

· 综 合 ·



明基床上双消浪室开孔沉箱消浪特性 数值模拟研究*

霍晓阳¹, 刘 晓¹, 金瑞佳², 胡杰龙², 吴德昱¹, 刘 勇¹

(1. 中国海洋大学, 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究院, 天津 300456)

摘要: 采用雷诺平均的 Navier-Stokes 方程求解不可压缩黏性流体的平均流动, 引入 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟湍流运动, 利用流体积法 (VOF) 追踪自由水面, 建立二维数值波浪水槽, 模拟研究明基床上双消浪室局部开孔沉箱的消浪特性。将数值结果与已有明基床上单消浪室开孔沉箱反射系数的试验结果对比, 结果符合良好。基于数值计算结果, 对明基床上双消浪室局部开孔沉箱的反射系数及其附近的流场进行分析, 结果表明: 反射系数 K_r 与相对消浪室宽度 B/L 呈现非线性关系, 在 $B/L=0.15$ 时为最小值; 基床高度对反射系数的影响与各消浪室宽度和波周期相关, 当前、后消浪室宽度相等 ($B_1=B_2$) 时, 反射系数有较小值; 水体在前消浪室内运动更加剧烈, 且涡旋和湍动主要集中在各开孔墙两侧和消浪室外及前消浪室内自由水面处。

关键词: 双消浪室开孔沉箱; 明基床; 数值模拟; 反射系数; 流场

中图分类号: U656.31; TV139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0001-09

Numerical simulation on wave dissipation performance of perforated caisson with double-chamber on rubble-mound foundation

HUO Xiaoyang¹, LIU Xiao¹, JIN Ruijia², HU Jielong², WU Deyu¹, LIU Yong¹

1. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China

Abstract: The Reynolds-averaged Navier-Stokes equations are used to solve the mean flow of incompressible viscous fluid. The $k-\varepsilon$ turbulence model is introduced to simulate the turbulence motion, and the volume of fluid (VOF) is utilized to track the free surface. A two-dimensional numerical wave flume is built to simulate and investigate the wave dissipation performance of partially perforated caisson with double-chamber on a rubble-mound foundation. The numerical results are compared with the reflection coefficient of perforated caisson with single-chamber on a rubble-mound foundation of the completed experimental results and the comparisons are in good agreement. According to the numerical calculation results the reflection coefficient and the flow field near the partially perforated caisson with double-chamber on a rubble-mound foundation are analyzed. The results show that the reflection coefficient K_r has a nonlinear relationship with the total relative wave chamber width B/L and gets the minimum value at $B/L=0.15$. The influence of the rubble-mound foundation height on the reflection coefficient is associated with the width of each wave chamber and the wave period. The reflection coefficient has a smaller value when the widths of the front and back chamber are equal $B_1=B_2$. The flows inside the front wave chamber are more violent and vorticity and turbulence are mainly concentrated on both sides of each perforated wall as well as at the free water surface outside and in front of the wave chamber.

Keywords: perforated caisson with double-chamber; rubble-mound foundation; numerical simulation; reflection coefficient; flow field

收稿日期: 2025-01-23

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022RDC2012300); 国家自然科学基金基础科学中心项目 (52088102)

作者简介: 霍晓阳 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海岸结构水动力特性分析。

开孔沉箱防波堤由 Jarlan^[1]首次提出, 它将开孔墙设置在实体直立墙前, 在沉箱内部形成消浪室, 利用消浪室内外入射波和反射波形成相位差以及水体在消浪室内的剧烈紊动耗能, 可有效减小结构堤前波高、降低波浪反射及结构受力, 消浪效果良好。

开孔沉箱因其良好的水动力性能得到国内外学者的关注和研究。Huang 等^[2]总结波浪对开孔沉箱作用的研究进展, 对不同结构形式开孔沉箱的消浪特性和受力特性进行综述; Kakuno 等^[3]、Li 等^[4]和 Wang 等^[5]基于线性势流理论, 建立波浪与双消浪室局部开孔沉箱相互作用的理论模型; Lee 等^[6]通过试验研究不同影响因素对双消浪室局部开孔沉箱反射特性的影响; Bergmann 等^[7]通过大比尺物理模型试验对比单消浪室和多消浪室防波堤的水动力特性, 发现多消浪室开孔沉箱防波堤具有更小的反射系数; 唐晓成等^[8-9]基于光滑粒子流体力学方法分别模拟规则波与双消浪室有顶板和无顶板开孔沉箱的相互作用, 分析开孔沉箱附近的压力场和速度场及前、后消浪室内的流体水平和垂直速度; 刘晓等^[10]通过数值模拟研究多消浪室开孔沉箱的反射特性及其附近的速度矢量和湍动能分布, 发现漩涡和湍流主要集中在各开孔墙和消浪室内自由表面附近。

在实际工程中, 由于地质条件、环境保护等因素的限制, 开孔沉箱通常会修建在明基床上。Zhao 等^[11]基于特征函数展开法, 系统研究规则波和不规则波作用下明基床上开孔沉箱的反射特性; 夏至盛^[12]基于线性势流理论, 结合物理模型试验, 分析规则波作用下明基床上开孔沉箱反射系数的影响因素及其作用规律; 行天强等^[13]通过物理模型试验, 通过改变基床高度, 提出不规则波作用下明基床上开孔沉箱反射系数的经验公式; 董浩等^[14]利用物理模型试验, 研究不同基床高度下开孔沉箱满足滑移稳定时的自身重力结果及其影响因素的变化规律; 赵沛泓等^[15]通过物理模型试验, 发现明基床上开孔沉箱随相对消浪室宽度的增加呈减小—增大—减小的振荡特性; 蔡郁等^[16]结合物理模型试验和数值模拟, 分析开孔率对明基床上单消浪室开孔沉箱

