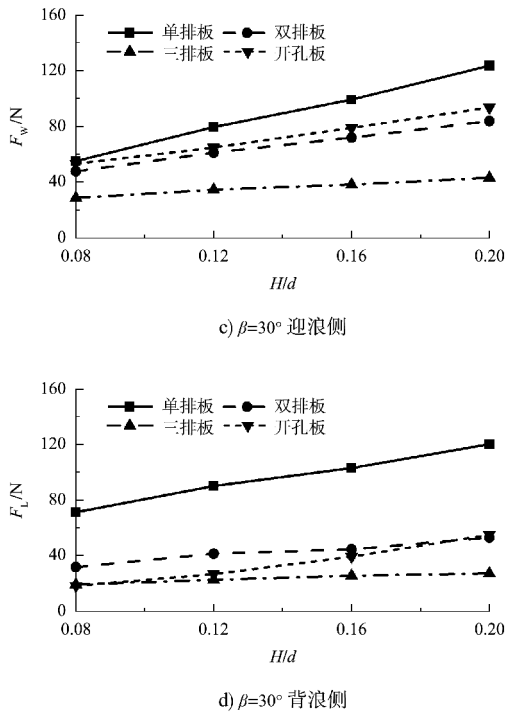


图 8 4 种浮式水平板防波堤迎浪侧系泊张力 F_w 和背浪侧系泊张力 F_l 随相对波高 H/d 的变化

浮式双排水平板、浮式三排水平板和浮式开孔水平板与浮式单排水平板防波堤的系泊张力对比见表 1。可以看出, 当 $\beta=0^\circ$ 时, 相较于浮式单排水平板防波堤, 浮式开孔水平板防波堤在相对波高 $H/d=0.08$ 时的迎浪侧系泊张力减小百分比最大, 达到 62.1%; 浮式双排水平板防波堤在相对波高 $H/d=0.16$ 时的背浪侧系泊张力减小百分比最大, 达到 45.1%; 浮式三排水平板防波堤在相对波高 $H/d=0.20$ 时的背浪侧系泊张力减小百分比最大, 达到 76.2%。当 $\beta=30^\circ$ 时, 相较于浮式单排水平板防波堤, 浮式双排水平板防波堤在相对波高 $H/d=0.20$ 时的迎浪侧系泊张力减小百分比最大, 达到 32.3%; 浮式三排水平板防波堤在相对波高 $H/d=0.20$ 时的背浪侧系泊张力减小百分比最大, 达到 77.6%; 浮式开孔水平板防波堤在相对波高 $H/d=0.08$ 时的背浪侧系泊张力减小百分比最大, 达到 74.7%。

表 1 4 种浮式水平板防波堤系泊张力对比

位置	$\beta/(^\circ)$	H/d	系泊张力/N			
			浮式单排水平板防波堤	浮式双排水平板防波堤	浮式三排水平板防波堤	浮式开孔水平板防波堤
迎浪侧	0	0.08	64.3	41.3(35.8%)	21.8(66.1%)	24.4(62.1%)
		0.12	79.0	52.9(33.0%)	27.6(65.1%)	37.8(52.1%)
		0.16	98.5	61.1(37.9%)	31.2(68.3%)	52.2(46.9%)
		0.20	116.4	72.0(38.2%)	39.3(66.2%)	69.5(40.3%)
	30	0.08	54.8	47.4(13.5%)	28.4(48.2%)	52.8(3.5%)
		0.12	79.0	60.8(23.1%)	34.2(56.7%)	64.4(18.5%)
		0.16	98.7	71.5(27.5%)	37.9(61.6%)	78.5(20.4%)
		0.20	123.0	83.3(32.3%)	42.8(65.2%)	93.1(24.3%)
背浪侧	0	0.08	56.2	34.0(39.5%)	17.6(68.7%)	41.1(26.9%)
		0.12	72.4	43.3(40.2%)	21.5(70.3%)	51.9(28.2%)
		0.16	91.9	50.5(45.1%)	23.8(74.1%)	59.7(35.0%)
		0.20	103.2	63.7(38.3%)	24.6(76.2%)	76.3(26.1%)
	30	0.08	70.8	31.4(55.6%)	18.9(73.3%)	17.9(74.7%)
		0.12	89.6	41.0(54.2%)	22.3(75.1%)	26.3(70.6%)
		0.16	102.5	44.2(56.9%)	25.3(75.3%)	38.9(62.1%)
		0.20	119.7	52.7(56.0%)	26.8(77.6%)	54.6(54.3%)

