

倾斜挡浪板桩基透空堤水动力特性

桂劲松,夏 曦

(大连海洋大学海洋与土木工程学院,辽宁 大连 116023)

摘要:通过物理模型试验和数值模拟试验,对前倾斜、后垂直的双挡浪板桩基透空堤的透射系数、反射系数、波压力,以及波浪爬高等水动力特性进行了系统的数值模拟研究。研究表明,相较于垂直挡浪板,采用倾斜的前挡浪板可明显减小结构的透射系数和反射系数,而波压力和波浪爬高变化不大,体现了更好的挡浪效果。随着挡浪板倾斜角度加大,透射系数、反射系数均呈减小趋势,当挡浪板倾斜角度增大至 40°后,透射系数变化基本趋于平稳。总体来说,倾斜挡浪板结构优于垂直挡浪板结构,综合考虑各个因素,建议工程中前挡浪板倾斜角度以不大于 40°为宜。

关键词:挡浪板;防波堤;水动力特性;物理模型试验;数值模拟试验

中图分类号:TV92 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)06-0032-07

Hydrodynamic characteristics of permeable breakwater with inclined baffle on pile foundation//GUI Jinsong, XIA Xi(College of Ocean and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: Based on the comparison between physical model test and numerical simulation test, the hydrodynamic characteristics such as the transmission coefficient, reflection coefficient, wave pressure and wave climb of the permeable breakwater with forward inclined and backward vertical double baffle pile foundation were systematically studied by numerical simulation. The results show that, compared with the vertical wave baffle, the transmission coefficient and reflection coefficient of the structure can be significantly reduced by using the inclined front baffle, while the wave pressure and wave climb have little change, indicating the effect of the wave baffle. If the angle of the wave baffle reaches to 40°, the change of transmission coefficient tends to be stable. Considering all factors, the inclined baffle structure is better than the vertical baffle structure in general, and the angle of the front baffle can be designed less than 40° in engineering application.

Key words: wave baffle; breakwater; hydrodynamic characteristic; physical model test; numerical simulation test

当前,国家越来越重视海洋环境保护,防波堤^[1]的建设越来越重要。由于很多地区海域已不支持非透水结构的建设,因此在海岸工程中采用透空式结构^[2]成为一种趋势。相较于传统的直立式防波堤,桩基挡浪板透空式防波堤下部透水,便于港内外水体交换,有利于港内水域环境,在海洋环境保护方面具有明显优势。国外对桩基挡浪板透空堤的研究起步较早,主要研究单挡浪板透空堤。20 世纪 50 年代 Uresll^[3]研究了无限水深情况下单挡浪板透空堤的透射效果,该理论研究对挡浪板透空堤的发展有着深远影响。Wiegel^[4]利用线性势流理论,推导了有限水深条件下规则波在单挡浪板透空堤上的透射系数。在国内,邱大洪等^[5]针对透空式防波堤进行了研究,推导了透空式防波堤透射系数和反射

系数的解析解。

单侧挡浪板结构简单,易于施工,然而对于波浪的掩护作用较为有限。因此许多学者对不同挡浪板结构展开了研究。王国玉等^[6]探究了 T 型板在规则波情况下的透射和反射作用。Koraim 等^[7]研究了双侧直立式挡浪板透空堤在不同波长、不同结构情况下的水动力特性,并且建立了基于特征函数的理论模型。Chioukh 等^[8]考虑了正向入射的规则波,分析了双挡浪板透空堤的透射和反射系数。程永舟等^[9]研究了透空水平双层格栅板式防波堤的水动力特性。邵杰等^[10]通过物理模型试验,研究了不同结构形式的垂直挡浪板透空堤的透射系数,并指出透射系数随挡浪板入水深度的增大会显著减小。范骏等^[11]针对双挡浪板透空堤进行了物理模

型试验,其中不仅考虑了挡板入水深度和水平板板宽等因素对透射系数的影响,还对透浪系数的计算方法进行了研究。王国玉等^[12]研究了不同形式多层水平板对波浪的衰减作用。贾玉成^[13]探究了挡浪板式高桩结构的消浪性能,对单侧挡浪板高桩结构进行了透射系数经验公式的修正。严以新等^[14]应用物理试验的方法,探讨了多层挡浪板的结构形式对波浪透射系数的影响,详细分析了此种结构对波浪的折减作用。王国玉等^[15]主要分析了垂直挡浪板流速分布情况。

以上研究主要针对垂直和水平挡浪板,对倾斜挡浪板的研究鲜有报道。本文拟对前倾斜、后垂直的双挡浪板透空堤的透射系数、反射系数、波压力和波浪爬高情况进行系统的研究,选取的自变量有波高、波周期和挡浪板倾斜角度,采用的方法包括物理模型试验与数值模拟,物理模型试验在大连海洋大学辽宁省海岸工程重点实验室进行,数值模拟采用项目组前期开发的基于 OpenFOAM 的数值程序^[16]。

