

· 港口 ·



# 基于 FLOW-3D 的 新型桩基透空堤消浪性能研究\*

陈兰坤, 潘新颖

(中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 针对新型附带消浪板桩基透空堤消浪性能, 对波浪作用下该新型透空堤的反射系数、透射系数以及波能分布进行研究。采用 FLOW-3D 数值模拟方法, 得出消浪板的开孔率、相对入水深度以及倾斜角度变化时透空堤反射系数、透射系数以及波能分布。结果显示: 1) 该新型附带消浪板桩基透空堤具有较好的消浪性能, 开孔率越小, 其反射系数越大、透射系数越小; 2) 消浪板开孔率为 10%, 相对入水深度为 0.85, 倾斜角度为 $-15^\circ$ 的设计方案效果最佳, 该新型透空堤透射波能占比仅约为 17%。

**关键词:** 消浪板; 桩基透空堤; FLOW-3D; 消浪性能

**中图分类号:** U 656

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2022)01-0059-07

## Wave dissipation performance of new type of pile foundation permeable breakwater based on FLOW-3D

CHEN Lan-kun, PAN Xin-ying\*

(School of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266100, China)

**Abstract:** In terms of the wave dissipation performance of a new type of pile foundation permeable breakwater with a wave dissipation plate, this paper studies the reflection coefficient, transmission coefficient and wave energy distribution of the new type of permeable breakwater under wave action. Using FLOW-3D numerical simulation method, the reflection coefficient, transmission coefficient and wave energy distribution of the permeable breakwater are obtained when the opening ratio, relative water depth and inclination angle of the wave dissipation plate change. The results show that: 1) The new type of pile foundation permeable breakwater with a wave dissipation plate has good wave dissipation performance. The smaller the opening ratio is, the greater the reflection coefficient is and the smaller transmission coefficient is. 2) The design scheme of 10% opening rate, 0.85 relative water depth and  $-15^\circ$  inclination angle has the best effect, and the wave energy transmission coefficient of the new type of permeable breakwater is only about 17%.

**Keywords:** wave dissipation plate; pile foundation permeable breakwater; FLOW-3D; wave dissipation performance

防波堤作为港工建筑物的重要组成部分, 可以有效阻挡进港波浪与泥沙, 使港内水域保持平稳, 以便装卸作业, 然而传统非透水防波堤不仅限制了港内外水体的交换, 使泥沙淤积、水体污

染, 还会改变海域水动力环境, 使海岸线发生变迁。因此, 设计一种增强水体交换能力、保护海域水动力环境的透空式防波堤成为当下的研究方向。

**收稿日期:** 2021-03-15

\***基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(51739010); 国家自然科学基金面上项目(515679223)

**作者简介:** 陈兰坤(1995—), 女, 硕士研究生, 从事新型透空堤的消浪性能研究。

透空堤在港口水工建筑物中较为常见,国内外学者通过数值分析方法做了大量工作,研究表明:适当开孔的消浪板能显著抑制反射回外海的反射波浪高度,且桩式防波堤结构能有效降低堤后透射波浪高度,将开孔消浪板与桩式防波堤结构有效结合可以达到同时抑制反射波与透射波的效果。此外,波浪周期、消波板开孔率、倾斜程度对透空堤消浪性能影响较大<sup>[1-6]</sup>。同时,部分学者应用 FLOW-3D 软件建立数值水槽,水槽尾端布置简单且较易实现的斜坡式孔隙结构可以有效减少数值水槽后端波浪反射,应用 FLOW-3D 模拟数值水槽效果很好<sup>[7-8]</sup>。

因此,本文采用 FLOW-3D 软件对新型附带消浪板桩基透空堤进行数值模拟研究。该新型桩基透空堤在下部桩基迎浪侧布置开孔消浪板,可同时满足防波堤挡浪挡沙和实现港内外水体交换的要求。根据该新型桩基透空堤物模试验防波堤模型建立 FLOW-3D 数值模型,通过与物模试验结果对比,验证数值水槽造波稳定性与持续性,进而研究该新型透空堤消浪板的开孔率、相对入水深度以及倾斜角度对该透空堤消浪性能影响,为此种透空堤结构设计提供参考。