反射系数的影响; Zhao 等^[17]通过数值模拟研究波浪与明基床上开孔沉箱的相互作用, 给出开孔沉箱前波高、反射系数及沉箱底部压力分布的结果。

以上研究成果主要集中于明基床上单消浪室开孔沉箱及暗基床上双消浪室开孔沉箱的水动力性能, 对明基床上双消浪室局部开孔沉箱的研究较少。本文通过建立数值波浪水槽, 对明基床上双消浪室局部开孔沉箱流场特性和消浪效果进行分析。首先将明基床上单消浪室开孔沉箱反射系数的数值计算结果与已有的试验结果对比, 验证数值波浪水槽的有效性; 基于验证后的数值模型, 模拟波浪对明基床上双消浪室局部开孔沉箱的作用过程; 通过分析在不同基床高度下双消浪室局部开孔沉箱附近的速度矢量和湍动能分布, 以及双消浪室局部开孔沉箱反射系数随不同影响因素的变化规律, 阐明双消浪室局部开孔沉箱的反射与消浪特性, 为开孔沉箱工程设计提供重要参考。

1 数学模型

本文数学模型将速度场和压力场看作是均分量和脉动分量之和, 采用不可压缩黏性流体的雷诺平均 Navier-Stokes 方程求解平均流动:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right] \quad (2)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为 i 和 j 方向的位移; t 为时间; $\bar{u}_i$ 和 $\bar{u}_j$ 分别为 i 和 j 方向的时均速度; u_i' 和 u_j' 分别为 i 和 j 方向的脉动速度; $\bar{p}$ 为平均压力; ρ 为流体密度; g_i 为 i 方向的重力加速度; μ 为动力黏滞系数; $-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'$ 为雷诺应力。

考虑波浪湍流运动, 引入 $k-\varepsilon$ 方程模拟湍流输移封闭雷诺平均的 Navier-Stokes 方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: k 为湍动动能; ε 为湍动动能耗散率; $\nu_t = C_\nu k^2 / \varepsilon$ 为涡流黏度; $\nu = \mu / \rho$ 为运动黏滞系数; C_ν 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 σ_k 、 σ_ε 为经验系数, 分别取 0.09、1.44、1.92、1.0、1.3。

利用 VOF 方法追踪自由表面运动, 其基本方程为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

式中: F 为流体体积函数, 记录单元格内流体体积与总体积之比。当 $F=0$ 时, 单元格中充满空气, 为空单元; 当 $0 < F < 1$ 时, 单元格中既有空气也有流体, 为混合单元, 在此单元格内确定流体自由表面; 当 $F=1$ 时, 单元格中充满流体, 为流体单元。

2 数值波浪水槽建立和验证

2.1 数值波浪水槽建立

本文数值模型构建基于有限差分方法, 具体数值模型建立和求解方法详见文献[18]和[19]。数值水槽采用边界造波方法, 在左侧入口边界给定压力, 输入所需波形的波面方程及流体质点的速度分量。为避免入口造波边界的波浪二次反射, 利用 Jacobsen 等^[20]所采用的方法, 在数值水槽左侧设置长为 $1.5L$ 的松弛区域, 其中 L 为入射波波长。右侧出口边界设置满足流体自由出流的开放边界条件, 在前侧设置长为 $1.5L$ 的吸波层区域以消除出口边界波浪。底部流体与固壁接触面采用无滑移边界条件, 自由表面同时满足动力学和运动学边界条件。

二维数值波浪水槽计算域总长度为 $8L$, 高度为 0.8 m 。经网格收敛性验证, x 和 z 方向分别采用 $\Delta x = L/150$ 和 $\Delta z = 0.005 \text{ m}$ 的空间网格步长。以周期 $T = 1.2 \text{ s}$ 为例, 空水槽 $x = 6L$ 处, 波高 H 为 0.06 和 0.08 m 时, 波面数值结果与理论结果的对比见图 1。可以看出, 数值计算结果与理论结果符合较好, 造波边界可以稳定产生满足目标波高的输入波。在上述波要素条件下, 将右侧出口边

界设置为固壁边界, 以验证松弛区域的有效性, 模拟时间设置为 45.0 s 。 $T = 1.2 \text{ s}$ 时计算域中时间 $t = 30.6 \text{ s}$ 时沿程波面的计算结果见图 2。可以看出, 反射波和入射波叠加后的波高约为 2 倍入射波高, 能够在计算域内产生稳定的波形, 可有效消除固壁边界造成的二次反射。