1 数值方法

1.1 控制方程

对不可压缩黏性流体,控制方程为雷诺时均方程,由连续性方程和动量方程组成:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{U} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \boldsymbol{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{U}(\rho \boldsymbol{U}) - \nabla \cdot (\mu \nabla \boldsymbol{U} + \rho \boldsymbol{\tau}) = Ck \nabla \alpha - g \boldsymbol{X} \nabla \rho - \nabla p_{\rho gh} + \boldsymbol{S}^* \tag{2}$$

式中: $\boldsymbol{U}$ 为平均速度矢量; ρ 为二相流的平均密度; t 为时间; μ 为二相流平均动力黏度系数; $\boldsymbol{\tau}$ 为由脉动值引起的雷诺应力张量; C 为表面张力系数,一般取为 0.07 kg/s^2 ; k 为自由面的曲率; α 为相体积分数; g 为重力加速度; $\boldsymbol{X}$ 为位置矢量; $p_{\rho gh}$ 是为了求解方便引入的压力项; $\boldsymbol{S}^*$ 为动量消波源项。

1.2 VOF 法追踪自由表面

对不可压气液二相流模型,VOF 法可根据两相流在网格中所占比例来确定自由面流体变化,方法如下:

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{空气} \\ 0 \sim 1 & \text{气液交界面} \\ 1 & \text{水} \end{cases} \tag{3}$$

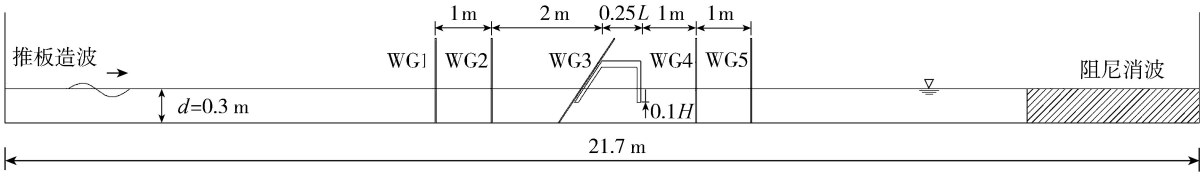


图 1 数值模拟试验模型

当 $\alpha=0$ 时,网格充满空气;当 $\alpha=1$ 时,网格充满水;当 $0<\alpha<1$ 时,网格既有水又有气体。将混合后的不可压缩气体和液体当成一种流体计算,该流体的密度 ρ 和动力黏度系数 μ 由以下函数表示:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \tag{4}$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \tag{5}$$

式中: ρ_1 为水的密度; ρ_2 为空气的密度; μ_1 为水的动力黏度系数; μ_2 为空气的动力黏度系数。

1.3 边界条件

本模型主要是固壁边界条件,速度场在边界满足不可滑移条件:

$$\boldsymbol{U} |_{\text{wall}} = 0 \tag{6}$$

压力场在壁面处满足压力沿法向梯度为 0 的条件:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \tag{7}$$

1.4 数值水槽设计

采用项目组前期开发的基于 OpenFOAM 的三维数值水槽进行数值模拟,采用笛卡尔坐标系,根据有限体积法对空间离散,应用 PISO 算法迭代求解压力及速度。水槽的尺寸为 $21.7 \text{ m} \times 0.7 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),推板造波应用在入口边界上,波浪为规则波,水槽出口处采用线性阻尼消波,消波长度为 $1.0L \sim 2.0L$ (L 为波长),水深为 0.3 m ,水槽 0.3 m 以上为空气,空气密度为 1 kg/m^3 ,运动黏度系数为 $1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$,水槽 0.3 m 以下设置为水域,水的密度为 1000 kg/m^3 ,水的运动黏度系数为 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,表面张力为 0.07 N/m 。结构物模型放置在水槽内距造波区 3 倍波长左右的位置,水槽内共设置 5 个浪高仪 WG1 ~ WG5,在结构物前 2 m 和 3 m 处各设置 1 个,结构物后 1 m 和 2 m 处各设置 1 个。在前倾斜挡浪板前面也设置 1 个浪高仪以测量爬高,用 sampleDict 字典监测浪高仪波高变化。数值模拟模型简图见图 1。

整个水槽区域用 OpenFOAM 自带的 blackMesh 字典自动划分网格,根据文献^[16]数值模拟网格收敛性验,网格高为试验波高的 $1/20 \sim 1/15$,当网格的长宽比为 $5:1$ 时网格收敛。用 snappyHexMesh 字典细化处理结构物周围的网格,用 topoSet 字典和 refineMesh 字典对波面进行加密。网格剖分平面见图 2。

