

· 综合 ·



# 基于 OpenFOAM 的港内波场数值模拟研究 \*

张 彤<sup>1,2</sup>, 黄 哲<sup>1</sup>, 田 芳<sup>3</sup>, 王登婷<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏南京 210098;  
3. 河海大学 海洋学院, 江苏南京 210098)

**摘要:** 掌握港内的波高分布特征对港口布局建设意义重大, 物理模型制模成本较高、过程较为复杂, 相关的数值模拟大多仅考虑了由防波堤口门传播进来的波浪影响, 而忽略了越浪作用。针对这些局限性, 基于开源软件 OpenFOAM, 建立环抱形直立式防波堤的三维数值波浪水池, 将越浪与不越浪情况下的数值计算结果和物理模型试验结果进行比较, 验证数值模型的准确性。结果表明: 该模型能够较好地模拟堤顶越浪过程及港内波高分布情况, 可用于优化港口布局的进一步研究。

**关键词:** OpenFOAM; 三维数值水池; 越浪; 波高分布

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0001-08

## Numerical simulation of wave field in harbor based on OpenFOAM

ZHANG Tong<sup>1,2</sup>, HUANG Zhe<sup>1</sup>, TIAN Fang<sup>3</sup>, WANG Dengting<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** It is of great significance for the harbor layout and construction to master the wave height distribution characteristics in the harbor, while the physical modeling process is expensive and complicated. Most numerical simulations only consider the influence of waves propagating through the breakwater entrance and ignore the overtopping effect. To address these limitations, this paper establishes a three-dimensional numerical wave pool for a encircled vertical breakwater based on the open source software OpenFOAM, and compares the numerical calculation results in the case of overtopping and non-overtopping with the experimental results to verify the accuracy of the numerical model. The results show that the model can simulate the overtopping process at the top of the breakwater and the wave height distribution in the harbor well, and can be used for further research on the optimization of harbor layout.

**Keywords:** OpenFOAM; three-dimensional numerical pool; overtopping; wave height distribution

波浪作为海洋中的一种普遍现象, 长久以来都是港口布局的重点关注内容之一。港口建设的首要问题就是船舶能够平稳地停泊及进行装卸作业, 要求港内具有良好的泊稳条件<sup>[1]</sup>, 因此, 了解波浪在港内的波高分布特征是十分必要的。针

对实际工程中的港内波浪传播问题, 应用最广泛的两种研究方法为物理模型试验和数值模拟。

物理模型试验通常根据一定的相似准则, 在波浪水槽或港池中模拟波浪的产生、传播, 能够模拟水工建筑物在特定条件下的波浪特性, 较为

收稿日期: 2023-06-22

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600700); 江苏省水利科技项目(2022027); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y222004、Y220013)

作者简介: 张彤 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为波浪与建筑物相互作用。

可靠、直观。王登婷等<sup>[2]</sup>针对几种竹排浮式消浪结构开展波浪模型试验，对堤后波高进行测量，通过比较各结构的消浪效果提出了推荐的结构形式，并改进透射系数计算公式，计算值与试验值吻合较好；李鑫丹等<sup>[3]</sup>通过断面和整体物理模型试验，对有效波高及越浪量进行对比，研究波浪入射方向对越浪量的影响，为实际工程设计提供了参考。

由于计算机技术的高速发展和计算流体力学(CFD)理论的完善，数值模拟在流体力学计算领域得到广泛应用，国际海洋与极地工程大会(ISOPE)在1997年对数值波浪水槽提出具体明确的技术要求<sup>[4]</sup>，推动了其规范化的发展。数值模拟具有低成本、可重复性、操作较方便、边界条件易于控制等优点。林祥志等<sup>[5]</sup>基于抛物形缓坡方程建立数学模型，计算分析漩门湾水域的波浪，得到波高分布以及防波堤的设计波浪，为实际工程的围堤设计提供了科学依据；王登婷<sup>[6]</sup>以N-S方程为控制方程并使用有限差分法对其进行离散，应用VOF法追踪自由表面，建立采用线源造波和阻尼消波的二维数值波浪水槽，计算斜坡堤前后的波高分布，研究波浪和可渗防波堤的相互作用，并结合物理模型试验进行了验证；杨锦凌等<sup>[7]</sup>以某游艇码头为例，采用以Boussinesq方程为基础的MIKE21-BW模块，模拟该港区的2种布置方案以及6个浪向作用下的港内泊稳情况，对影响游艇码头港内泊稳的因素进行了分析。

