

倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤的 消浪性能研究

王 强¹, 刘 睿^{2*}, 梁丙臣³

(1. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司技术检测中心, 山东 东营 257000;

2. 青岛国实科技集团有限公司 青岛超级计算与大数据中心, 山东 青岛 266061;

3. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266061)

摘 要:本文提出了一种倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤,通过物理模型试验对规则波作用下防波堤的消浪性能进行了研究。试验中观测了桩基透空型防波堤迎浪侧和背浪侧波面的变化过程,探讨了不同入射波浪条件下防波堤挡浪板的开孔率 ϵ 和布置形式 B 对其消浪性能的影响,分析了防波堤的反射系数 K_r 、透射系数 K_t 以及波能耗散系数 K_d 随着相对波高 H/D 和相对堤宽 W/L 的变化关系,并从波浪能量分布的角度分析此种防波堤的消浪机理。研究结果表明,单层挡浪板的开孔率自 30% 降低至 10%,平均透射系数可减小约 24.3%,平均耗散系数可增长约 12.8%;双层挡浪板防波堤的反射系数取决于前排挡浪板的开孔率,透射系数取决于挡浪板组合中的最小开孔率。

关键词:桩基透空式防波堤;模型试验;消浪性能;透射系数;波能耗散系数

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2022)02-0095-10

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220106001

引用格式:王强,刘睿,梁丙臣.倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤的消浪性能研究[J].海岸工程,2022,41(2):95-104.

WANG Q, LIU R, LIANG B C. Experimental study on wave-dissipating performance of pile-supported breakwater with perforated inclined wave screen[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(2): 95-104.

防波堤是沿海港口工程中的重要组成部分,用于防御波浪对港口的侵袭,不同型式的防波堤具有不同的适用范围^[1]。桩基透空式防波堤主要由上部消浪结构和下部桩基组成,具有自重轻、材料省的优点,适用于水深较大、土质较软的海域^[2]。该类防波堤不仅能满足抵御削减波浪的基本功能要求,又可以有效保证港内外的水体交换,能最大程度地减轻防波堤对海洋自然及生态环境的负面影响^[3-5],受到国内外学者与工程技术人员广泛关注。

20 世纪中叶, Wiegel^[6] 首先提出了一种由多排小间距刚性桩组成的透空式防波堤,并推算出有限水深和无越浪情况下的透射系数近似解析解。此后越来越多的学者对此类结构展开讨论,研究不同型式的桩基透空式防波堤所引起的海岸环境变化。Neelamani 和 Vedagiri^[7] 提出了一种部分淹没的双层垂直挡板式桩基防波堤,通过物理模型试验对比研究其在深水区 and 浅水区的消浪效果, Laju 等^[8] 指出此类防波堤的透射系数会随着相对淹没深度的增加而减小,随后 Neelamani 和 Rajendran 还提出了类似的“T”形^[9] 和“ $\perp$ ”形^[10] 桩基防波堤。其后, Rageh 等^[11] 又提出了一种安装在多排桩柱上的箱体式桩基防波堤,并指出影响此类防波堤消浪性能的主要因素是箱体的相对淹没深度和相对宽度。

为了进一步减小波浪反射,提升港内外的水体交换,防波堤的上部消浪结构也被设计为透空型式。Bennett^[12] 提出了水平板式桩基防波堤, Wang 等^[13] 指出水平板的相对间隙对透射系数的影响大于反射系数,且垂直方向受力大于水平方向。Rageh 和 Koraim^[14] 提出了一种具有透空结构的垂直挡浪墙式桩基防波堤,研究表明

收稿日期: 2022-01-06

资助项目: 国家自然科学基金项目——桩基环保型防波堤的基础理论与设计方法(51739010)

作者简介: 王 强(1970—),男,高级工程师,主要从事海洋工程安全方面研究. E-mail: wangqiang196.slyt@sinopec.com

* 通信作者: 刘 睿(1992—),女,高级工程师,博士,主要从事港口、海岸及近海工程方面研究. E-mail: liurui0820@163.com

(王佳实 编辑)

这种防波堤的透射系数随着相对水深、相对淹没深度和开孔率的减小而减小, Koraim 等^[15]将试验研究从单层挡浪墙扩展到双层, 指出增加一层挡浪墙可以将透射系数减小 10%~20%, 随后 Koraim 等^[16]又在此基础上提出了 C 型挡浪条式桩基防波堤和 L 型挡浪条式桩基防波堤。Nakamura 等^[17]提出了倾斜挡板式桩基防波堤, 证明倾斜挡板可以增加波浪的耗散。

本文则提出了一种倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤, 该类防波堤的桩基采用方桩, 下部结构采用桩连板的形式, 上部结构为垂直型挡浪墙, 这种新型的桩基透空型防波堤的示意图见图 1。通过物理模型试验研究, 讨论在规则波入射条件下此种桩基透空型防波堤的反射系数、透射系数、能量耗散系数和波能分布特征, 分析影响其消浪性能的主要因素, 以期对此种桩基透空型防波堤的实际应用和进一步研究提供参考。

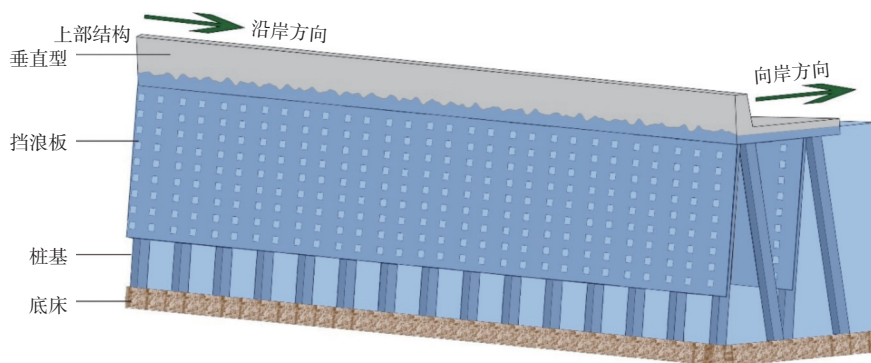


图 1 倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤

Fig. 1 Sketch map of the pile-supported breakwater with perforated inclined wave screen