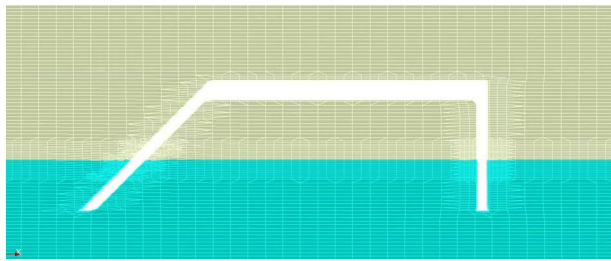


图2 网格划分平面

2 物理模型验证

2.1 物理模型试验验证

波浪槽首采用推板造波,槽尾设消能缓坡。在结构物前后各放置2个波高仪以测量入射透射波高,并计算透射系数 K_t 和反射系数 K_r ,反射系数采用两点法^[17]计算。

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (8)$$

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (9)$$

式中: H_t 为透射波高; H_i 为入射波高; H_r 为反射波高。

物理模型由前挡浪板、后挡浪板和桩基础组成,前后挡浪板的固定尺寸为 $0.7 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.025 \text{ m}$ 。玻璃板块尺寸为 $0.7 \text{ m} \times 0.025 \text{ m} \times 0.025 \text{ m}$ 。波浪测量采用 DS30 波高水位测量仪,波浪的数据采集使用 DJ800 多功能检测系统,在试验前对浪高进行校准。物理模型试验见图3,图中 WG 表示浪高仪。物理模型试验和数值模拟对比验证时用双垂直挡板模拟验证。

物理模型试验模拟的是规则波,水深 d 为 0.3 m ,堤宽 B 为 0.7 m 。试验采用了3种周期, T 分别为 1.8 s 、 1.2 s 、 1.0 s ,经计算波长 L 分别为 2.88 m 、 1.77 m 和 1.37 m 。共模拟了5种波高 H ,分别为 0.04 m 、 0.06 m 、 0.08 m 、 0.1 m 和 0.13 m 。以 $H=0.06 \text{ m}$ 的数值模拟与物理模型结果对比为例进行验证。

图4为 $T=1.8 \text{ s}$ 、 $d=0.3 \text{ m}$ 、 $H=0.06 \text{ m}$ 时浪高仪 WG2 位置处的物理模型试验波面与数值模拟波面的对比结果。图5为前挡浪板入水深度均为 $0.5H$,后挡浪板相对入水深度 s/d 不同时物理模型试验和数值模拟的透射系数和反射系数对比。由图4、图5

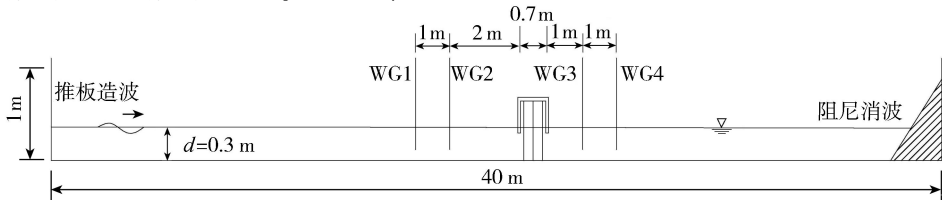


图3 物理模型试验模型

可见,波面曲线、透射系数、反射系数的数值模拟和物理模型试验结果基本吻合,验证了数值水槽的有效性。

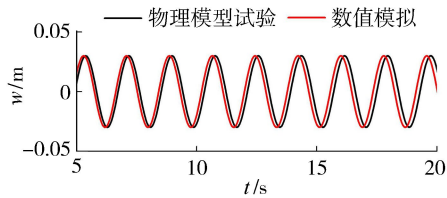
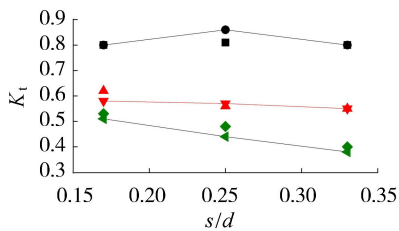
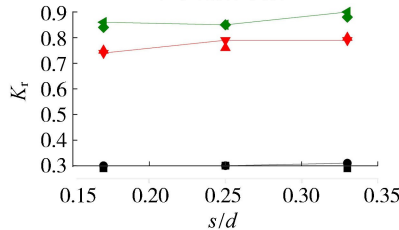


图4 物理模型试验波面与数值波面比较

- $d/L=0.1$ 物理模型 ▲ $d/L=0.17$ 物理模型 ◆ $d/L=0.21$ 物理模型
- $d/L=0.1$ 数值模拟 ▼ $d/L=0.17$ 数值模拟 ◀ $d/L=0.21$ 数值模拟