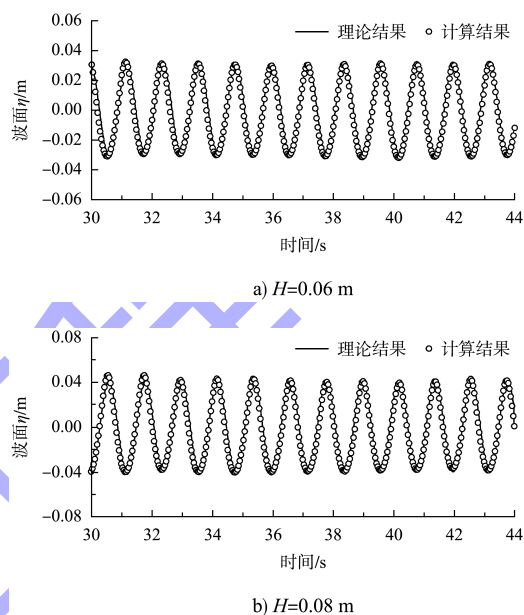


图 1 波面数值结果与理论结果对比

Fig. 1 Comparison between numerical and theoretical results of wave surface

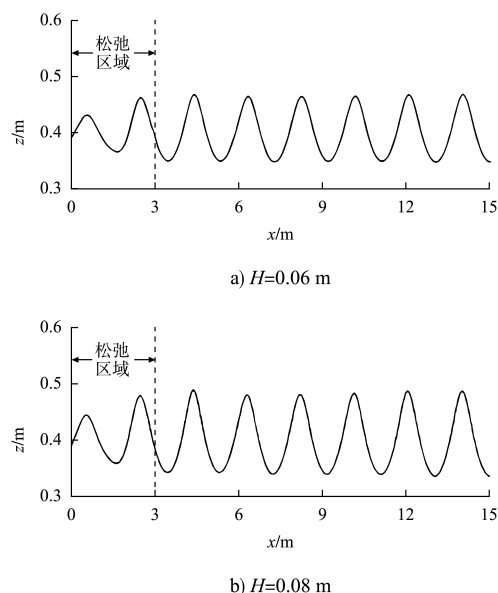


图 2 末端全反射数值水槽的计算波形

Fig. 2 Calculation wave form of terminal total reflection numerical flume

2.2 数值波浪水槽验证

为验证该数值模型用于模拟波浪与明基床上开孔沉箱相互作用的可行性及准确性, 参考文献[16]规则波作用下明基床上开孔沉箱的物理模型试验, 在二维数值水槽 $x=6L$ 处布置开孔沉箱模型, 见图 3, 数值模型的设置与物理模型的参数设置保持一致。消浪室宽度 B 分别为 0.15、0.20 和 0.30 m。基床前水深 $h=0.40$ m, 基床高度 $h_m=0.15$ m, 消浪室内水深 $d=0.20$ m, 入射波目标波高 H 为 0.06 和

0.08 m, 周期 T 为 0.86、1.0、1.2 和 1.4 s。

利用 Goda 等^[21]的两点法分离入、反射波, 将数值模拟的反射系数计算结果与物理模型试验的反射系数结果进行对比。上述工况下明基床上单消浪室开孔沉箱反射系数计算值与试验值的对比结果见图 4。可以看出, 开孔沉箱反射系数数值计算与试验对比结果的大部分数据点位于 $y=x \pm 0.1$ 的包络区间内。经计算, 两者的相关系数为 0.961, 则数值结果与试验结果符合较好。

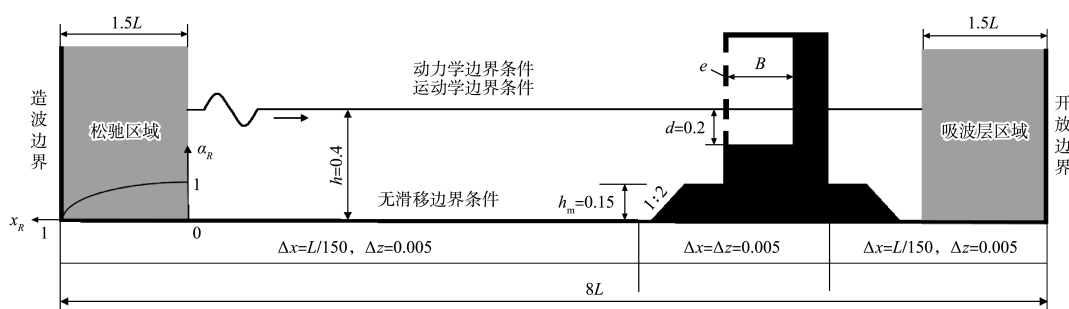


图 3 数值计算模型 (单位: m)

Fig. 3 Numerical calculation model (unit: m)

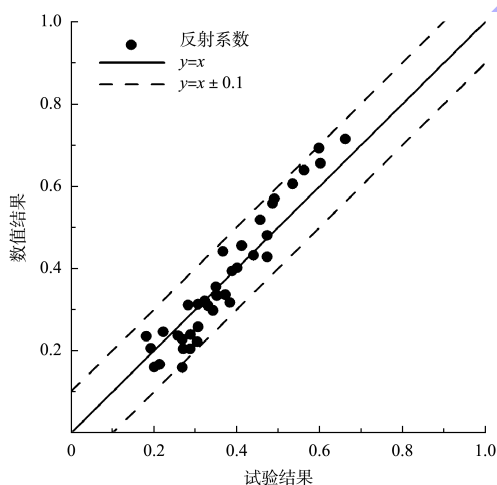


图 4 数值结果与试验结果的反射系数对比

Fig. 4 Comparison between numerical and experimental results of reflection coefficient

3 双消浪室局部开孔沉箱的数值模拟

3.1 数值模型计算参数

基于上述数值波浪水槽, 在 $x=6L$ 处将单消浪室开孔沉箱替换为双消浪室局部开孔沉箱, 模拟波浪与明基床上双消浪室局部开孔沉箱的相互

作用。双消浪室局部开孔沉箱数值模型总消浪室宽度 $B=0.30$ m, 设置前、后消浪室宽度相等 ($B_1=B_2=0.15$ m) 和前消浪室宽度大于后消浪室宽度 ($B_1=0.19$ m、 $B_2=0.11$ m) 两种情况, 前、后开孔墙开孔率分别为 $e_1=0.27$ 、 $e_2=0.19$, 基床高度 h_m 分别为 0.00、0.10、0.15 和 0.20 m。堤前水深 $h=0.50$ m, 前、后消浪室内水深相等, 消浪室内水深 $d=0.25$ m, 消浪室内相对水深 $q=d/h=0.50$ 。双消浪室局部开孔沉箱结构见图 5, 数值模拟中采用的波浪要素和模型参数见表 1。