1 数值模型建立

FLOW-3D 是通用计算流体力学(CFD)软件,它采用专门的数值技术来求解流体运动方程,以获得瞬态三维数值解,可减少物理试验中模型制作时间与成本。本文主要模拟波浪与新型桩基透空堤结构的相互作用,对自由液面有着较高要求,因此选择 FLOW-3D 作为研究软件。

1.1 模型控制方程

FLOW-3D 将连续性方程和不可压缩黏性流体运动的 Navier-Stokes 方程作为流体运动控制方程。本文中假设流体为牛顿流体,由于 FLOW-3D 独特的 FAVOR 网格技术,其连续性方程和动量方程中含有体积和面积分数参数,表达式如下:

连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x - \frac{1}{\rho V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{xz}) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y - \frac{1}{\rho V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{yz}) \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z - \frac{1}{\rho V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(A_z \tau_{zz}) \right] \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $V_F$  为可流动体积分分数;  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向可流动面积分数;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向速度分量;  $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向重力加速度;  $\tau_{ij}$  为液体剪应力,  $i$  为作用面,  $j$  为作用方向。 $\tau_{ij}$  表达式如下:

$$\begin{cases} \tau_{xx} = -2\mu \left[ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \\ \tau_{yy} = -2\mu \left[ \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \\ \tau_{zz} = -2\mu \left[ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \tau_{xy} = \tau_{yx} = -\mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} = -\mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} = -\mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\mu$  为动力黏滞系数。

1.2 数值模型建立

1.2.1 数值水槽布置

本文根据新型桩基透空堤物模试验,建立长 35 m( $y$  方向)、宽 0.3 m( $x$  方向)、高 0.8 m( $z$  方向)的数值造波水槽,水槽尾端放置 5 m 长消浪坡,测点选取在水槽 14 m 的位置,见图 1。

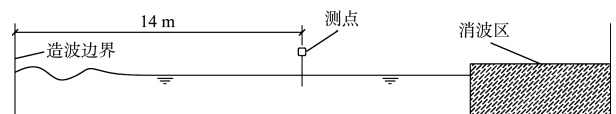


图 1 数值水槽布置

1.2.2 模型网格划分

FLOW-3D 软件数值模拟计算效果取决于网格数量, 网格越密效果越好, 但同时需考虑计算机运算能力。本文中数值水槽网格划分范围为  $x$  方向  $0\sim0.3\text{ m}$ 、 $y$  方向  $0\sim35\text{ m}$ 、 $z$  方向  $0\sim0.8\text{ m}$ , 应用矩形网格划分。网格尺寸划分方法为:  $z$  方向重点在自由水面附近  $0.55\sim0.80\text{ m}$  范围内进行局部网格加密;  $y$  方向重点在开孔消浪板前后进行局部网格加密, 保证开孔处有足够的网格量; 其他位置处为均匀网格, 网格尺寸为  $0.15\text{ m}$ , 总数约为 224 万个。

1.2.3 边界条件设置

本文所建立的数值波浪水槽模型中,  $x$  轴为水槽宽度方向, 均为对称边界;  $y$  轴为长度方向, 最小边界为造波边界, 最大边界为固壁边界;  $z$  轴为高度方向, 均为固壁边界。

1.2.4 初始条件设置

在计算初始时刻, 数值造波水槽为静水面, 初始速度为 0, 沿  $z$  轴方向静水压强设置为流体初始压强, 水深设置为  $0.65\text{ m}$ 。

1.3 防波堤模型建立

本文新型附带消浪板桩基透空堤模型整体长  $1.1\text{ m}$ 、宽  $0.3\text{ m}$ 、高  $1.5\text{ m}$ , 见图 2。该模型采用 4 排斜方桩, 直径  $0.1\text{ m}$ , 第 1 排斜桩设置开孔消浪板, 上部结构为传统型垂直挡浪墙, 下部消浪板宽  $0.3\text{ m}$ 、长  $0.72\text{ m}$ , 可改变其开孔率、相对入水深度和倾斜角度, 见图 3。