1 模型设计

防波堤试验模型(图 2)选用铝合金材质, 内部采用铅块配重, 各组成部分使用螺丝固定, 可改变挡浪板的开孔率 ε 和布置形式 B 。防波堤模型共有 7 种结构形式, 本研究对 7 种结构形式均进行研究, 分别设为工况 1~工况 7, 对应的挡浪板形式依次命名为 B1~B31。挡浪板的开孔率有 3 种情况, 分别为 10%、20% 和 30% (图 3), 挡浪板的开孔中心位置、开孔数量和开孔排布形式等要素均相同。挡浪板的布置形式可分为单层挡浪板和双层挡浪板, 当挡浪板为单层时, 将其安装在第一排斜桩上; 当挡浪板为双层时, 可分别安装在第一排和第三排斜桩上, 且双层挡浪板的开孔率具有多种组合方式(图 4)。试验模型的具体参数如表 1 所示。

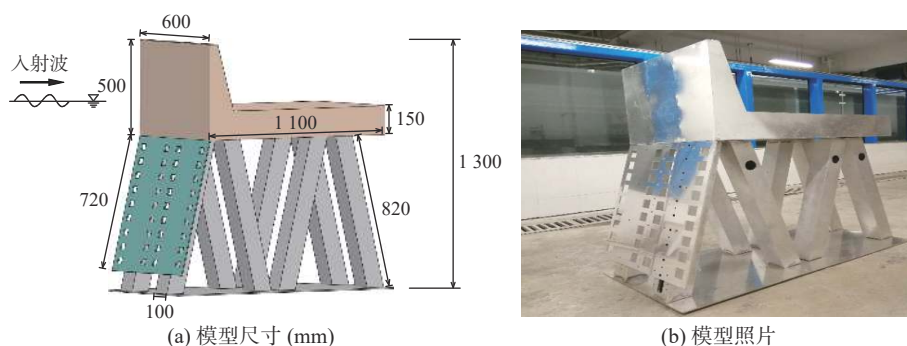


图 2 防波堤模型尺寸(mm)与照片

Fig. 2 Dimensions (mm) and photo of the breakwater model

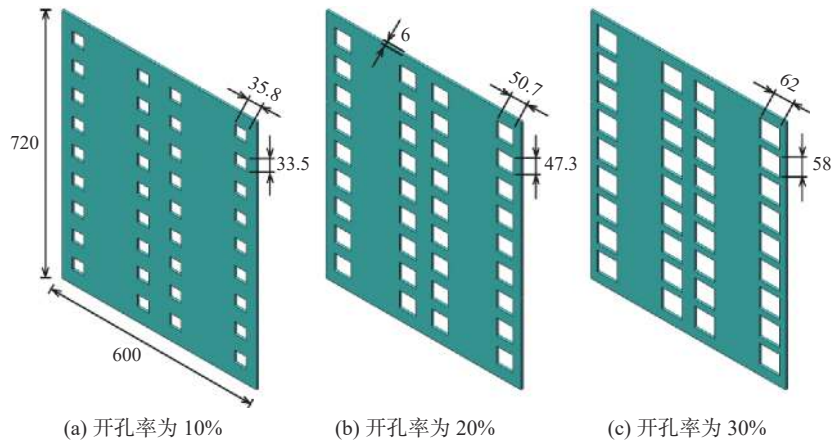


图 3 不同开孔率的挡浪板模型尺寸 (mm)

Fig. 3 Dimensions of the model of perforated inclined wave screen with different open-pore rate (mm)

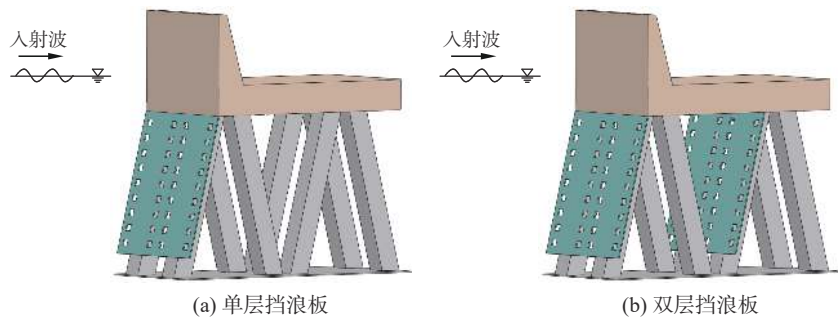


图 4 单层挡浪板和双层挡浪板的桩基透空型防波堤

Fig. 4 The pile-supported perforated breakwater with single inclined wave screen and double included wave screens

表 1 倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤模型参数

Table 1 Parameters of pile-supported breakwater model with perforated inclined wave screen

结构编号	挡浪板布置形式	挡浪板开孔率/%		堤宽/mm
		前排	后排	
工况 1	B1	10		
工况 2	B2	20		
工况 3	B3	30		
工况 4	B11	10	10	1 100
工况 5	B22	20	20	
工况 6	B13	10	30	
工况 7	B31	30	10	