上述研究方法均对实际工程起到了指导作用，具有重要意义，但也存在一定的局限性。物理模型建造成本较高，需要大量的资金、能源及人力支持，过程也较为复杂，还可能存在比尺效应。目前有关港内波高分布的数值模拟研究，大多仅考虑了由防波堤口门传播进来的波浪影响，而忽略了越浪作用，Fluent和Flow3D等商用软件还存在费用昂贵且二次开发受限等问题。基于开源程序开发的数值波浪水槽，虽然入门难度较高，但其所有源代码都是公开的，灵活度极高、可拓展性非常强。因此，本文选择开源软件OpenFOAM

为平台建立三维数值波浪水池，探讨考虑越浪情况下的港内波高分布情况。

## 1 数学模型

基于OpenFOAM中的olaFlow求解器，在两相流体不可压缩的假定条件下，采用有限体积法离散控制方程，使用VOF方法<sup>[8]</sup>捕捉气液交界面，建立数学模型。

### 1.1 控制方程

控制方程采用N-S方程，选用笛卡尔坐标系，其连续性方程和动量守恒方程为：

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p^* + \mu \nabla^2 \mathbf{U} \quad (2)$$

式中： $\mathbf{U}$ 为速度矢量； $\rho$ 为流体密度； $p^*$ 为拟动力压强，即总压强与静水压强之差， $p^* = p - \rho g X$ （ $X$ 为位置矢量）； $g$ 为重力加速度； $\mu$ 为分子动力黏度。

### 1.2 自由表面追踪方法

在OpenFOAM中，定位及跟踪自由表面的方法是VOF法，采用体积分数函数来追踪气、液体所在位置。体积分数函数是定义在每个单元中心上的一个标量场，其取值范围是0~1，可表示为：

$$\alpha(x, t) = \begin{cases} 0 & (\text{空气}) \\ 0 < \alpha < 1 & (\text{气液交界面}) \\ 1 & (\text{水}) \end{cases} \quad (3)$$

即当单元中充满空气没有水时，体积分数的值为0；当单元中充满水没有空气时，体积分数的值为1；当单元位于气液交界面处时，体积分数的值在0~1之间。

水和空气的两相流被视为混合流体，每个单位的等效密度 $\rho$ 为：

$$\rho = \alpha \rho_w + (1-\alpha) \rho_a \quad (4)$$

式中： $\alpha$ 为VOF指示函数， $\rho_w$ 、 $\rho_a$ 分别为水和空气的密度。

VOF法的方程如下：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \alpha) = 0 \quad (5)$$

为了更准确地追踪自由表面，避免气液交界

面模糊, OpenFOAM 添加了一个人工压缩项 ( $\nabla \cdot \mathbf{U}_c \alpha (1-\alpha)$ ) 对式(5)进行改进, 保证方程解在气液交界面附近自动满足有界性, 假设流体不可压缩且质量守恒, 修正后的方程如下:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{U} \alpha + \nabla \cdot \mathbf{U}_c \alpha (1-\alpha) = 0 \quad (6)$$

其中:

$$|\mathbf{U}_c| = \min [c_\infty |\mathbf{U}|, \max(|\mathbf{U}|)] \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{U}_c$  为适用于压缩界面的速度场; 系数  $c_\infty$  可根据界面过渡区的流场进行调整, 但通常取值为 1。

### 1.3 造波与消波方法

数值波浪水池的计算域入口处使用速度入口边界条件<sup>[9]</sup>, 通过设定流体的速度以及自由表面的位置来造波; 计算域的出口处设置主动消波边界<sup>[10]</sup>, 消波边界产生与入射波速度相反的速度用以消波。

## 2 数值波浪水池验证

为验证建立的三维数值波浪水池速度入口造波及主动消波的有效性, 设计不同的算例来模拟行进波及驻波。建立三维数值波浪空水池, 利用 OpenFOAM 中的网格生成工具 blockMesh 生成结构化网格, 网格尺寸  $\delta_x = 2.0$  m(长)、 $\delta_y = 2.0$  m(宽)、 $\delta_z = 1.0$  m(高); 将数值水池的左侧设置为造波边界, 右侧及前后壁都设置为消波边界, 底部设置为固壁边界, 顶部设置为大气边界, 允许空气的流入及流出; 计算的初始条件设定全场的速度和压力均为零。