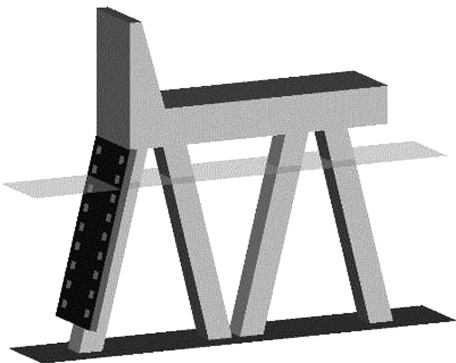


图 2 桩基透空堤

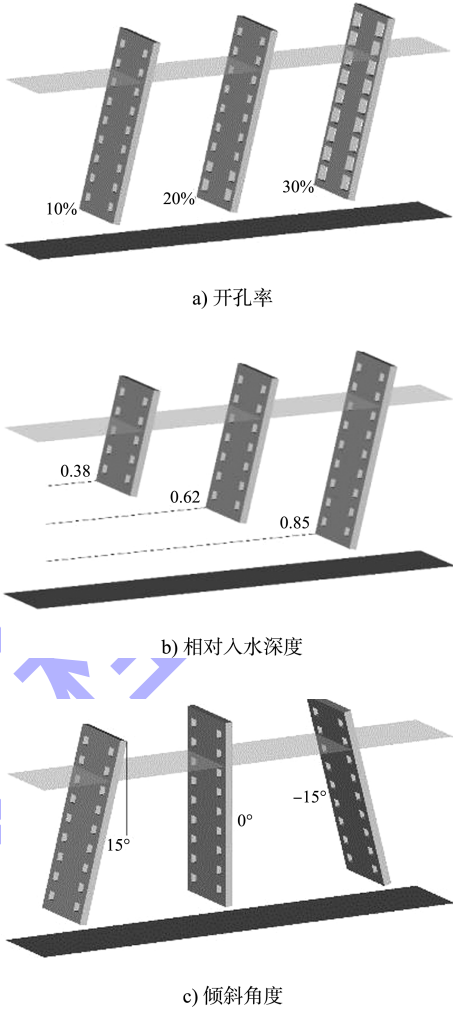


图 3 消浪板变化

1.4 数值计算工况

在已有的透空堤研究中<sup>[9]</sup>, 改变消浪板的开孔率、相对入水深度以及倾斜角度对透空堤消浪性能产生一定影响, 因此本文从消浪板的这 3 个角度进行深入研究分析。

消浪板的开孔率、相对入水深度及倾斜角度等具体工况为: 开孔率 10%、20%、30%, 相对入水深度 0.38、0.62、0.85, 倾斜角  $15^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $-15^\circ$ 。

2 数值模型验证

采用物模试验结果验证数值模型准确度与可靠性。验证分为两个部分: 1) 数值造波水槽造波稳定性与持续性; 2) 将防波堤模型放入数值水槽后, 设置水深条件、造波波高、周期及模型位置同物模试验, 布置相同测点, 以模型前后波高作

为数值模型消波可靠性验证标准。

2.1 物模试验

物模试验是在山东交通学院港航水动力学实验室波流水槽中进行的新型附带消浪板桩基透空堤物理模型试验,该试验水槽长 50 m、宽 1.2 m、深 1.4 m,水槽尾部采用卵石消波,模型放置于水槽中部,见图 4。



图 4 物理模型

模型结构迎浪侧断面所在位置与数值水槽造波板距离为 14 m,设定水深为  $d=0.65\text{ m}$ ,水位位于下部消浪板处,分别采用了 2 个不同周期  $T$  的规则波(1.5、2.0 s),波高  $H=0.10\text{ m}$ 。