(a) 透射系数



(b) 反射系数

图5 透射系数和反射系数对比

2.2 理论公式验证

1960年 Weight^[4]利用微幅波理论推导出有限水深单层挡浪板在不考虑反射条件时透射系数的近似解析解,其推导的公式为

$$K_t = \sqrt{\frac{2k(d-t) + \sinh[2k(d-t)]}{2kd + \sinh(2kd)}} \quad (10)$$

1996年 Kriebelz 等^[18]在 Weight 理论的基础上考虑了波浪的反射,基于微幅波理论修正了 Weight 的透射公式,其推导的公式为

$$K_t = \frac{2T_F}{1 + T_F} \quad (11)$$

$$\text{其中 } T_F = \frac{2k(d-t) + \sinh[2k(d-t)]}{2kd + \sinh(2kd)}$$

在数值水槽内模拟 $T=1.5 \text{ s}$ 时单侧垂直挡浪板的透浪情况。图6为数值模拟结果和 Weight 公式、

Kriebelz 公式计算结果的对比,表明数值模拟结果和 Weigel 公式以及 Kriebel 公式理论计算结果相差基本在 5% 以内,属于正常的误差范围,进一步证明了数值水槽的有效性。

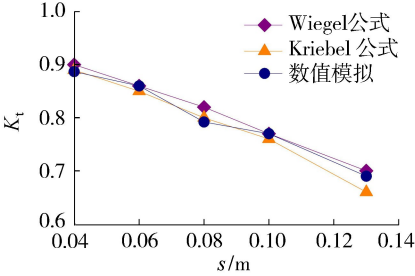


图 6 透射系数对比

3 数值模拟结果与讨论

图 7 为倾斜挡浪板模型,图中 θ 为前挡板倾斜角度。考虑到双侧挡浪板桩基透空堤内侧可兼作码头,需做成直立式,因此仅考虑前挡浪板倾斜。挡浪板厚 0.03 m,宽 0.7 m。结构宽度取 $0.25L$,挡浪板入水深度取 $1.0H$,结构在水面以上的高度为 0.2 m,模拟工况均为不越浪的情况。

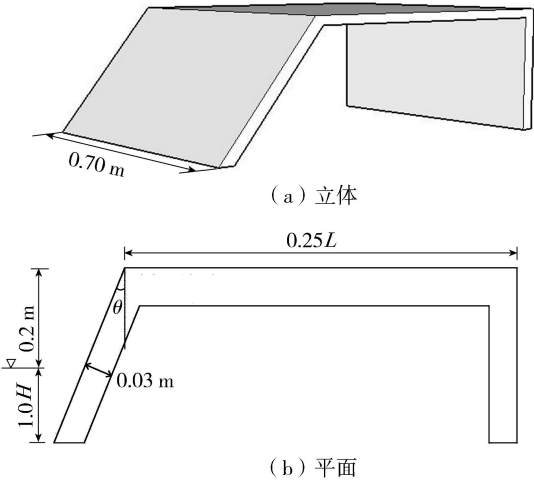


图 7 挡浪板模型

3.1 挡浪板倾斜角度对水动力特性影响

3.1.1 透射、反射系数

图 8(a) 反映了 $T=1.8\text{ s}$, $d=0.3\text{ m}$, H 分别为 0.13 m、0.08 m、0.06 m 时挡浪板倾斜角度对透射系数的影响。由图可见,随着前挡浪板倾斜角度的增加透射系数明显减小,从垂直到倾斜角度 45° ,波高 0.13 m 时透射系数减小 41%,波高 0.08 m 时减小 34%,波高 0.06 m 时减小 36%,由此可见倾斜挡浪板对不同波高都适用且相较于垂直挡浪板挡浪效果更好。当挡浪板倾斜到 40° 时,3 种波高的透射系数变化都趋于平稳。

图 8(b) 反映了 $H=0.13\text{ m}$, $d=0.3\text{ m}$, T 分别为 1.8 s、1.4 s、1.2 s 时挡浪板倾斜角度对透射系数的

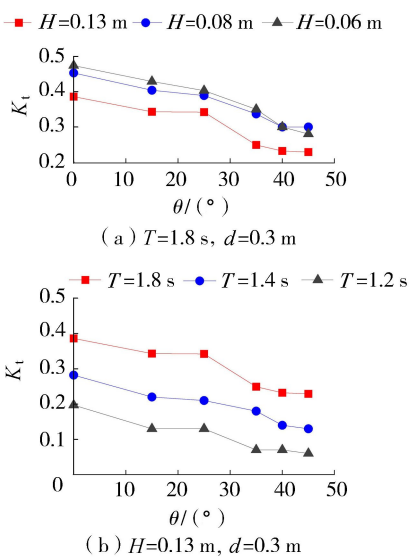


图 8 前挡板倾斜角度对透射系数的影响

影响。由图可见,对于 3 种不同周期的波浪,透射系数都随倾斜角度的增加而减小,减大幅度最大为 70%,最小为 40%。前段透射系数折减率较大, $\theta=35^\circ$ 时透射系数折减变缓慢, $\theta=40^\circ$ 后透射系数基本趋于稳定。