### 2.1 行进波模拟

为检验数值模型的造波效果, 在距离造波边界  $x = 1.0L$ 、 $x = 2.0L$ 、 $x = 3.0L$ 、 $x = 4.0L$ 、 $x = 5.0L$  及  $x = 6.0L$  这 6 个不同波长处放置波高仪, 提取单位时间步长 0.02 s 的数据结果, 当入射波高  $H = 1$  m、周期  $T = 6$  s、水深  $d = 8$  m 时, 这 6 处的波面历时曲线结果见图 1、2。

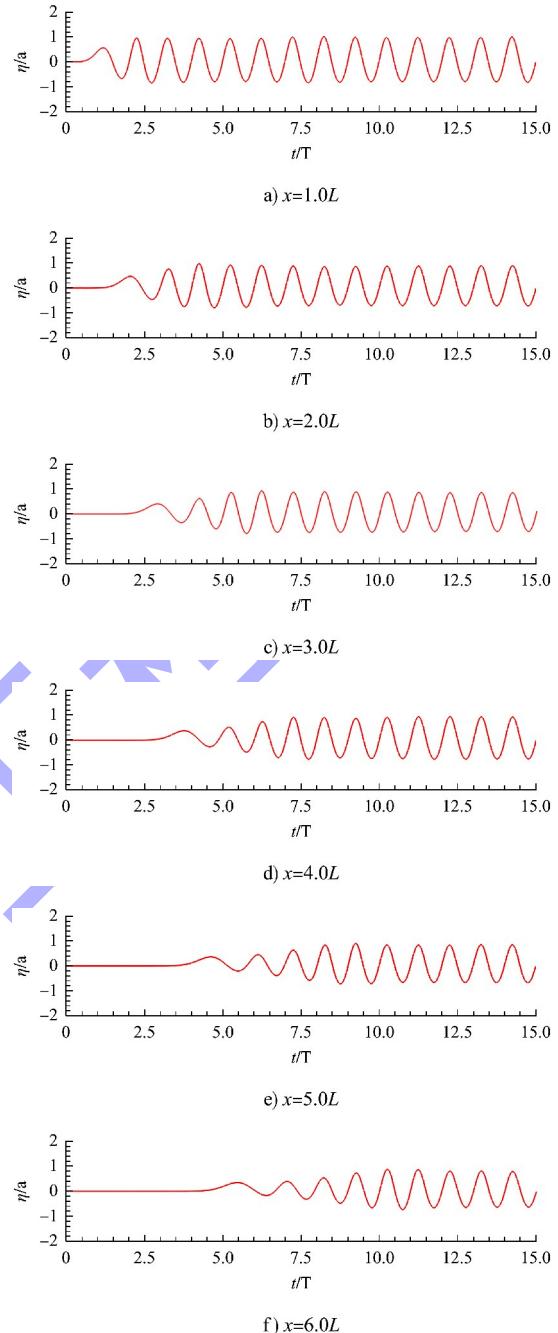


图 1 距造波边界不同距离处波面的历时曲线

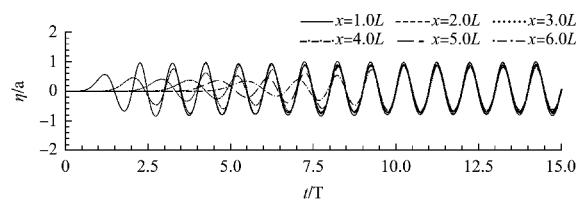


图 2 距造波边界不同距离处波面的历时曲线对比

由图可知, 随着时间的变化, 波面高程从开始的平静状态进而开始振荡, 然后逐渐进入到稳定波动的状态, 靠近造波边界位置的波面高程更

先达到稳定，波高与目标值基本一致，波面高度不随时间衰减，即在设定的数值波浪水池内能够持续产生可靠稳定的波浪，验证了数值模型速度入口造波的有效性。

## 2.2 驻波模拟

波浪遇到障碍物时会产生二次反射波，使得数值模型难以获得稳定的解。为验证数值波浪水池主动消波的有效性，进行了驻波模拟。针对上述线性波的波浪条件，将水池长度设置为 2 倍波长，右侧边界设置为固壁边界，运行算例。