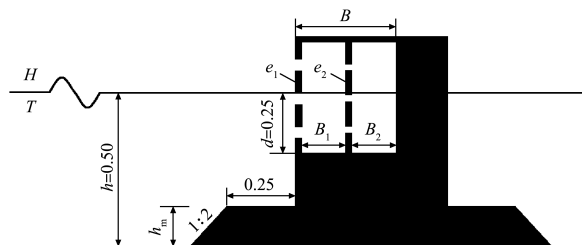


图 5 明基床上双消浪室局部开孔沉箱结构 (单位: m)

Fig. 5 Partially perforated caisson structure with double-chamber on rubble-mound foundation (unit: m)

表 1 波浪要素及双消浪室局部开孔沉箱模型参数

Tab. 1 Wave parameters and model parameters of partially perforated caisson structure with double-chamber

物理参数						无量纲参数					
周期 T/s	波高 H/m	水深 d/m	开孔率	消浪室 宽度 B/m	基床高度 h_m/m	开孔相 对水深 q	相对水深 d/L	波陡 H/L	相对消浪 室宽度 B/L	相对基 床高度 h_m/L	基床高度 水深比 h_m/h
0.8~2.3	0.05	0.5	$e_1=0.27, e_2=0.19$	0.3	0.00, 0.10, 0.15, 0.20	0.5	0.105~0.502	0.010~0.050	0.063~0.301	0.021~0.201	0.000~0.400

3.2 反射系数分析

不同基床高度下双消浪室局部开孔沉箱反射系数 K_r 的数值计算结果见图 6。可以看出, 基床高度对开孔沉箱的反射系数影响复杂, 与总消浪室宽度和各消浪室的宽度相关。同一基床高度下, 反射系数均随相对消浪室宽度 B/L 的增加呈先减小后缓慢增大的趋势, 在 $B/L=0.15$ 时为最小值。由图 6a) 可知, 当 $B_1=B_2=0.15$ m 时, 暗基床条件下的反射系数大于明基床条件下的反射系数, 明基床各基床高度的反射系数相近; 由图 6b) 可知, 当 $B_1=0.19$ m、 $B_2=0.11$ m 时, $B/L<0.15$ 条件下反射系数随基床高度的增加先减小后增大, 均小于暗基床条件下的反射系数, 但当 $B/L\geq 0.15$ 时, 基床高度变化对反射系数影响不明显。以基床高度 h_m 为 0.10 和 0.20 m 为例, 双消浪室局部开孔沉箱反射系数 K_r 随相对基床高度 h_m/L 的变化趋势见图 7。可以看出, 反射系数与相对基床高度呈非线性关系, 随相对基床高度的增加先减小后增大, 且在前、后消浪室宽度相等时, 反射系数较小。

为进一步明确基床高度对双消浪室局部开孔沉箱消浪性能的影响, 将基床高度与水深的比值 h_m/h 绘制为横坐标, 给出不同工况时各基床高度条件下双消浪室局部开孔沉箱反射系数 K_r , 见图 8。由图 8a) 可以看出, 当前、后消浪室宽度相等 ($B_1=B_2=0.15$ m) 且波周期较小时, 反射系数随基床高度水深比的增加先减小后略增大, 在 $h_m=0.00$ m 时取值最大, 随着基床高度增加, 反射系数变化不明显, 在 $h_m=0.10$ 、0.15 和 0.20 m 时近似相等; 随着波周期增大, 反射系数随基床高度水深比增加而减小。由图 8b) 可以看出, $B_1=0.19$ m、 $B_2=0.11$ m 条件下, 波周期较小时, 基床高度对开孔沉箱反射系数影响不明显, 反射系数随基床高度增加略有增大; 随着波周期增大, 基床高度对开孔沉箱反射系

数的影响增大, 反射系数随基床高度水深比的增大先减小后增大, 在 $h_m/h=0.30$ 时有最小值。

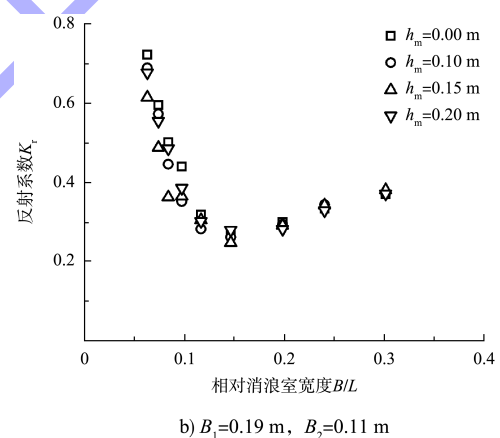
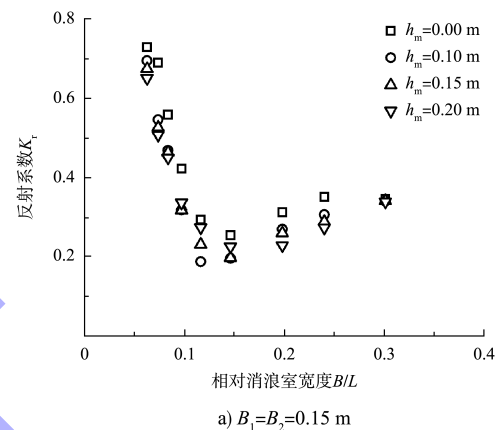
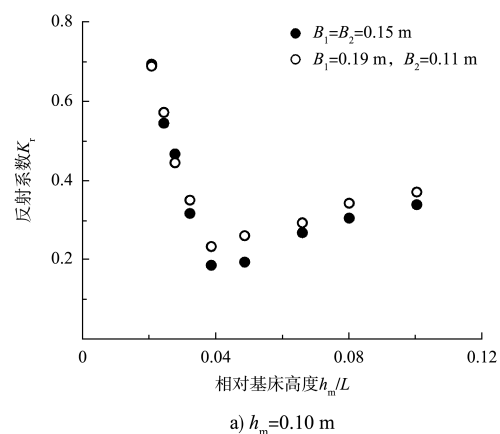