图 9(a) 反映了 T 为 1.8 s, $d=0.3\text{ m}$, H 分别为 0.13 m、0.08 m 和 0.06 m 时挡浪板倾斜角度对反射系数的影响,由图可见,对于 3 种不同波高的波浪,反射系数都随倾斜角度的增加而减小,减大幅度最大可达 35%,最小为 25%。图 9(b) 反映了 $H=0.13\text{ m}$, d 为 0.3 m, T 分别为 1.8 s、1.4 s、1.2 s 时挡浪板倾斜角度对反射系数的影响,由图可见,对于不同周期的波浪,反射系数都随倾斜角度的增加而减小,减大幅度最大可达 30%,最小为 12%。

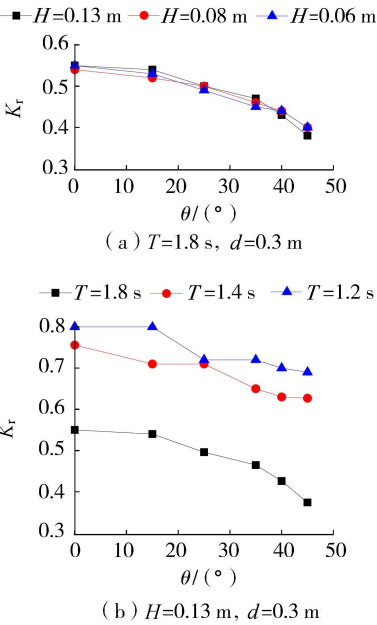


图 9 前挡浪板倾斜角度对反射系数的影响

为揭示倾斜挡浪板消浪机理,进行流场分析。图 10 是 $T=1.8\text{ s}$, $H=0.13\text{ m}$, 波及峰波谷时倾斜挡浪板的流场,由图可见,当波浪传播到挡浪板时,一部分波浪由于和挡浪板相互作用被消耗,一部分波浪从挡浪板下面透射过去,一部分产生耗散,剩余波浪发生反射。由 OpenFOAM 软件生成的流场演示视频可见,在倾斜挡浪板底端一直伴随着涡旋的产生,当挡浪板倾斜角度加大时波浪爬升路径加长,涡旋增大,消浪室内空间增加,波浪和挡浪板相互作用消耗的能量增多,导致透射系数和反射系数减小。

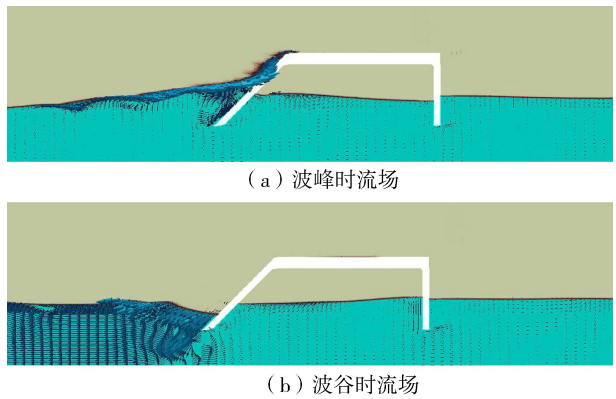


图 10 倾斜挡浪板流场

3.1.2 波压力、波浪爬高

在挡浪板上布置 12 个纵向压力测点,各测点垂直距离均为 0.02 m ,即每个纵向测点都有 3 个横向测点,测得的压强值代表其周围方格面积压强均值,最终计算得出倾斜挡浪板所受的最大水平波压力 P 。

图 11(a) 反映了 $T=1.8\text{ s}$, $d=0.3\text{ m}$, H/d 分别为 0.43 、 0.27 和 0.2 时挡浪板倾斜角度对挡板所受总水平波压力的影响,图 11(b) 反映了 $H=0.13\text{ m}$,