图 3 为入射波高  $H=1 \text{ m}$ 、周期  $T=6 \text{ s}$ 、水深  $d=8 \text{ m}$  条件下 1 个周期内水池内自由波面沿程分布情况。由图可见，波浪在水池右端边界处发生全反射，然后在水池的内部形成非常明显的驻波现象，波腹处的波高约为入射波高的 2 倍，波节处自由表面的扰动十分微弱，验证了数值波浪水池主动消波的有效性。

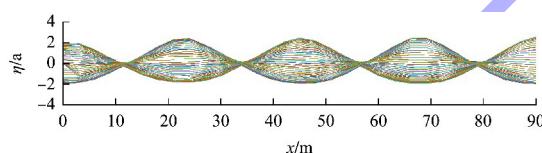


图 3 1 个周期内水池内自由波面沿程分布

## 3 三维港内波浪传播模拟

### 3.1 物理模型试验设计

为验证数值模型的合理性，在当涂试验基地波浪港池( $40 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ )中，开展了不规则波与直立堤相互作用的物理模型试验，通过模拟不同方向波浪作用，观测不同水位及相应波浪组合下波浪与结构物相互作用的传播变形情况，测量不同工况组合下越浪情况及港内波高分布情况，并将收集到的物理模型试验数据与数值模拟的结果进行对比分析。试验使用 LG1 型电容式波高仪进行波高测量，采用人工接水收集越浪水体并称重的方法进行越浪量测量。

依照 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》<sup>[11]</sup> 中对物理模型试验的相关规定，采用

正态模型，按照 Froude 数相似律设计。根据试验内容、设计水位、波浪要素、试验断面及试验设备条件等因素，模型几何比尺取 1:55，原型试验水深分别为 7.65、6.25 m，入射波为不规则波，采用 JONSWAP 谱进行模拟，物理模型试验的组别及波浪要素见表 1。

表 1 试验工况

组别	波向	水位/m	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{13\%}/\text{m}$	$T_m/\text{s}$	$L/\text{m}$
1	S	7.65	2.94	2.00	5.3	35.1
2		6.25	2.46	1.67	4.9	29.0
3	SSE	7.65	2.94	2.00	5.3	35.1
4		6.25	2.46	1.67	4.9	29.0
5	SSW	7.65	2.13	1.45	5.1	33.3
6		6.25	1.76	1.19	4.8	28.2

物理模型试验中的防波堤原型尺寸为：西侧堤宽度 25 m，堤顶高程 8.7 m，东侧堤宽度 12 m，堤顶高程 9.0 m，挡浪墙顶高程 9.5 m，北段基本呈南北走向，南端大致呈 SSW—NNE 走向，均为不透水的直立堤，港区的口门朝向为偏 SW 向。在试验港池中摆放模型时，依据《水运工程模拟试验技术规范》要求，保证造波机与建筑物模型的间距大于 6 倍平均波长，堤头与水池边界的间距大于 3 倍平均波长，以确保波浪得到充分平稳和波浪传播不受边界影响，且满足波浪折射、绕射和反射相似。试验采用可移动式造波机，通过转动造波机，并配合导波板制造出不同方向(S 向、SSE 向、SSW 向)的波浪，模型在试验港池中的布置方式见图 4，波高测点布设位置见图 5。

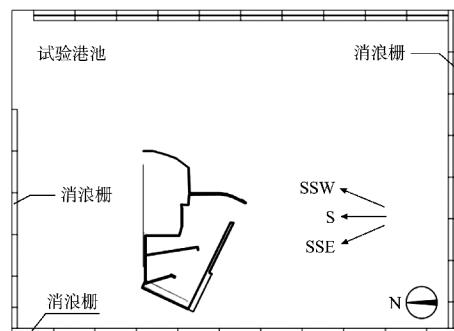


图 4 模型在港池内布置示意

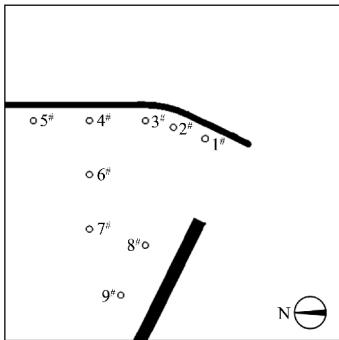


图 5 波高测点布设位置

### 3.2 数值水池建立

空水池的造波及主动消波有效性得到验证后, 在数值波浪水池内放置了环抱形直立式防波堤进行数值计算。数值波浪水池的设置见图 6, 长 660 m、宽 660 m、高 15 m, 使用 blockMesh 针对整个计算区域生成结构化的六面体网格, 考虑到数值水池的整体尺寸及试验波浪要素, 为兼顾计算的效率和精确度, 将自由表面附近的网格进行加密, 保证 1 个有效波高内至少有 10 个网格, 其余垂向网格间距向上下两侧逐渐递增。