2.2 数值水槽的造波验证

图 5 为对应波浪条件下试验水槽与数值水槽的波形对比。可以看出,数值造波水槽模拟的规则波与试验水槽实测波形吻合良好,其峰谷高度对应一致,波高稳定,波面过程线并未随着造波时间增加而衰减,未出现波浪二次反射,数值水槽造波稳定性与持续性得到验证。

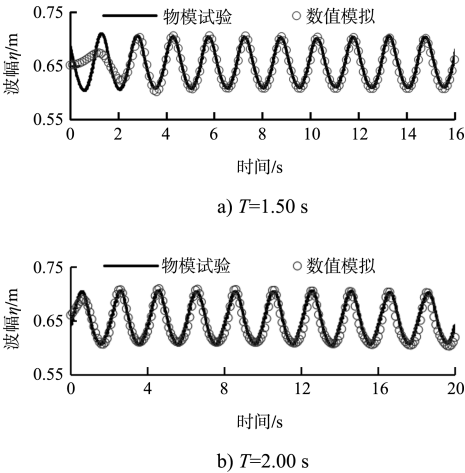


图 5 数值水槽的造波验证

2.3 数值模型的消波验证

为采集波面参数,沿水槽长度方向在模型前

布置 3 排浪高仪、模型后布置 2 排浪高仪。以 10%开孔率消浪板、波浪周期  $T=1.5\text{ s}$ 、波高  $H=0.10\text{ m}$  为例,分别提取防波堤前、后波面信息,选取波浪稳定后的 10 个波面信息绘制图 6。可以看出,数值模拟与物模试验结果吻合较好,峰谷大致重合且沿程稳定,验证通过。

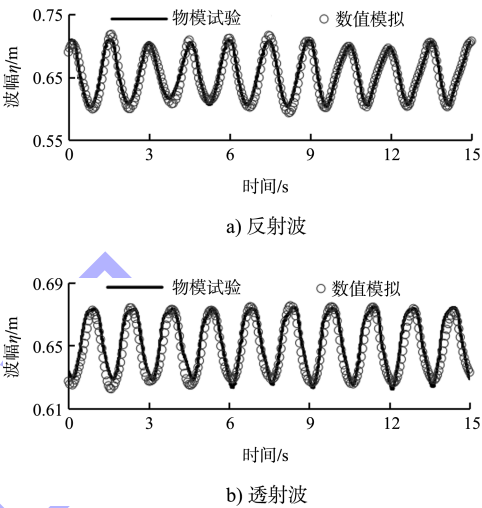


图 6 波面线验证

将数值模拟波面信息数据输入到计算反射、透射系数的程序中,计算得出数值模拟验证工况的反射、透射系数结果(表 1),并与物模试验结果进行误差分析。结果表明,数值模拟反射、透射系数误差范围均在 2%以内,误差较小,验证效果较好。

表 1 反射、透射系数验证

验证信息	物理模型	数值模拟	误差/%
反射系数	0.473	0.479	1.27
透射系数	0.441	0.444	0.68

综合以上两种数值模拟验证,其结果与物模试验基本一致,透空堤模型消波效果良好且数值模拟条件设定较为接近物模试验情况,因此 FLOW-3D 数值模拟效果较好,该数值模型具有较好的准确度和可靠性。

3 数值计算结果及分析

探讨水位位于消浪板处时,消浪板开孔率、相对入水深度以及倾斜角度等因素对此类型透空堤反射系数、透射系数及波能分布的影响水平。



反射系数  $K_r$  定义为 Goda<sup>[10]</sup> 两点法计算分离出反射波高  $H_r$  与入射波高  $H_i$  的比值, 并由第 1、2 排浪高仪数据计算反射系数与第 2、3 排浪高仪数据计算反射系数求取平均值所得; 透射系数  $K_t$  定义为透射波高  $H_t$  与入射波高  $H_i$  的比值, 其中透射波高  $H_t$  由第 4、5 排浪高仪分别通过上跨零点法计算结果求取平均值所得。