注: 空白处无数据。

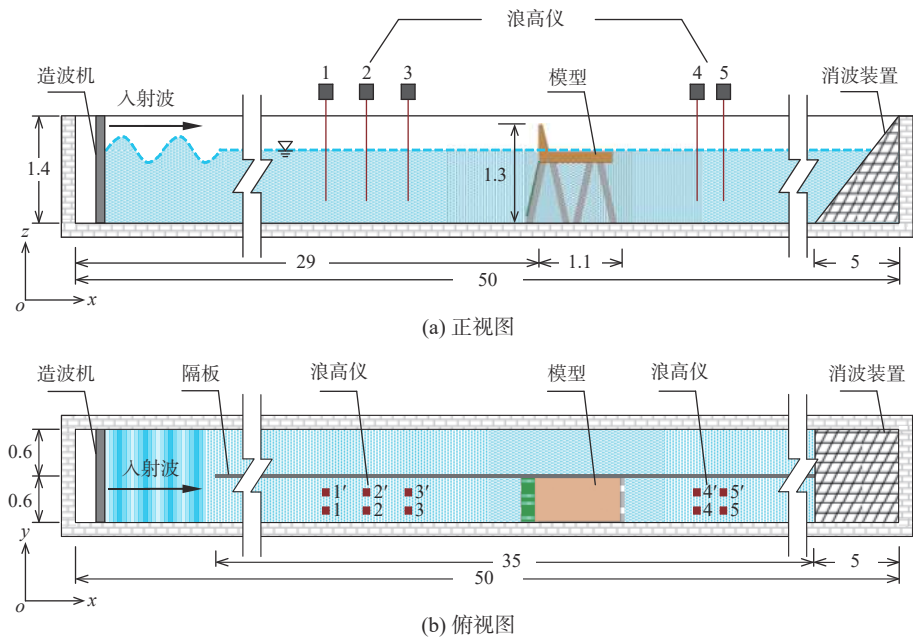
2 物理模型试验

2.1 设备和布置

物理模型试验开展于山东交通学院港航水动力学实验室的波浪水槽, 该水槽长 50 m, 宽 1.2 m, 深 1.4 m。水槽前端的造波机采用低惯性伺服电机推板形式结构, 可造出波形稳定、重复性良好的波列, 造波周期为

0.6~5.0 s、模拟波高为 0.03~0.25 m。水槽末端装有消浪网,可有效减少波浪反射。为最大程度地减小波浪的二次反射,在水槽中部的试验区域安装薄壁隔板,将水槽一分为二,2 个通道的宽度均为 0.6 m。

倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤模型放置于距水槽造波端 29 m 位置处,试验中共布置 10 支浪高仪对波高进行测量,具体模型布置如图 5 所示。以第一排浪高仪 1#和 1'#为例,两者在水槽中等间距并列布设,同时记录波浪过程,测量结果取二者平均值。模型迎浪侧,浪高仪 1#~3#和 1'#~3'#的布设位置符合 Goda 两点法^[18]的要求, $L_{12}=L_{23}(L_{1'2'}=L_{2'3'})$, L_{12} 随工况而调整,调整范围为 0.39~1.71 m,浪高仪 3#(3'#)与模型的间距约 6 m。模型向岸侧,模型与浪高仪 4#(4'#)间距约 4 m,浪高仪 4#~5#和 4'#~5'#的间距固定不变, $L_{45}=L_{4'5'}=0.3$ m。



注：图中数值单位为 m。

图 5 倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤模型试验的布置

Fig. 5 Schematic diagram of model experimental layout for pile-supported breakwater model with perforated inclined wave screen

2.2 试验条件和组次

综合考虑实际工程中的典型工况和实验室水槽尺寸及造波能力,确定模型试验所采用的波高、周期组合。试验水深 $D=0.95$ m, 仅研究规则波条件下防波堤的消浪特征,波浪周期 T 为 1.25~2.50 s,波高 H 为 0.06~0.22 m。试验采用 11 种试验组次和 7 种结构形式的组合,共计 77 种工况,具体的试验组次见表 2。

表 2 倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤模型波浪参数

Table 2 Parameters of pile-supported breakwater model with perforated inclined wave screen

试验组次	周期/s	波高/m	相对堤宽	相对波高	试验组次	周期/s	波高/m	相对堤宽	相对波高
1	1.00	0.10	0.71	0.11	7	1.50	0.22	0.33	0.23
2	1.25	0.10	0.46	0.11	8	1.75	0.10	0.26	0.11
3	1.50	0.06	0.33	0.06	9	2.00	0.10	0.21	0.11
4	1.50	0.1	0.33	0.11	10	2.25	0.10	0.18	0.11
5	1.50	0.14	0.33	0.15	11	2.50	0.10	0.16	0.11
6	1.50	0.18	0.33	0.19					

2.3 试验现象

图 6 为工况 1 结构形式的防波堤模型消浪性能试验现象, 试验工况为波高较大的情况, 相对波高 H/D 为 0.23, 相对堤宽 W/L 为 0.33。在消浪过程中波浪对上部结构挡浪墙产生强烈的冲击作用, 波浪沿挡浪墙爬升至最高点后, 在重力作用下迅速跌落, 产生猛烈冲击, 同时有大量气泡卷入, 水体紊动剧烈, 波浪破碎。同时, 挡浪板在波浪的传播过程中与水质点相互阻碍、发生震荡, 可增强波能的耗散。