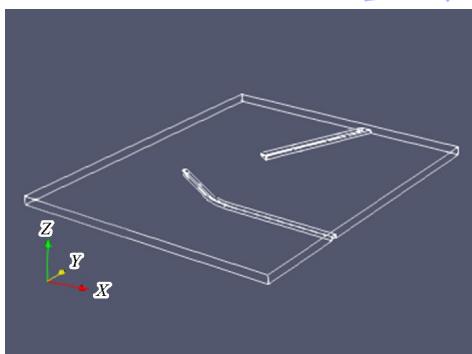


图 6 数值波浪水池的整体视图

因为该数值模拟试验需要考虑越浪情况, 因此, 在防波堤附近的网格加密便于捕捉越浪情况。使用 AutoCAD 三维建模绘制防波堤的外部轮廓, 导出为 STL 格式, 然后使用网格划分工具 SnappyHexMesh 对三维 STL 格式的防波堤模型表面进行捕捉, 并对与 STL 图形边界相交的网格进行分裂和加密(图 7), 在与物理模型试验相同位置处布设波高测点。

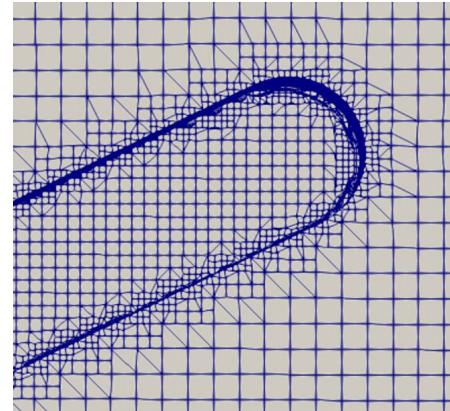


图 7 防波堤附近加密网格

### 3.3 不规则波造波

试验采用合田良实建议改进的 JONSWAP 谱进行模拟, 该波谱的表达形式为:

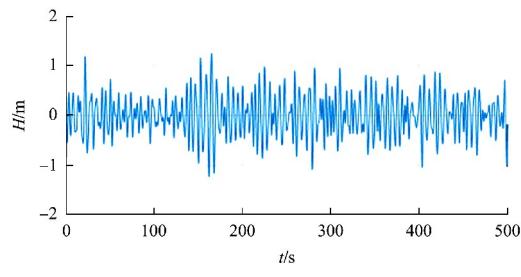
$$S(f) = \beta_J H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}(T_p f)^{-4}\right] \cdot \gamma^{\exp\left[-(f/f_p - 1)^2/2\sigma^2\right]} \quad (8)$$

$$\text{其中: } \beta_J = \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \cdot [1.094 - 0.01915\ln\gamma] \quad (9)$$

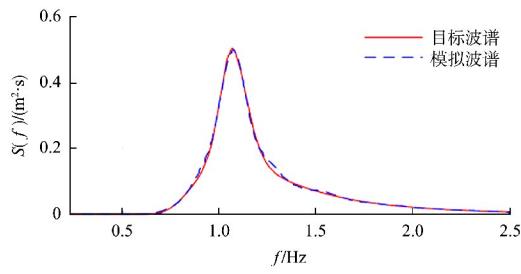
$$T_p = \frac{T_{H_{1/3}}}{1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}} \quad (10)$$

式中:  $S(f)$  为波浪谱密度函数;  $H_{1/3}$  为有效波高;  $f$  为波浪频率;  $f_p$  为谱峰周期;  $\gamma$  为谱峰因子, 取 3.30;  $\sigma$  为波浪密度的标准差,  $f \leq f_p$  时取 0.07,  $f > f_p$  时取 0.09。