入射波能与透空堤相互作用后转化为 3 部分, 可表征为: 堤前波能反射率  $E_r$ 、堤后波能透射率  $E_t$  和透空堤波能耗散率  $E_d$ :

$$E_r = K_r^2$$

(7)

$$E_t = K_t^2$$

(8)

$$E_d = 1 - K_r^2 - K_t^2$$

(9)

3.1 消浪板开孔率的影响

在迎浪侧第一排斜桩上布置开孔消浪板时, 除开孔率不同外, 开孔中心位置、开孔数量和排布形式等均相同, 且消浪板相对入水深度均为 0.85、倾斜角度均为 15°, 以便进行比较。

从图 7 中可以看出, 3 种开孔率消浪板的反射系数随周期增大而减小; 此外, 开孔率越大模型反射系数越小, 最小反射系数在 0.1 左右。从图 8 可以看出, 3 种开孔率消浪板透射系数随周期增大而减小, 最小透射系数在 0.4 左右; 此外, 开孔率越大模型透射系数越大, 最大透射系数在 0.7 左右。

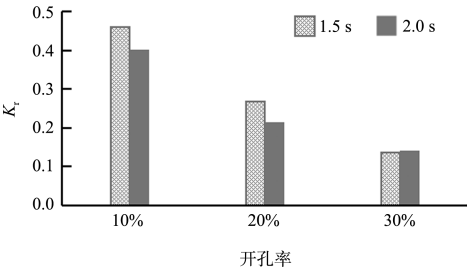


图 7 反射系数  $K_r$

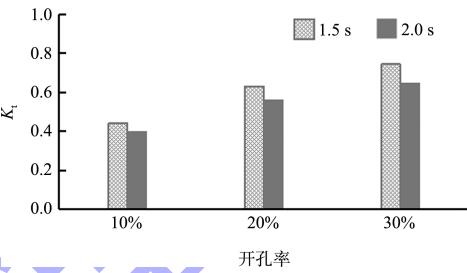


图 8 透射系数  $K_t$

从表 2 可以看出, 10% 开孔率消浪板反射波能占比远远大于另两种开孔率消浪板, 且透射波能占比远远小于另两种开孔率消浪板, 透空堤消耗波能较多, 消浪性能更优, 这是由于消浪板开孔率较小, 波浪与消浪板相互摩擦作用增强, 削减波能也就越多。

因此, 从防波堤消能角度分析, 布置 10% 开孔率消浪板可以提高透空堤波浪耗散能力, 约可消耗掉 60% 以上波浪能量。

表 2 消浪板开孔率变化的波能分析

水深 $d/\text{m}$	周期 $T/\text{s}$	波高 $H/\text{m}$	开孔率/%	波能占比/%		
				堤前波能反射率 $E_r$	堤后波能透射率 $E_t$	防波堤波能耗散率 $E_d$
0.65	1.5	0.10	10	21.15	19.41	59.44
			20	7.12	39.47	53.41
			30	1.84	55.35	42.80
	2.0	0.10	10	16.08	16.04	67.89
			20	4.59	31.58	63.83
			30	1.98	42.40	55.61

3.2 消浪板相对入水深度的影响

研究表明, 波浪能量主要集中在静水面附近 3 倍波高范围内, 因此消浪板深入水面距离也会对

透空堤的消浪能力产生影响。消浪板相对入水深度是指消浪板淹没于水面以下垂直距离与水深的比值, 改变消浪板相对入水深度时, 其开孔率均

为 10%、倾斜角度均为 15°。

由图 9 可知，模型反射系数随相对入水深度减小而减小，减小幅度随之增加。由图 10 可知，模型透射系数随相对入水深度增大而减小，减小幅度逐渐变大，其变化趋势与反射系数刚好相反。分析可知，根据波能分布规律，较长消浪板对波浪削减作用更强，即开孔消浪板相对入水深度越大，透空堤消浪性能越好。