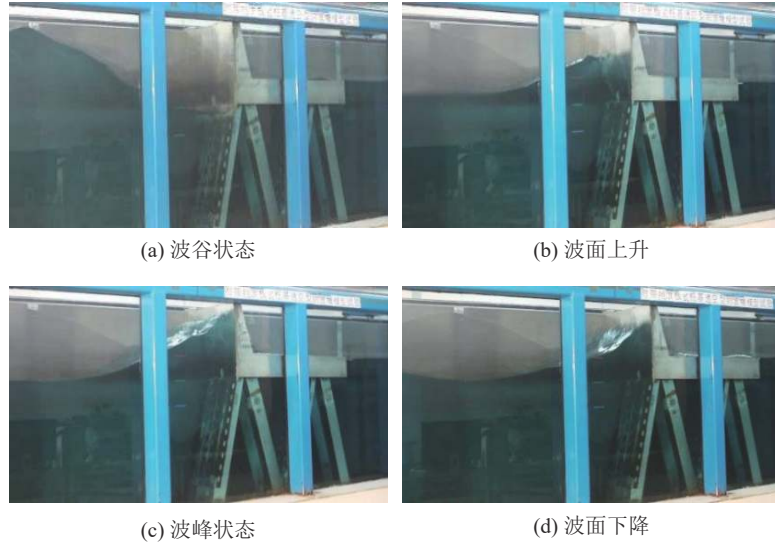


图 6 防波堤的消浪过程

Fig. 6 Wave-dissipating process of the breakwater

2.4 试验数据采集与处理

试验前率定浪高仪, 确保测量仪器正常使用且精准测量。试验过程中, 同时记录 10 个测点的波面过程, 模型前的 6 支浪高仪的测量数据可通过 Goda 两点法^[18]分离得出入射波高和反射波高, 模型后的 4 支浪高仪的数据可由上跨零点法统计得出透射波高, 每组试验重复 3 遍, 取其平均值作为最终结果。

反射系数、透射系数和波能耗散系数是表征防波堤消浪性能的重要指标。反射系数(K_r)指反射波高与入射波高的比值, 透射系数(K_t)指透射波高与入射波高的比值, 其计算公式为:

$$K_r = H_r/H_i, \quad (1)$$

$$K_t = H_t/H_i. \quad (2)$$

式(1)~(2)中, H_i 为入射波高, H_r 为反射波高, H_t 为透射波高。根据能量守恒定律, 波能耗散系数(K_d)满足:

$$K_d^2 + K_r^2 + K_t^2 = 1, \quad (3)$$

因此, K_d 可通过 K_r 和 K_t 求得, 如下式:

$$K_d = \sqrt{1 - K_r^2 - K_t^2}. \quad (4)$$

3 试验结果分析

3.1 单层挡浪板开孔率对消浪性能的影响

为研究挡浪板的开孔率对此种防波堤消浪性能的影响, 选取防波堤模型工况 1、工况 2 和工况 3 作为试

验研究对象(图7、图8和图9)。单层挡浪板开孔率的减小,增大了防波堤模型的反射系数和波能耗散系数,有效降低了防波堤模型的透射系数。反射系数随着相对波高的增大而减小,随相对堤宽的增大而增大,但单层挡浪板开孔率对反射系数的影响较小。透射系数随着相对波高的增大而增大,随相对堤宽增大而减小。当单层挡浪板开孔率分别为10%、20%和30%时,透射系数的范围分别是0.07~0.58、0.07~0.65和0.08~0.70,平均透射系数分别是0.35、0.39和0.43。波能耗散系数在整体上与相对波高和相对堤宽呈正相关关系,当堤宽为波长的0.25倍时,耗散系数相对较大。单层挡浪板开孔率为10%时,防波堤模型的耗散系数的增长幅度最小。当单层挡浪板开孔率分别为10%、20%和30%时,耗散系数的范围分别是0.50~0.73、0.48~0.73和0.42~0.71,平均耗散系数分别是0.64、0.63和0.57。

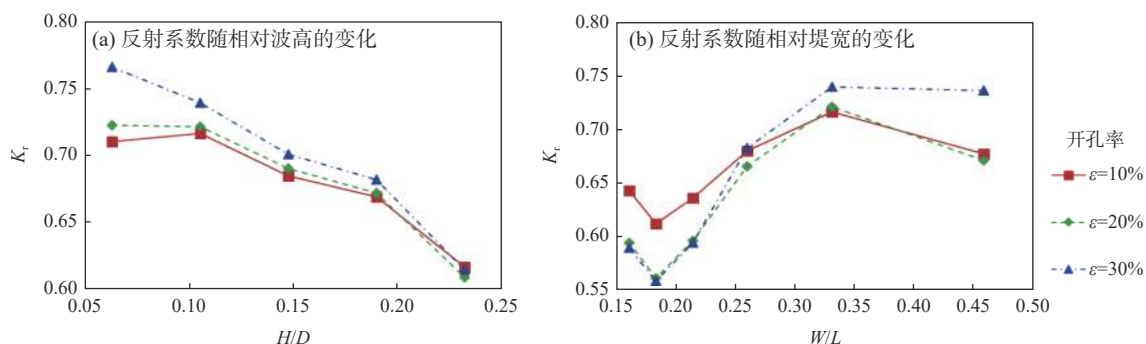


图7 挡浪板开孔率对反射系数的影响

Fig. 7 The influence of wave screen open-pore rate ε on reflection coefficient K_r