图 6 反射系数 K_r 随相对消浪室宽度 B/L 的变化趋势
Fig. 6 Variation trend of reflection coefficient K_r with relative width of chamber B/L



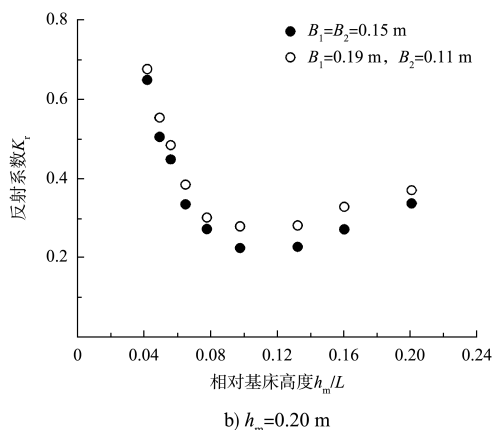


图 7 反射系数 K_r 随相对基床高度 h_m/L 的变化趋势
Fig. 7 Variation trend of reflection coefficient K_r with relative height of foundation h_m/L

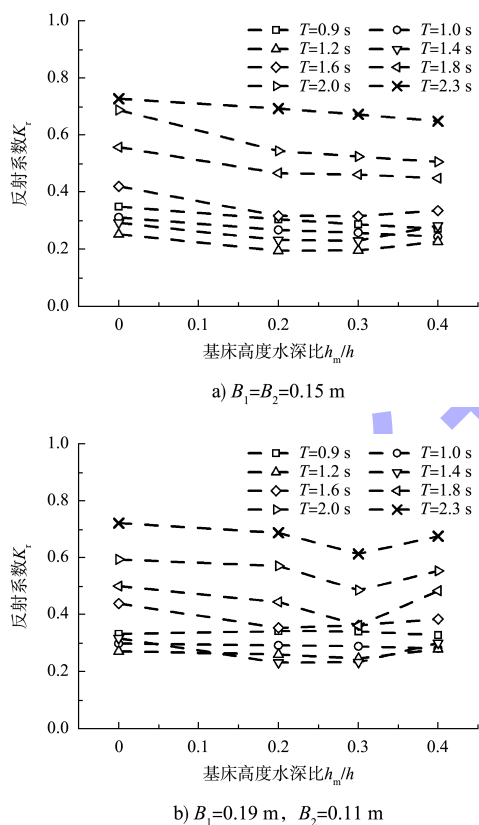
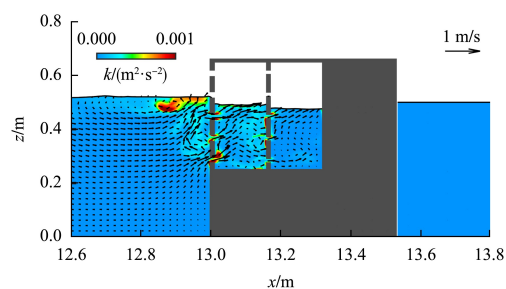


图 8 反射系数 K_r 随基床高度水深比 h_m/h 的变化趋势
Fig. 8 Variation trend of reflection coefficient K_r with ratio of height of foundation to depth of water h_m/h

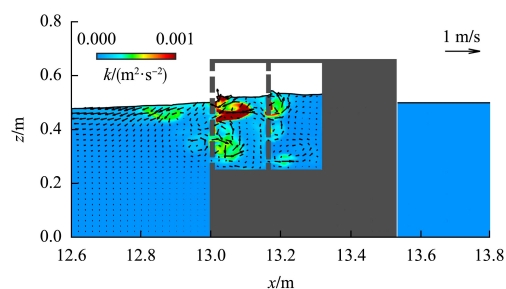
3.3 流场分析

为明确波浪作用于明基床上双消浪室局部开孔沉箱的消浪机理,以 $H=0.05$ m、 $T=1.2$ s、 $B/L=0.15$ 、 $B_1=B_2=0.15$ m 为例,在 4 种不同基床高度上 (h_m 为 0.00、0.10、0.15 和 0.20 m) 开孔沉箱附近的速度矢量及湍动能分布见图 9。由图