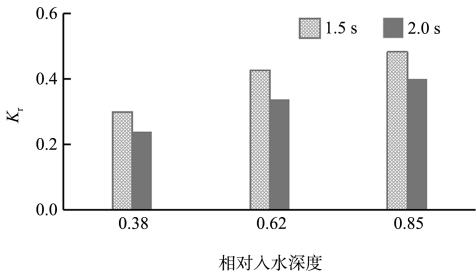


图 9 反射系数  $K_r$

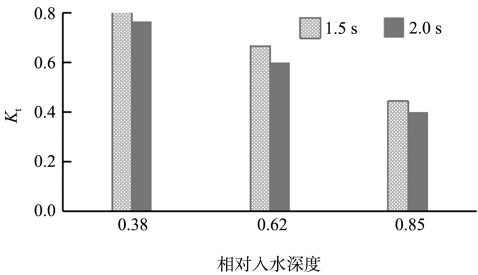


图 10 透射系数  $K_t$

表 3 给出了消浪板相对入水深度改变时的波能分布。可知，消浪板相对入水深度越大，透空堤消耗波能越多，透射波能占比越小，而堤前反射回外海的波能占比越大，但增加幅度并不大。因此，此种透空堤的开孔消浪板相对入水深度不宜过小，但一味增大相对入水深度又会影响透空堤前后水体交换能力，因此开孔消浪板相对入水深度为 0.85 时效果较好。

表 3 消浪板相对入水深度变化的波能变化

水深 $d/m$	周期 $T/s$	波高 $H/m$	直对入水深度	波能占比/%		
				堤前波能反射率 $E_r$	堤后波能透射率 $E_t$	防波堤波能消耗散率 $E_d$
0.65	1.5	0.10	0.38	8.95	72.50	18.55
			0.62	18.21	44.51	37.29
			0.85	23.33	19.72	56.96
	2.0	0.10	0.38	5.70	58.93	35.37
			0.62	11.35	36.23	52.42
			0.85	15.99	15.88	68.13

3.3 消浪板倾斜角度的影响

波浪入射方向与消浪板夹角也会对透空堤消浪性能产生影响，改变消浪板倾斜角度时，其开孔率均为 10%、相对入水深度均为 0.85。本文中消浪板倾斜角度定义为与垂直方向所成夹角。

从图 11 和图 12 中可以看出，消浪板倾斜角度变化对反射系数、透射系数影响较小，但开孔消浪板 -15° 倾斜时反射、透射系数均相对较小，说明其对削减堤后波浪效果更好。

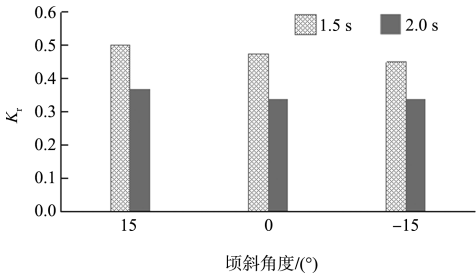


图 11 反射系数  $K_r$

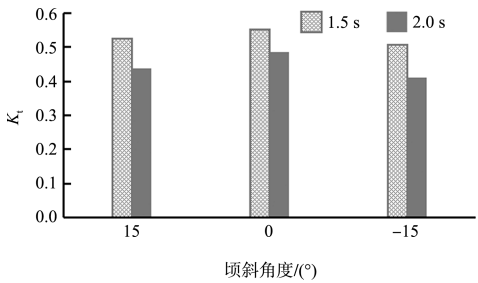


图 12 透射系数  $K_t$

表 4 给出消浪板倾斜角度改变时的波能分布。可知，0° 与 15° 消浪板波能分布相近，而 -15° 消浪板反射波能占比与透射波能占比较另两种倾斜角度消浪板均较小，透空堤消耗波能更多，说明布置 -15° 消浪板时透空堤消浪性能更优，这是因为 -15° 消浪板与波面之间形成一个楔形，波浪传播到此处时与板相互作用增大，消浪性能更佳。