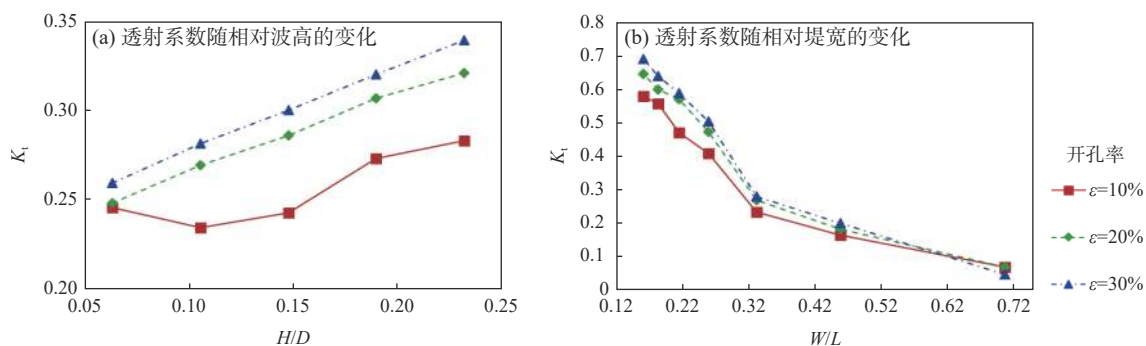


图8 挡浪板开孔率对透射系数的影响

Fig. 8 The influence of wave screen open-pore rate ε on transmission coefficient K_t

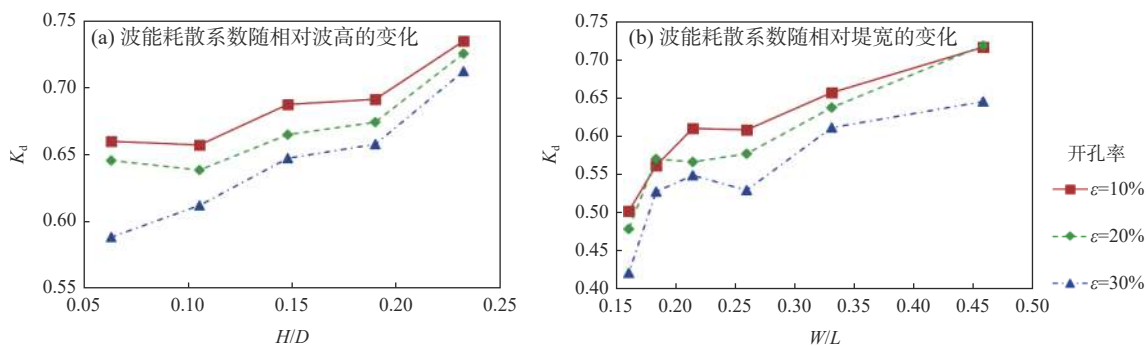


图9 挡浪板开孔率对波能耗散系数的影响

Fig. 9 The influence of wave screen open-pore rate ε on wave-dissipating coefficient K_d

由此可知,当防波堤采用单层挡浪板时,挡浪板的开孔率自 30% 降低至 10%, 平均透射系数可减小约 24.3%, 平均耗散系数可增长约 12.8%, 挡浪板开孔率的减小可提高防波堤的消浪能力。

3.2 双层挡浪板布置形式对消浪性能的影响

为研究挡浪板的布置形式对此种防波堤消浪性能的影响,选取防波堤模型工况 1、工况 4、工况 5、工况 6 和工况 7 作为试验研究对象(图 10~图 12)。对比可知,挡浪板由单层板变为双层板,降低了防波堤模型的透射系数,增大了波能耗散系数,但对反射系数的影响并不显著。在试验范围内,此种防波堤对不同波高的波浪(相对波高为 0.06~0.34)均具有良好的消浪效果,但对长周期波浪(相对堤宽<0.25)的消浪效果有限。

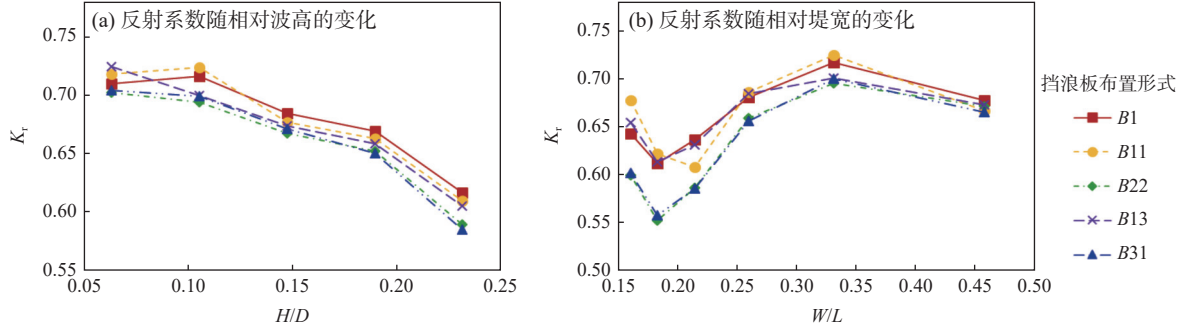


图 10 挡浪板布置形式对反射系数的影响

Fig. 10 The influence of wave screen combination B on reflection coefficient K_r

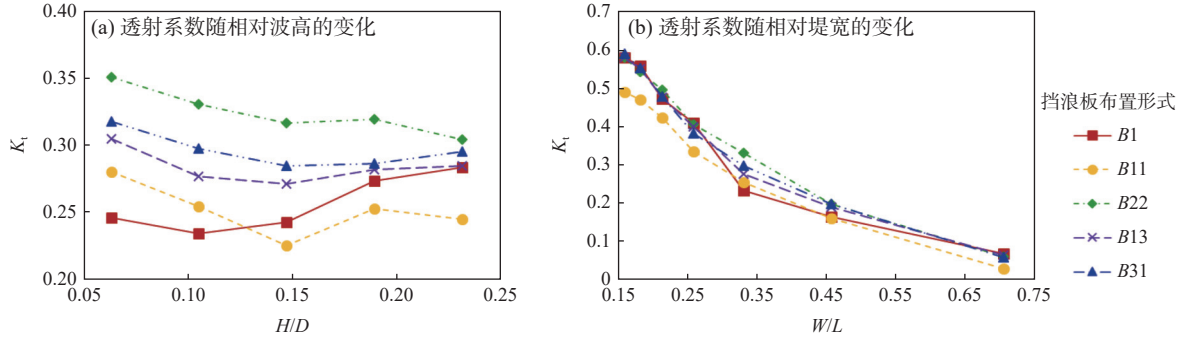


图 11 挡浪板布置形式对透射系数的影响

Fig. 11 The influence of wave screen combination B on transmission coefficient K_t