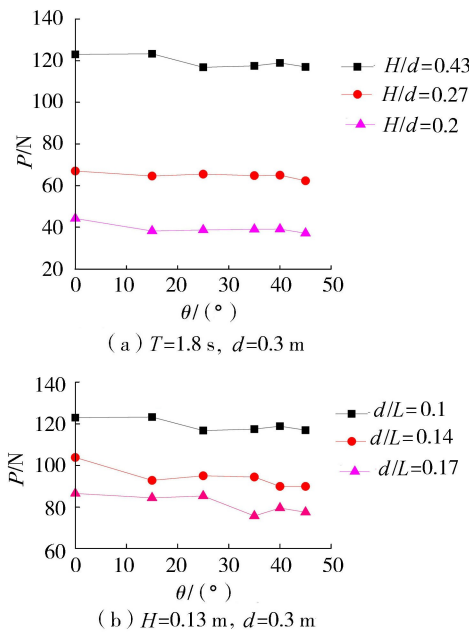


图 11 挡浪板倾斜角度对总水平波压力的影响

$d=0.3\text{ m}$, d/L 分别为 0.1 、 0.14 、 0.17 时挡浪板倾斜角度对所受总水平波压力的影响。由此可见,倾斜幅度对挡浪板承受总水平波压力影响较小,虽然随着挡浪板倾斜角度的增加略有下降的趋势,但整体变化不大。在倾斜角度小于 45° 的情况,倾斜角度对波浪所受总水平波压力影响不大。

图 12(a) 反映了 $T=1.8\text{ s}$, $d=0.3\text{ m}$, H 分别为 0.13 m 、 0.08 m 和 0.06 m 时挡浪板倾斜角度对波浪爬高的影响,图 12(b) 反映了 $H=0.13\text{ m}$, $d=0.3\text{ m}$, T 分别为 1.8 s 、 1.4 s 和 1.2 s 时挡浪板倾斜角度对波浪爬高的影响,由图可见,随着挡浪板倾斜角度的增加,波浪爬升高度也随之增加,但增加幅度不大。由此可见,在倾斜角度小于 45° 时,挡板倾斜角度对波浪爬高影响不大。

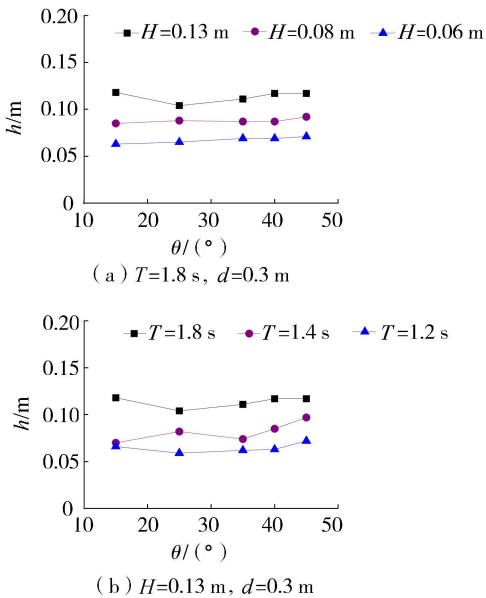


图 12 挡浪板倾斜角度对爬高的影响

在工程应用中,挡浪板的倾斜角度不仅要考虑透射系数、反射系数、波压力和波浪爬高问题,还要考虑工程造价和施工难易程度。结合图 8 和图 9 可见,挡浪板倾斜到 40° 时透射系数变化都趋于平稳,倾斜角度再加大,虽然反射系数还会变小,但工程造价和施工难度会明显加大,所以工程应用时挡浪板倾斜角度不宜大于 40° 。

3.2 波陡对水动力特性的影响

由图 8 ~ 12 可见,波高和周期对波浪透射系数、反射系数、波压力和爬高均有影响。由图 13 可见,随着波陡加大,透射系数、反射系数均呈减小趋势,其中透射系数变化更为明显;总水平波压力、爬高呈增大趋势,变化幅度均较大。当波陡从 0.35 升至 0.45 时,由于水深较小,波高较大,波浪的非线性较强,使得透射系数、反射系数、波压和爬高的变化较大。随着波陡的增大,波浪和挡浪板的作用更加激