表 4 消浪板倾斜角度变化的波能分析

水深 $d/\text{m}$	周期 $T/\text{s}$	波高 $H/\text{m}$	倾斜角度 $/\text{^\circ}$	波能占比/%		
				堤前波能反射率 $E_r$	堤后波能透射率 $E_t$	防波堤波能耗散率 $E_d$
0.65	1.50	0.10	15	25.14	27.63	47.22
			0	22.57	30.54	46.89
			-15	20.16	25.70	54.14
	2.00	0.10	15	13.67	19.26	67.07
			0	11.47	23.48	65.04
			-15	11.50	16.89	71.61

4 结论

1) 新型桩基透空堤既可挡浪挡沙也可保证港内外水体交换、保护海域水动力环境, 其消浪性能显著, 消浪板开孔率对消浪性能影响表现为: 开孔率越大, 透空堤反射系数越小, 透射系数越大。

2) 开孔消浪板相对入水深度不宜过小, 一味增大相对入水深度会影响透空堤前后水体交换能力, 开孔消浪板相对入水深度为 0.85 效果较佳。

3) 开孔消浪板-15°布置时, 与波面之间形成一个楔形, 波浪传播到此处与板相互作用增大, 透空堤消浪性能大幅提升。

4) 综上, 水位位于开孔消浪板处时, 消浪板形式对该新型附带消浪板桩基透空堤消浪性能影响较为明显, 消浪板开孔率为 10%、相对入水深度为 0.85、倾斜角度为-15°的设计方案效果最佳, 透射波能占比仅约为 17%。

参考文献:

[1] LIU P, ABBASPOUR M. Wave scattering by a rigid thin barrier [J]. Journal of the waterway, 1982, 108(4): 479-491.

[2] YU X P, CHWANG A T. Water waves above submerged porous plate[J]. Journal of engineering mechanics, 1994, 120(6): 1270-1282.

[3] YIP T L, CHWANG A T. Perforated wall breakwater with internal horizontal plate [J]. Journal of engineering mechanics, 2000, 126(5): 533-538.

[4] 齐鹏, 王永学. 三维数值波浪水池技术与应用[J]. 大连理工大学学报, 2003(6): 825-830.

[5] 李靖波, 张宁川, 刘爱珍. 潜式双层水平板型防波堤的数值研究[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 317-324.

[6] 胡萍, 高源, 冯静, 张岩松, 等. 多层挡板透空堤消浪效果影响因素试验研究[J]. 水运工程, 2015(11): 59-66.

[7] 张婷, 张庆河, 韩涛. 数值波浪水槽中的斜坡式孔隙结构规则波消波研究[J]. 广东水利水电, 2010(10): 43-46.

[8] 相昌盛. 三维数值波浪水槽的构建及其应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.

[9] 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.

[10] GODA Y, SUZUKI Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments[C]//Proc. 15th Int. Coast. Engrg. Conf. New York: ASCE, 1976: 828-845.

( 本文编辑 武亚庆 )

( 上接第 12 页 )

[7] MICHE A. Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur croissante ou décroissante[R]. Paris: Annales Des Ponts Et Chaussées, 1944.

[8] 李玉成. 波浪在浅水区的变形及破碎[J]. 海洋学报( 中文版), 1997(3): 111-118.

[9] LI Y C, DONG G H. Wave breaking phenomena of irregular waves combined with opposing current [J]. China ocean engineering, 1993, 7(2): 197-206.

[10] GODA Y. Reanalysis of regular and random breaking wave statistics[J]. Coastal engineering journal, 2010, 52(1): 71-106.

[11] 柳淑学, 胡书义, 李金宣, 等. 斜向和多向波浪的破碎指标研究[J]. 水动力学研究与进展( A 辑), 2017, 32(4): 423-432.

[12] 贾伟, 柳淑学, 李金宣, 等. 多向不规则波在三维透镜地形上的破碎指标研究[J]. 水运工程, 2021(1): 21-26.

[13] 黄元中. 斜坡堤波浪爬高的数值研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

[14] DEMIRBILEK Z, NWOGU O G. Boussinesq modeling of wave propagation and runup over fringing coral reefs, model evaluation report[R]. Washington: US Army Corps of Engineers, 2007.

( 本文编辑 王璁 )