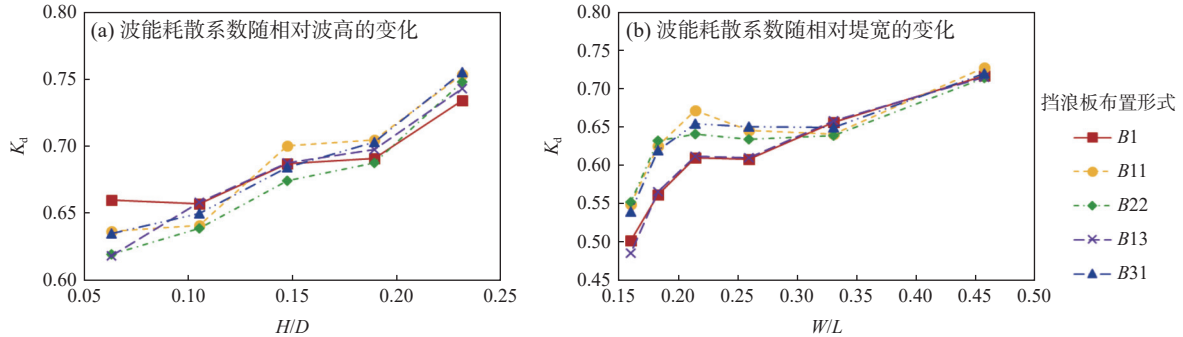


图 12 挡浪板布置形式对波能耗散系数的影响

Fig. 12 The influence of wave screen combination B on dissipation coefficient K_d

透射系数 K_t 随相对波高无明显变化,随相对堤宽的增大整体上呈现减小的趋势。挡浪板的布置形式分别为 $B1$ 、 $B11$ 、 $B22$ 、 $B13$ 和 $B31$ 时,其透射系数的范围分别为 0.07~0.58、0.03~0.49、0.06~0.58、0.07~0.58

和 0.06~0.59, 平均透射系数分别为 0.35、0.25、0.39、0.30 和 0.32。透射系数从小到大, 挡浪板的布置形式依次为 $B11$ 、 $B13$ 、 $B31$ 、 $B1$ 、 $B22$ 。可知, 此种防波堤的透射效果取决于挡浪板组合中的最小开孔率, 例如开孔率为 10% 的单层挡浪板 ($B1$) 模型的消浪效果优于开孔率均为 20% 的双层挡浪板 ($B22$) 模型; 当挡浪板组合中的最小开孔率相同时, 双层挡浪板模型的消浪效果优于单层挡浪板模型, 例如开孔率均为 10% 的双层挡浪板 ($B11$) 模型的平均透射系数 K_t 较开孔率为 10% 的单层挡浪板 ($B1$) 模型降低了 12.9%; 当防波堤模型均为双层挡浪板且最小开孔率相同时, 消浪效果则取决于另一块挡浪板的开孔率。

波能耗散系数在整体上与相对波高、相对堤宽均呈正相关关系。挡浪板的布置形式分别为 $B1$ 、 $B11$ 、 $B22$ 、 $B13$ 和 $B31$ 时, 耗散系数的范围分别是 0.50~0.73、0.55~0.78、0.55~0.75、0.49~0.74 和 0.54~0.76, 平均耗散系数分别为 0.64、0.70、0.67、0.64 和 0.69。双层挡浪板提高了此种防波堤模型对波能的耗散, 挡浪板的布置形式由单层挡浪板 $B1$ 变为双层挡浪板 $B11$ 时, 防波堤模型的平均耗散系数增加了约 9.4%。需特别指出的是, 若此种防波堤模型为双层挡浪板且 2 个挡浪板的开孔率不同时, 将开孔率大的挡浪板安装在前排桩基可获得更好的消浪效果, 例如挡浪板布置形式为 $B31$ 的防波堤模型与挡浪板布置形式为 $B13$ 的防波堤模型相比, 其平均耗散系数增长了约 7.8%, 这可能是由于前排挡浪板的开孔率较大, 更多的波浪透过前排挡浪板后, 波浪在两层挡浪板之间来回震荡, 导致波能耗散加剧。

3.3 波能分布特征及消浪机理分析

波浪能量分布的角度进一步分析此种桩基透空型防波堤的消浪性能, 结果如图 13 所示。入射波浪与防波堤模型相互作用后, 波浪能量被转化为 3 个部分: ①反射波浪能量 E_r , 主要是由波浪与上部挡浪墙、下部透空挡浪板以及桩基的相互作用而产生, 以反射波的形式向入射波相反的方向传输; ②透射波浪能量 E_t , 由波浪传播通过防波堤而产生, 以透射波的形式继续向前传输; ③耗散波浪能量 E_d , 主要包括因波浪与防波堤的摩擦作用和水体紊动所损失的能量。防波堤的消浪性能主要源于对波浪的反射作用和波浪的能量损耗。