烈,呈现出更大的波压力和爬高,同时也加大了能量在挡浪板上的耗散,故透射系数、反射系数相应减小。

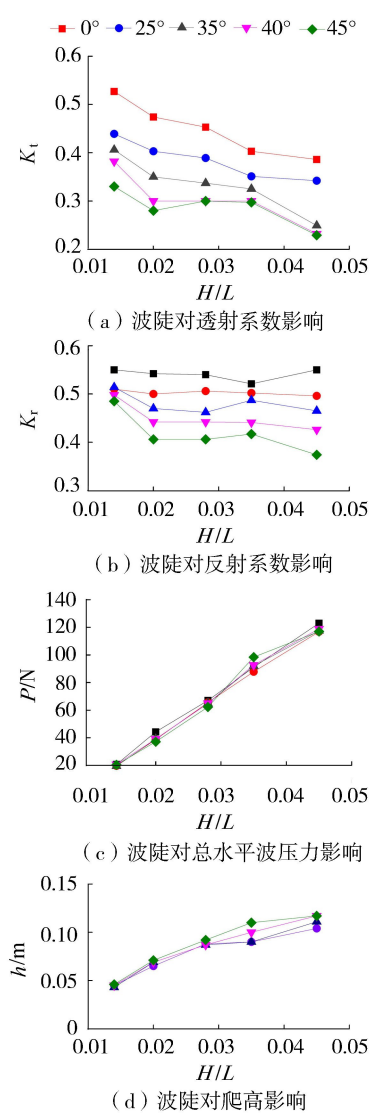


图 13 波陡对水动力特性的影响

4 结 论

- a.** 由于倾斜挡板底产生涡旋,使得能量耗散增大,所以波浪透射、反射系数随着挡浪板倾斜角度的增加而明显减小,当挡浪板倾斜角度达到 40°后,透射系数基本趋于平稳。总水平波浪力及波浪爬高随倾斜角度增加变化不大。
- b.** 随着波陡加大,透射系数、反射系数均呈减小趋势,而总水平波压力、爬高呈增大趋势。
- c.** 综合挡浪板倾斜角度对波浪透射系数、反射系数、波压力和爬高的影响,并考虑工程造价及施工的难易程度,工程应用中前挡浪板倾斜角度以不宜大于 40°。

参考文献:

[1] 盛祖荫,曾小川,刘淑娟. 防波堤施工期的台风防御设

计及模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1996,24(5): 82-87 (SHENG Zuyin, ZENG Xiaochuan, LIU Shujuan. Storm wave prevention work design and experiment of breakwater in construction[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 1996,24(5): 82-87 (in Chinese))

[2] 陈伟毅,林伊楠. 透空式防波堤之特性研究综述[J]. 中国水运, 2016, 16(6): 207-209. (CHEN Weiye, LIN Yinan. A review on the characteristics of permeable breakwaters[J]. China Water Transport, 2016, 16(6): 207-209. (in Chinese))

[3] URSELL F. The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water[J]. Mproc of the Cam Bridge Philo Sophical Society, 1947, 43: 374- 382.

[4] WIEGEL R L. Transmission of wave past a rigid vertical thin barrier[J]. Journal of the Waterways and Harbors Division, 1960, 86(1): 1-12.

[5] 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 (QIU Dahong, WANG Xuegeng. Theoretical analysis of deepwater thin plate breakwater [J]. Waterway Engineering, 1986 (4): 8-12. (in Chinese))

[6] 王国玉,黄璐,任冰,等. T 型透空式防波堤消波性能的理论分析[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(2): 1-5. (WANG Guoyu, HUANG Lu, REN Bing, et al. Theoretical analysis of the performance of wave dissipation of T-type open breakwater [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(2): 1-5. (in Chinese))

[7] KORAIM A S, HEIKAL E M , RAGEH O S. Hydrodynamic characteristics of double permeable breakwater under regular waves[J]. Marine Structures, 2011, 24(4): 1-6.

[8] CHIOUKH N, QUZZANE K. Meshless method for analysis of permeable breakwaters in the proximity of a vertical wall[J]. China Ocean Engineering, 2019, 33(2): 148-159.

[9] 程永舟,杨小桦,黄筱云,等. 新型透空格栅板式防波堤消浪性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 30-34. (CHENG Yongzhou, YANG Xiaohua, HUANG Xiaoyun, et al. Experimental study on wave-dissipating performance of a new grille plate-type open breakwater [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 30-34. (in Chinese))

[10] 邵杰,陈国平,严士常,等. 不规则波作用下垂直挡浪板式透空堤透浪系数试验研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(1): 50-57. (SHAO Jie, CHEN Guoping, YAN Shichang, et al. An experimental study of the wave-permeating coefficient of vertical baffle permeable breakwater under irregular waves[J]. Ocean Engineering, 2016, 34(1): 50-57. (in Chinese))