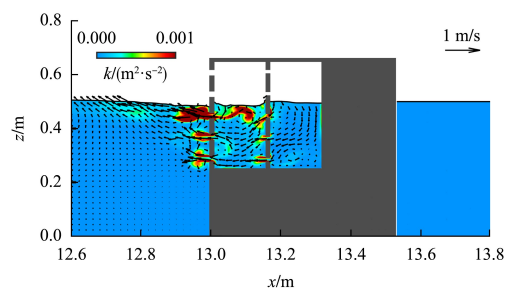
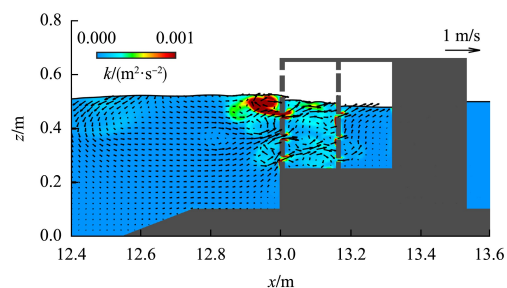
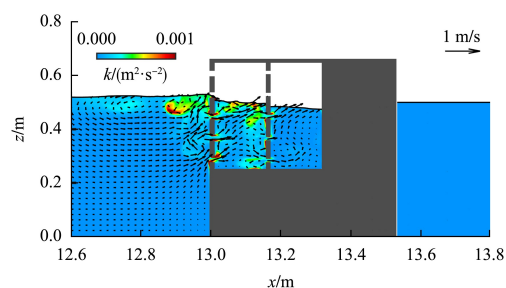
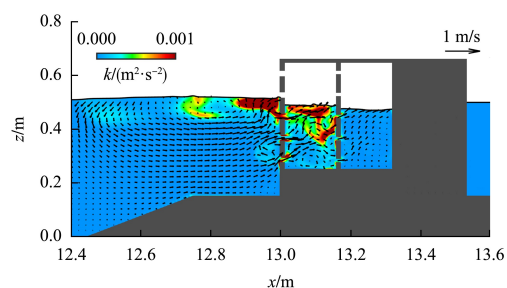
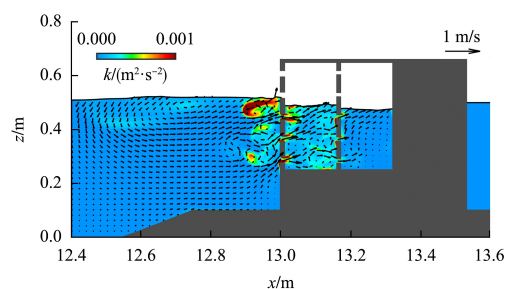
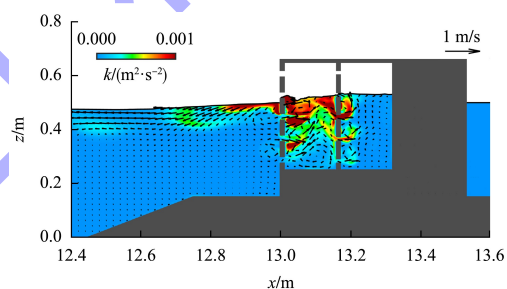
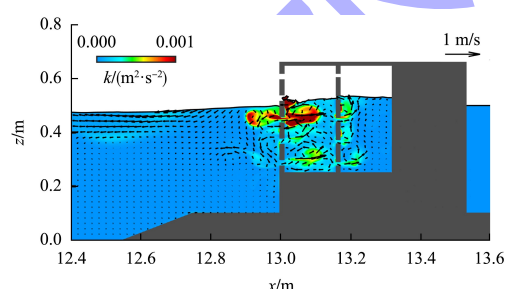
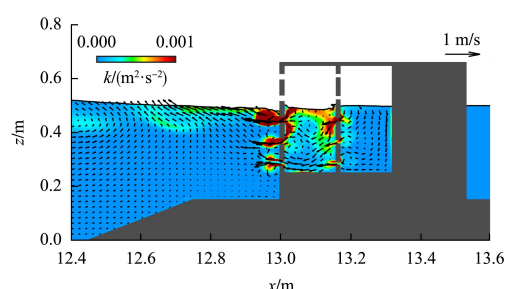
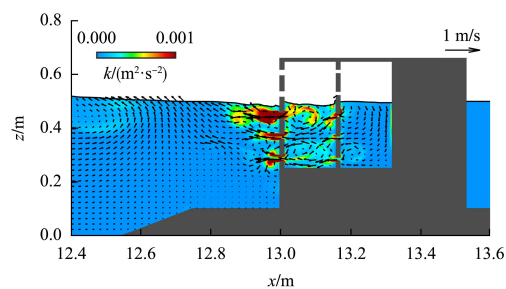
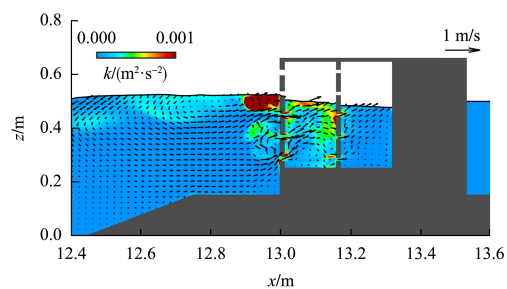
9a)~d)可知,当基床高度 $h_m=0.00$ m 时,波浪在 $t=21.0$ s 时到达前开孔墙,部分波浪沿着开孔前墙爬升,部分波浪从前开孔墙开孔处以射流的形式进入各消浪室内,此时消浪室内波面低于消浪室外自由水面; $t=21.4$ s 时,随着波浪进入消浪室内,消浪室内波面高于消浪室外自由水面,且在各开孔墙右侧形成明显涡旋,湍动在前消浪室内更加明显; $t=21.8$ s 时,波浪经实体后墙反射,消浪室内水体向外流动,消浪室内波面开始降低,湍动主要集中在前消浪室自由表面处和各开孔墙左侧位置,后消浪室内湍动减弱; $t=22.2$ s 时,消浪室内水体回落,消浪室外水面高于消浪室内水面,水体再次开始向消浪室内流动。随基床高度增加,开孔沉箱附近的流体运动过程与 $h_m=0.00$ m 时相似。由图 9e)~p)可知, $t=21.0$ s 时,由于基床的存在,波浪在底部沿基床坡面爬升,速度在基床坡面上增大,在沉箱与基床交界处与上层水体会形成轻微涡旋; $t=21.4$ s 时,随着水体进入消浪室内,与 $h_m=0.00$ m 时相比,由于基床高度增加,水体在前消浪室内运动更加剧烈,湍动在前消浪室内自由表面明显增大; t 为 21.8 和 22.2 s 时,水体流出消浪室,基床高度变化对水体运动影响不明显。