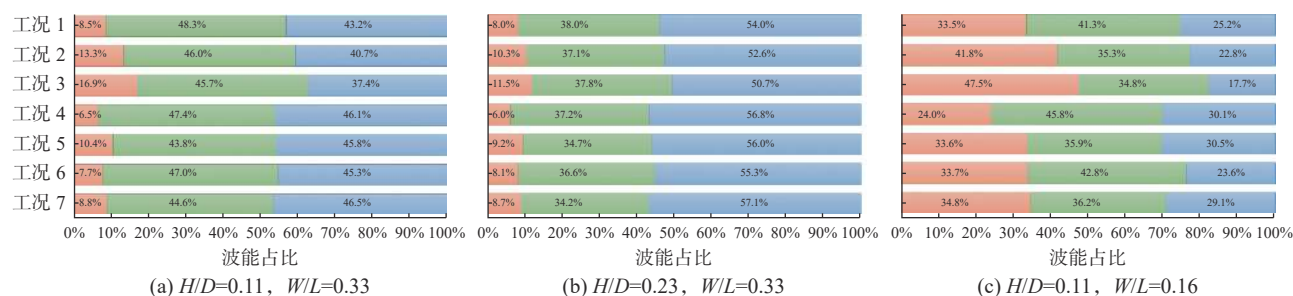


图 13 不同防波堤模型情况下的波能分布

Fig. 13 The wave energy distributions under different cases of breakwater model

利用图 13a 和图 13b 对比分析了入射波的波高对波能分布的影响, 相对波高分别为 0.11 和 0.23, 其他参数固定不变。对比分析发现, 当入射波浪的波高增大时, 波能骤增, 水体与防波堤间发生强烈的相互冲击, 波形急剧变化, 波浪运动的非线性增强, 波浪破碎的程度加剧, 水体紊动强烈, 局部能量损耗增高, 各防波堤模型的耗散波能占比增加, 反射波能占比减小, 透射波能占比减小, 其中透射波能占比的变化幅度较小。对比分析入射波的波长对波能分布的影响(图 13a 和图 13c)可知, 相对堤宽分别为 0.33 和 0.16, 其他参数固定不变。当入射波浪的波长增大时, 在试验范围内, 波浪运动的非线性减弱, 水体紊动减缓, 波能沿程损失减小, 防波堤对于长周期波浪的波能耗散能力降低, 各防波堤模型的耗散波能占比大幅度下降, 透射波能占比显著增加, 反射波能占比的改变相对较小。可知, 此种防波堤对于波高较大的波浪仍然具有良好的消浪效果, 但对于周期较大的波浪, 其消浪效果受到局限。

对比分析单层挡浪板的开孔率对波能分布影响的结果表明, 挡浪板的开孔结构改变了防波堤与入射波浪的接触面积, 同时在波浪的传播过程中, 开孔区域内的水质点会发生震荡与相互阻碍。当挡浪板的开孔率

减小时, 防波堤与入射波浪的接触面积增大, 有更少的水体从开孔中穿过, 同时开孔内的水质点碰撞、冲击、相互挤压的程度加剧, 进而波浪运动的非线性增强, 波浪破碎加剧, 水体紊动强烈, 波能损耗程度增大。挡浪板开孔率的减小, 使得透射波能占比减小, 耗散波能占比增大, 反射波能占比增大, 防波堤的消浪效果增强。

再对比分析双层挡浪板的布置形式对波能分布的影响可知, 当防波堤采用双层挡浪板时, 前后排挡浪板上波浪力存在相位差, 波浪在多层挡浪板之间来回震荡, 水质点运动方向多次发生改变, 水质点间相互碰撞, 水体紊动加剧且产生涡旋, 波能损耗增强。相较于单层挡浪板, 双层挡浪板使得耗散波能占比显著增大, 透射波能占比减小, 反射波能占比无明显改变。当双层挡浪板的前后开孔率不同时, 反射波能占比取决于前排挡浪板的开孔率, 例如前排挡浪板开孔率为 30% 的防波堤模型工况 7 的反射波能占比最小, 这是由于前排挡浪板的开孔率较大时, 防波堤与入射波浪的接触面积减小, 更多的水体穿过第一层挡浪板继续传播, 减弱了波浪的反射效应。然而, 透射波能占比则取决于挡浪板组合中的最小开孔率, 例如透射波能占比最高的是最小开孔率为 20% 的防波堤模型工况 5, 这是由于挡浪板的最小开孔率限制了可以最终穿过防波堤的水体。当双层板中前后挡浪板的开孔率不同时, 将开孔率较大的挡浪板安装在迎浪侧时, 增强波浪在两层挡浪板之间的震荡, 导致波能耗散加剧, 可提高耗散波能的占比。

4 结 论

本文对倾斜挡浪板式桩基透空型防波堤的消浪性能做了物理模型试验研究, 探讨了不同入射波浪条件下防波堤挡浪板的开孔率和布置形式对其消浪性能的影响, 分析了防波堤的反射系数、透射系数以及波能耗散系数随着相对波高和相对堤宽的变化关系, 主要结果如下:

1) 此种防波堤的透射系数随相对堤宽的增大而减小, 随相对波高的增大而增大; 耗散系数在整体上与相对波高、相对堤宽均呈正相关关系, 但二者随相对波高的改变较小。在试验范围内, 两者对不同波高的波浪均具有良好的消浪效果, 但对长周期波浪(相对堤宽 <0.25)的消浪效果有限。

2) 单层挡浪板开孔率的减小可提高防波堤的消浪性能, 挡浪板的开孔率自 30% 降低至 10%, 平均透射系数可减小约 24.3%, 平均耗散系数可增长约 12.8%。

3) 当防波堤采用双层挡浪板时, 防波堤的反射系数取决于前排挡浪板的开孔率, 透射系数取决于挡浪板组合中的最小开孔率。因此, 若双层板中前后排挡浪板的开孔率不同, 将开孔率较大的挡浪板安装在迎浪侧, 可使波能耗散系数大幅增加, 反射系数显著降低, 而透射系数无明显改变。