- [11] 范骏,王宇楠,杨斯汉,等. 双挡浪板透空堤透浪与反射系数实验研究[J]. 海洋工程,2011,29(4):60-67.(FAN Jun,WANG Yunan,YANG Sihan,et al. Experiment al research on reflection coefficient and transmitt ed coefficient of double barriers penetrated breakwate [J]. Ocean Engineering,2011,29 (4): 60-67. (in Chinese))
 - [12] 王国玉,刘丹,任冰,等. 多层水平板衰减波浪的影响因素分析[J]. 水利水电科技进展,2011,31(1):33-36. (WANG Guoyu, LIU Dan, R EN Bing, et al. Influencingfactors of dissipating waves by multiple horizontal plates[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(1): 33-36. (in Chinese))
 - [13] 贾玉成. 挡浪板式高桩码头透浪特性分析[J]. 海岸工程,2009,28(1):1-8. (JIA Yucheng. Analysis of wave transmission characteristics of high pile wharf with baffle [J]. Coastal Engineering, 2009, 28 (1): 1-8 (in Chinese))
 - [14] 严以新,郑金海,曾小川,等. 多层挡浪板桩基透空式防波堤消浪特性试验研究[J]. 海洋工程,1998(1): 68-75. (YAN Yixin,ZHENG Jinhai,ZENG Xiaochuan,et al. Characteristics of wave dissipation for pile-foundation tier-retainer breakwaters[J]. Ocean Engineering,1998 (1): 68-75. (in Chinese))
 - [15] 王国玉,顾新红,秦世杰,等. 基于 OpenFOAM 的挡板透空式防波堤水动力特性数值分析[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):63-69. (WANG Guoyu, GU Xinhong, Qin Shijie, et al. Numerical simulation on hydrodynamic performance of baffle type breakwater based on OpenFOAM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41 (2): 63-69. (in Chinese))
 - [16] WANG D,SUN J,GUI J,et al. A numerical piston-type wave-maker toolbox for the open-source library OpenFOAM[J]. Journal of Hydrodynamics,2019,31:880-813.
 - [17] NALLAYARASU S, FATT C H. SHANKAR N J. Estimation of incident and reflected waves in regular wave experiments[J]. Ocean Engineering,1995,22(1):77-86.
 - [18] KRIEBEL D L,BELLM A C A. Wave transm ission past vertical wave barriers[C]//Proc of the 25th Coastal Eng Conf. Orlando:ASCE,1996:2470-2483. (收稿日期:2020-11-30 编辑:骆超)
- +++++
- (上接第 17 页)
- [14] WANG F,ZHONG D H,YAN Y L,et al. Rockfill dam compaction quality evaluation based on cloud-fuzzy model [J]. Journal of Zhejiang University: Science A,2018,19 (4):289-303.
 - [15] 朱文锋,高超丹,庄克云,等. 基于优化 AHP 及云模型的大坝安全综合评价[J]. 中国农村水利水电,2019 (6):125-130. (ZHU Wenfeng,GAO Chaodang,ZHUANG Keyun,et al. Comprehensive evaluation of dam safety based on optimized ahp and cloud model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019 (6): 125-130. (in Chinese))
 - [16] 刘可心,李艳玲,赵尹利,等. 基于云模型的混凝土坝变形安全评价方法研究[J]. 中国农村水利水电,2020 (9):248-252. (LIU Kexin, LI Yanling, ZHAO Yinli, et al. Research on the safety evaluation method of concrete dam deformation based on cloud model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020 (9): 248-252. (in Chinese))
 - [17] LI H, LI Z, MA F, et al. Similarity analysis of dam behavior characterized by multi-monitoring points based on Cloud model [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks,2020,16(5):155014772092022.
 - [18] 李德毅,孟海军. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995,32(6):15-20. (LI Deyi,MENG Haijun. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Journal of Computer Research and Development, 1995(6):15-20. (in Chinese))
 - [19] LI D. Knowledge representation in KDD based on linguistic atoms [J]. Journal of Computer Science and Technology,1997,12(6):481-496.
 - [20] 高洪波,张新钰,张天雷,等. 基于云模型的智能驾驶车辆变粒度测评研究[J]. 电子学报,2016,44(2):365-373. (GAO Hongbo,ZHANG Xinyu,ZHNAG Tianlei,et al. Research of intelligent vehicle variable granularity evaluation based on cloud model [J]. Acta Electronica Sinica ,2016,44(2):365-373. (in Chinese))
 - [21] 张勇,赵东宁,李德毅. 相似云及其度量分析方法[J]. 信息与控制,2004,33(2):129-132. (ZHANG Yong, ZHAO Dongning, LI Deyi. The similar cloud and the measurement method [J]. Information and Control,2004, 33(2):129-132. (in Chinese))
 - [22] 张光卫,李德毅,李鹏. 基于云模型的协同过滤推荐算法[J]. 软件学报,2007,18(10):2403-2411. (ZHANG Guangwei, LI Deyi, LI Peng. A collaborative filtering recommendation algorithm based on cloud model [J]. Journal of Software, 2007, 18 (10): 2403-2411. (in Chinese))
 - [22] 李海林,郭崇慧,邱望仁. 正态云模型相似度计算方法 [J]. 电子学报,2011,39(11):2561-2567. (LI Haiin, GUO Chonghuil, QIU Wangren. Similarity measurement between normal cloud models [J]. Acta Electronica Sinica,2011,39(11):2561-2567. (in Chinese)) (收稿日期:2021-08-10 编辑:骆超)