注: 括号内数值为与浮式单排水平板防波堤相比系泊张力减小的百分比。

浮式水平板防波堤的系泊张力受水平板横截面积的影响较大。浮式单排水平板、浮式双排水平板、浮式三排水平板和浮式开孔水平板防波堤的横截面积比约为 100:80:60:92。当 $\beta=0^\circ$ 时, 在

试验工况范围内, 相较于浮式单排水平板防波堤, 浮式双排水平板、浮式三排水平板和浮式开孔水平板防波堤的总系泊张力分别平均减小 38.6%、69.6%和 39.4%; 当 $\beta=30^\circ$ 时, 相较于浮式单排

水平板防波堤, 浮式双排水平板、浮式三排水平板和浮式开孔水平板防波堤的总系泊张力分别平均减小 41.4%、68.0%和 42.2%。

3 结论

1) 在试验工况范围内, 浮式单排水平板防波堤的透射系数最小, 浮式三排水平板防波堤的透射系数最大; 浮式单排水平板防波堤的反射系数最大, 浮式双排水平板和开孔水平板防波堤的反射系数接近, 浮式三排水平板防波堤的反射系数最小。

2) 整体上看, 当 $\beta=0^\circ$ 时, 浮式开孔水平板的能耗系数最大; 当 β 增大到 30° 时, 浮式单排水平板、浮式双排水平板和浮式三排水平板防波堤的能耗系数均较 $\beta=0^\circ$ 时有所减小, 而浮式三排水平板防波堤则略微增大。

3) 受水平板受力面积的影响, 不论是迎浪侧和背浪侧, 浮式双排水平板、浮式三排水平板、浮式开孔水平板防波堤的系泊张力均明显小于浮式单排水平板防波堤。在试验工况范围内, 相较于浮式单排水平板防波堤, 浮式双排水平板防波堤的总系泊张力可减小 36.4% 以上, 浮式三排水平板防波堤的总系泊张力可减小 62.3% 以上, 浮式开孔水平板防波堤的总系泊张力可减小 33.6% 以上。

4) 综合以上结论, 从消浪及系泊张力综合的角度来看, 多排式和开孔式的浮式水平板防波堤是更符合工程实际应用的结构形式。

参考文献:

[1] URSELL F. The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water[J]. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1947, 43(3): 374-382.

[2] 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.

[3] LIU Y, LI H J, LI Y C. A new analytical solution for wave

scattering by a submerged horizontal porous plate with finite thickness[J]. *Ocean engineering*, 2012, 42: 83-92.

- [4] WANG K H, SHEN Q. Wave motion over a group of submerged horizontal plates [J]. *International journal of engineering science*, 1999, 37(6): 703-715.
- [5] LIU Y, LI Y C, TENG B, et al. Wave motion over a submerged breakwater with an upper horizontal porous plate and a lower horizontal solid plate [J]. *Ocean engineering*, 2008, 35(16): 1588-1596.
- [6] 王国玉, 王永学, 李广伟. 多层水平板透空式防波堤消浪性能试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2005(6): 865-870.
- [7] 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.
- [8] ZHOU W Z, CHENG Y Z, LIN Z Y. Numerical simulation of long-wave wave dissipation in near-water flat-plate array breakwaters[J]. *Ocean engineering*, 2023, 268: 113377.
- [9] 王贤梦, 赵西增, 付丁. 波浪与起伏水平板防波堤相互作用数值模拟[J]. *海洋工程*, 2019, 37(3): 61-68.
- [10] 王塑, 赵西增. 一种起伏板防波堤最优支撑刚度计算方法[J]. *海洋工程*, 2023, 41(2): 161-168.
- [11] 安超. 海啸和海啸预警的研究进展与展望[J]. *中国科学(地球科学)*, 2021, 51(1): 1-14.
- [12] 王宗辰, 徐志国, 原野, 等. 2022年1月15日汤加火山海啸对中国沿海的影响分析[J]. *中国科学(地球科学)*, 2023, 53(5): 1030-1038.
- [13] 张友林, 唐振远, 万德成. 用 MPS 方法数值分析孤立波与平板相互作用问题[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2016, 31(4): 395-401.
- [14] SEIFFERT B, HAYATDAVOODI M, ERTEKIN R C. Experiments and computations of solitary-wave forces on a coastal-bridge deck. part I: flat plate [J]. *Coastal engineering*, 2014, 88: 194-209.
- [15] YOU R, HE G H, WANG J D, et al. CIP-based analysis on strongly nonlinear interaction between solitary wave and submerged flat plate [J]. *Ocean engineering*, 2019, 176: 211-221.
- [16] 高俊亮, 张一兆, 何志伟, 等. 孤立波作用下水平板的动力学特性数值研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*,