4) 从波浪能量分布的角度分析防波堤的消浪机理, 此种防波堤可通过改变水质点的运动轨迹, 加强水质点的震荡和相互碰撞, 提高波浪运动的非线性, 增强水体紊动, 形成局部涡旋等方式增大波浪能量的耗散。

参考文献 (References):

- [1] OUMERACI H. Review and analysis of vertical breakwater failures[J]. *Coastal Engineering*, 1994, 22(1/2): 3-29.
- [2] ISAACSON M, BALDWIN J, ALLYN N, et al. Wave interactions with perforated breakwater[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2000, 126(5): 229-235.
- [3] RAMNARAYAN S K, SANNASIRAJ S A, SUNDAR V. Hydrodynamic performance of pile supported breakwaters—A review[C]//International Conference on Asian and Pacific Coasts. Singapore: Springer, 2019: 929-935.
- [4] 曹成林, 张永强, 熊丛博, 等. 防波堤建设对海底泥沙冲淤环境影响研究[J]. *海岸工程*, 2016, 35(1): 9. CAO C L, ZHANG Y Q, XIONG C B, et al. Research on the influence of breakwater construction to seabed sediment scouring and silting environment[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 35(1): 9.
- [5] 姜宁林, 谢宁宇. 中日直立式双板桩防波堤设计方法比较研究[J]. *海岸工程*, 2015, 34(2): 9. JIANG N L, XIE N N. A comparative study on the design methods of vertical double sheet pile breakwater between China and Japan[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 34(2): 9.
- [6] WIEGEL R L. Closely spaced piles as a breakwater[J]. *Dock and Harbour Authority*, 1961, 42: 150.
- [7] NEELAMANI S, VEDAGIRI M. Wave interaction with partially immersed twin vertical barriers[J]. *Ocean Engineering*, 2002, 29(2): 215-238.

- [8] LAJU K, SUNDAR V, SUNDARAVADIVELU R. Hydrodynamic characteristics of pile supported skirt breakwater models[J]. *Applied Ocean Research*, 2011, 33(1): 12-22.
- [9] NEELAMANI S, RAJENDRAN R. Wave interaction with T-type breakwaters[J]. *Ocean Engineering*, 2002, 29(5): 151-175.
- [10] NEELAMANI S, RAJENDRAN R. Wave interaction with '⊥'-type breakwaters[J]. *Ocean Engineering*, 2002, 29(5): 561-589.
- [11] RAGEH O S, KORAIM A S, Salem T N. Hydrodynamic efficiency of partially immersed caissons supported on piles[J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(14): 1112-1118.
- [12] BENNETT G S, MCIVER P, SMALLMAN J V. A mathematical model of a slotted wavescreeen breakwater[J]. *Coastal Engineering*, 1992, 18(3-4): 231-249.
- [13] WANG Y, WANG G, LI G. Experimental study on the performance of the multiple-layer breakwater[J]. *Ocean Engineering*, 2006, 33(13): 1829-1839.
- [14] RAGEH O S, KORAIM A S. Hydraulic performance of vertical walls with horizontal slots used as breakwater[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(8): 745-756.
- [15] KORAIM A S, HEIKAL E M, RAGEH O S. Hydrodynamic characteristics of double permeable breakwater under regular waves[J]. *Marine Structures*, 2011, 24(4): 503-527.
- [16] KORAIM A S, ISKANDER M M, ELSAYED W R. Hydrodynamic performance of double rows of piles suspending horizontal c shaped bars[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 84: 81-96.
- [17] NAKAMURA T, KOHNO T, MORITA Y. Performance of a double-walled barrier with a front wall of inclined plate array[C]//International Society of Offshore and Polar Engineers. The eleventh international offshore and polar engineering conference. Stavanger, Norway, 2001.
- [18] GODA Y, SUZUKI Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments[C]//15th International Conference on Coastal Engineering. New York: The American Society of Civil Engineers, 1976.

Experimental Study on Wave-Dissipating Performance of Pile-Supported Breakwater With Perforated Inclined Wave Screen

WANG Qiang¹, LIU Rui², LIANG Bing-chen³

(1. *Technical Testing Center of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257000, China;*

2. *Qingdao Supercomputing and Data Center, Qingdao GoSci Technology Group, Qingdao 266061, China;*

3. *College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266061, China)*

Abstract: A pile-supported breakwater with perforated inclined wave screen is proposed and its wave-dissipating performance under the action of regular wave is studied through physical model experiments. The changes of the wave surface of the breakwater at both the wave-ward side and the back wave side are observed during the experiments, the influences of the open-pore rate and combination B of the wave screen of the breakwater on the wave-dissipating performance under different incident wave conditions are discussed, the relations of the wave reflection coefficient, transmission coefficient and wave-dissipating coefficient of the breakwater to the relative wave height H/D and relative breakwater width W/L are analyzed and the wave-dissipating mechanism of this type of breakwater is analyzed from the point of view of the wave energy distribution. The results show that in the case of a single perforated inclined wave screen the average transmission coefficient can be reduced by 24.3% and the average wave-dissipating coefficient can be increased by 12.8% when the open-pore rate of the wave screen decreases from 30% down to 10%. In the case of double perforated inclined wave screens, the reflection coefficient of the breakwater depends on the open-pore rate of the front wave screen and the transmission coefficient relies on the minimum open-pore rate of the combined wave screens.

Key words: pile-supported perforated breakwater; model experiment; wave-dissipating performance; transmission coefficient; transmission coefficient

Received: January 6, 2022