a) $h_m=0.00$ m, $t=21.0$ s



b) $h_m=0.00$ m, $t=21.4$ s

c) $h_m=0.00$ m, $t=21.8$ sh) $h_m=0.10$ m, $t=22.2$ sd) $h_m=0.00$ m, $t=22.2$ si) $h_m=0.15$ m, $t=21.0$ se) $h_m=0.10$ m, $t=21.0$ sj) $h_m=0.15$ m, $t=21.4$ sf) $h_m=0.10$ m, $t=21.4$ sk) $h_m=0.15$ m, $t=21.8$ sg) $h_m=0.10$ m, $t=21.8$ sl) $h_m=0.15$ m, $t=22.2$ s

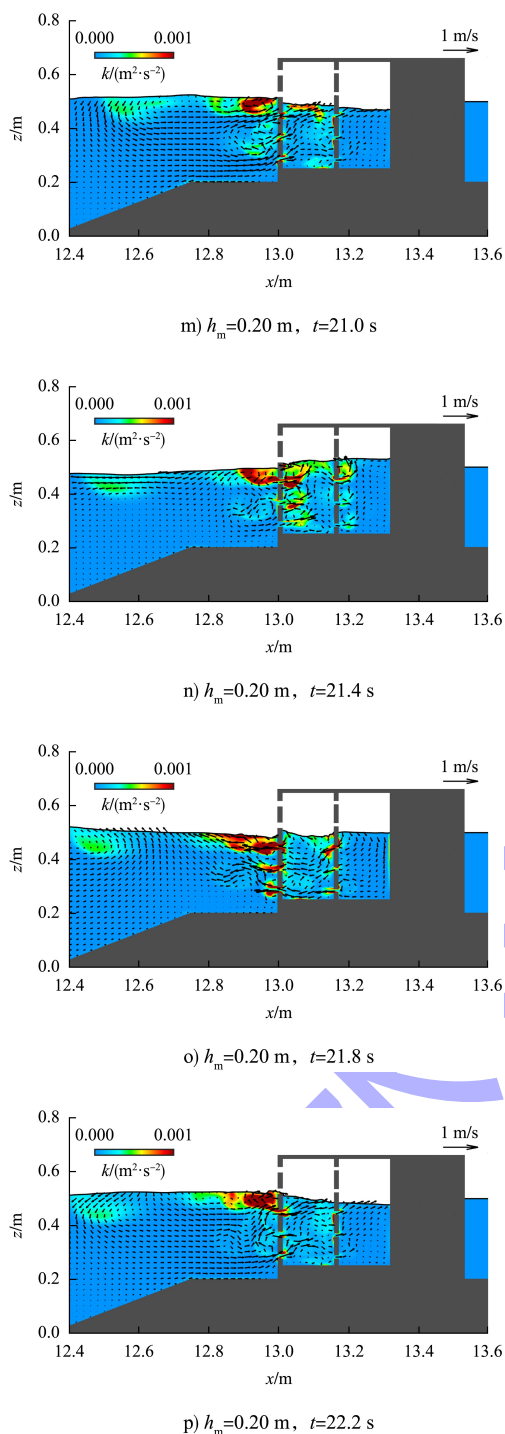


图9 开孔沉箱附近的速度矢量和湍动能分布
Fig.9 Velocity vector and turbulent kinetic energy distribution near perforated caisson

综上,波浪与明基床上双消浪室开孔沉箱相互作用时,湍动和涡旋主要集中在前消浪室自由表面和各开孔墙两侧,随基床高度的增加,基床坡面处速度存在轻微变化。与 $h_m = 0.00$ m 时相比,双消浪室开孔沉箱前消浪室内水体运动更加

剧烈,湍动增大,后消浪室内湍动较为稳定。

4 结论

1) 基床高度相同时,双消浪室开孔沉箱反射系数 K_r 与相对消浪室宽度 B/L 呈非线性关系,随 B/L 增大呈先减小后增大趋势, $B/L = 0.15$ 时达到最小值;随相对基床高度 h_m/L 增大先减小后增大,在前、后消浪室宽度相等时反射系数较小。

2) 基床高度对双消浪室局部开孔沉箱的反射系数影响复杂,与前、后消浪室宽度和波周期相关。波周期较小时,基床高度增加对开孔沉箱反射系数影响不明显;随着波周期增大,当 $B_1 = B_2 = 0.15$ m 时,反射系数与基床高度呈负相关关系,当 $B_1 = 0.19$ m、 $B_2 = 0.11$ m 时,反射系数与基床高度呈非线性相关关系。

3) 波浪对双消浪室开孔沉箱作用时,涡旋和湍动主要集中在各开孔墙开孔位置和自由水面附近;随着基床高度增加,前消浪室内水体运动更加剧烈,湍动略有增大。

参考文献:

- [1] JARLAN G E. A perforated vertical wall breakwater[J]. Dock and harbour authority, 1961, 486: 394-398.
- [2] HUANG Z H, LI Y C, LIU Y. Hydraulic performance and wave loadings of perforated/slotted coastal structures: a review[J]. Ocean engineering, 2011, 38(10): 1031-1053.
- [3] KAKUNO S, SHIOZAKI Y, HARAYAMA Y. The effect of the depth of wave chambers of a double slit-wall breakwater on wave reflection[C]// Japan Society of Civil Engineers. Proceedings of Civil Engineering in the Ocean (Vol. 15). Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 1999: 671-676.
- [4] LI Y C, DONG G H, LIU H J, et al. The reflection of oblique incident waves by breakwaters with double-layered perforated wall[J]. Coastal engineering, 2003, 50(1/2): 47-60.
- [5] WANG X Y, LIU Y, LU L. Analysis of oblique wave interaction with perforated caisson breakwaters with partial wave absorption parts[J]. Ocean engineering, 2021, 241: 110018.

- [6] LEE J I, SHIN S W. Experimental study on the wave reflection of partially perforated wall caissons with single and double chambers [J]. *Ocean engineering*, 2014, 91: 1-10.
- [7] BERGMANN H, OUMERACI H. Wave loads on perforated caisson breakwaters[C]//The American Society of Civil Engineers. Proceedings of 27th International Conference on Coastal Engineering. Reston: ASCE, 2001: 1622-1635.
- [8] 唐晓成, 刘华宇, 陈洪洲, 等. 双消浪室有顶板开孔沉箱数值研究[J]. *海洋工程*, 2024, 42(5): 130-141.
- TANG X C, LIU H Y, CHEN H Z, et al. Numerical study of a top plate perforated caisson with a double wave-absorbing chamber [J]. *The ocean engineering*, 2024, 42(5): 130-141.
- [9] 唐晓成, 刘华宇, 陈洪洲, 等. 基于 SPH 方法双消浪室开孔沉箱数值研究[J]. *水运工程*, 2024(3): 1-8.
- TANG X C, LIU H Y, CHEN H Z, et al. Numerical study of double-layered perforated caisson based on SPH method[J]. *Port & waterway engineering*, 2024(3): 1-8.
- [10] 刘晓, 刘勇, 林鹏智, 等. 多消浪室开孔沉箱消浪特性的数值模拟研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(6): 116-124.
- LIU X, LIU Y, LIN P Z, et al. Numerical simulation of wave absorbing by multi-chamber perforated caissons[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2021, 51(6): 116-124.
- [11] ZHAO P H, SUN D P, WU H, et al. Theoretical investigation of wave reflection from partially perforated caisson sitting on a rubble mound foundation[J]. *Ocean engineering*, 2021, 235: 109085.
- [12] 夏志盛. 波浪与明基床上开孔沉箱的相互作用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- XIA Z S. Study on wave interaction with perforated caisson sitting on rubble mound foundation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [13] 行天强, 孙大鹏, 吴浩, 等. 明基床开孔沉箱不规则波反射系数试验研究[J]. *海洋工程*, 2016, 34(6): 46-53.
- XING T Q, SUN D P, WU H, et al. Experimental investigation on reflection coefficient of perforated caisson with rubble foundation under action of irregular wave[J]. *The ocean engineering*, 2016, 34(6): 46-53.
- [14] 董浩, 孙大鹏, 吴浩, 等. 明基床上开孔沉箱稳定性试验研究[J]. *海洋工程*, 2016, 34(5): 30-39.
- DONG H, SUN D P, WU H, et al. Experimental study of stability of perforated caisson with rubble foundation[J]. *The ocean engineering*, 2016, 34(5): 30-39.
- [15] 赵沛泓, 孙大鹏, 吴浩. 消浪室宽度对可渗明基床开孔沉箱消浪性能影响研究[J]. *海洋工程*, 2021, 39(4): 79-85.
- ZHAO P H, SUN D P, WU H. Study on the effect of the wave-absorbing chamber width on the wave attenuation performance of perforated caisson sitting on the rubble-mound foundation [J]. *The ocean engineering*, 2021, 39(4): 79-85.
- [16] 蔡郁, 孙大鹏, 赵沛泓, 等. 开孔率对明基床上开孔沉箱波浪反射系数影响的数值研究[J]. *海洋工程*, 2018, 36(5): 30-37.
- CAI Y, SUN D P, ZHAO P H, et al. Numerical investigation of the influence of opening rate on reflection coefficient of perforated caisson with rubble foundation[J]. *The ocean engineering*, 2018, 36(5): 30-37.
- [17] ZHAO P H, SUN D P, WU H. Application of a VARANS based resistance-type porosity model on simulating wave interactions with perforated caisson sitting on a rubble-mound foundation [J]. *Applied ocean research*, 2021, 112: 102600.
- [18] LIU P L F, LIN P Z. A numerical model for breaking waves: the volume of fluid method [R]. Newark: University of Delaware, 1997.
- [19] LIN P Z, LIU P L F. A numerical study of breaking waves in the surf zone [J]. *Journal of fluid mechanics*, 1998, 359: 239-264.
- [20] JACOBSEN N G, FUHRMAN D R, FREDSTØE J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam® [J]. *International journal for numerical methods in fluids*, 2012, 70(9): 1073-1088.
- [21] GODA Y, SUZUKI T. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments [C]//The American Society of Civil Engineers. Coastal Engineering Proceedings. New York: ASCE, 1976: 828-845.