- 2021, 42(9): 1287-1294.
- [17] 王千, 刘桦, 房詠柳, 等. 孤立波与淹没平板相互作用的三维波面和水动力实验研究[J]. 力学学报, 2019, 51(6): 1605-1613.
- [18] 纪巧玲, 刘庆凯, 徐成浩. 孤立波与升沉水平板相互作用数值模拟研究[J]. 海洋工程, 2021, 39(4): 70-78.
- [19] 李慧敏, 丁伟业, 蔡涛, 等. 孤立波与多排水平板相互作用的数值研究[J/OL]. 海洋工程: 1-12 (2024-01-19) [2024-01-30]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=2arE9-pF_S1CfJd0oSiMFFyMeZ5JvICrSIGKkDfjaoEYNbqIRgKYLonY0xMljUwu8L90BjYqwVulqYGR34Kjnz3gW5V1Ql82Mz24vDybNw2AfUQy39K8pD2oIlW44n4ZOIXmVC0EHACeGn9OX2b4pZwQhAw_FTbD9Z6feQSQf6h5T2n7EacJJ-EDDBotL6MJ&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [20] 沈雨生, 周益人, 潘军宁, 等. 浮式防波堤研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 124-132.
- [21] 栾英妮, 陈汉宝. 浮式防波堤研究进展[J]. 水运工程, 2021(3): 64-69.
- [22] 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.
- [23] HAN X Y, DONG S. Interaction between regular waves and floating breakwater with protruding plates: laboratory experiments and SPH simulations [J]. Ocean engineering, 2023, 287: 115906.
- [24] 杨亚菲, 蔡国朕, 曹露, 等. 规则波与浮式防波堤相互作用的 SPH 模拟研究[J]. 水运工程, 2024(2): 9-15, 21.

(本文编辑 王璁)

(上接第 10 页)

参考文献:

- [1] 江苏省交通运输厅. 江苏省内河航标管理办法[A]. 南京: 江苏省交通运输厅, 2024.
- [2] 江西省交通运输厅. 江西省内河航标技术标准化指南[A]. 南昌: 江西省交通运输厅, 2021.
- [3] 广东省交通运输厅. 广东省船闸设计标准化指南[A]. 广东: 广东省交通运输厅, 2021.
- [4] 刘宁. 平陆运河工程建设关键问题研究与思考[J]. 水运工程, 2024(6): 1-11.
- [5] 中交水运规划设计院有限公司. 西部陆海新通道(平陆)运河初步设计总报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2022.
- [6] 黄伟雄. 关于广东省航道《桥区航标配布》标准化的研究[J]. 珠江水运, 2023(13): 22-24.
- [7] 陶成义. 应加强内河航标建设管理[J]. 中国水运, 2001(8): 19.
- [8] 长江航道规划设计研究院, 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 广东省航道事务中心, 等. 内河助航标志: GB 5863—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [9] 上海河口海岸科学研究中心, 上海市地方海事局, 上海中交水运设计研究有限公司. 内河交通安全标志: GB 13851—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [10] 胡安春. 内河航道标牌配置灯光探讨[J]. 中国水运(下半月), 2014, 14(2): 3.
- [11] 交通运输部. 中国海区可航行水域桥梁助航标志: GB 24418—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [12] 刘怀汉, 曾晖, 周俊安, 等. 内河航道助航系统智能化技术研究现状与展望[J]. 水利水运工程学报, 2015(6): 82-87.

(本文编辑 王璁)