采用线性叠加法生成试验所需的不规则波, 依据等分频率法将波浪的能量分割成 80 份<sup>[12]</sup>。取  $x=55$  m 处的测点进行分析, 以有效波高 1.67 m 为例, 图 8a) 为该点的波面历时曲线, 模拟波浪的有效波高为 1.678 2 m, 与理论有效波高误差为 -0.5%, 满足《水运工程模拟试验技术规范》要求。将实测数据进行快速傅里叶变换分析, 得到不规则波的能量谱, 该模拟波谱与目标波谱的对比情况见图 8b), 由图可知二者拟合较好, 因此该求解器能够有效地模拟不规则波的产生和传播过程。



a) 波面历时



b) 目标波谱与模拟波谱对比

图 8  $H_{1/3} = 1.67 \text{ m}$  情况下造波结果

### 3.4 波高结果对比

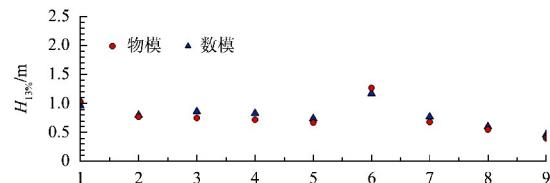
经过物理模型试验和数值模拟计算, 可知组别 2、4、5、6 防波堤堤顶不越浪, 组别 1、3 防波堤堤顶越浪, 以下分别对不越浪和越浪情况下的波高结果进行对比分析。

#### 3.4.1 不越浪情况对比

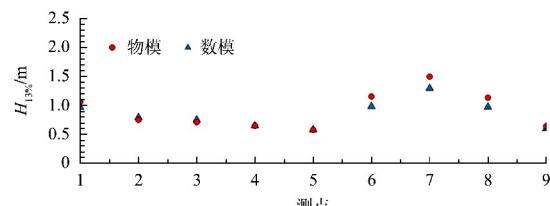
不越浪组别(组别 2、4、5、6)物模与数模有效波高对比情况和绝对误差见图 9 和表 2, 可知不越浪情况下的 4 个组别中各测点有效波高的试验结果与数值模拟结果均吻合良好, 最大绝对误差为 0.200 m, 为组别 4 中 7 号测点处的绝对误差, 原因可能是该点处的波高较大, 超出了细化网格的范围, 需进一步验证; 最小绝对误差为 0.001 m, 表明在不越浪情况下, 该模型能够较好地模拟三维港内波高分布情况。

表 2 不越浪组别物模与数模有效波高的绝对误差

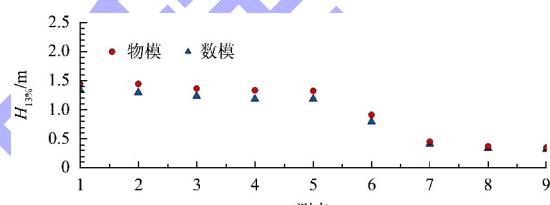
组别	最大绝对误差/m	最小绝对误差/m	平均绝对误差/m
2	0.109	0.031	0.078
4	0.200	0.001	0.084
5	0.153	0.031	0.099
6	0.132	0.005	0.085
合计	0.200	0.001	0.086



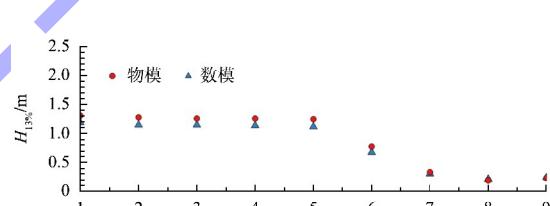
a) 组别2



b) 组别4



c) 组别5

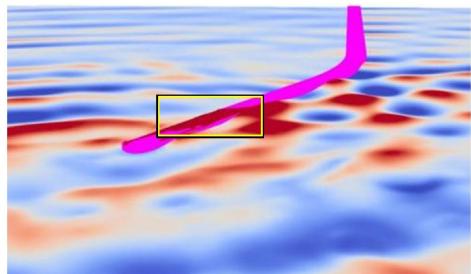


d) 组别6

图 9 不越浪组别物模与数模有效波高对比情况

#### 3.4.2 越浪情况对比

数值模拟不仅考虑口门绕射波浪, 也考虑了越浪情况, 通过在防波堤堤顶设置长方体区域的竖直面, 采集该面的通量来获得越浪量。以组别 3 的工况为例, 图 10 中方框处越浪量的试验结果为  $0.010 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ , 数值模拟结果为  $0.014 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ , 表明数值模型测得的越浪量结果准确。另外, 由图 10 可知, 该数值模型能够较好地模拟越浪的过程。



a) 数值模型



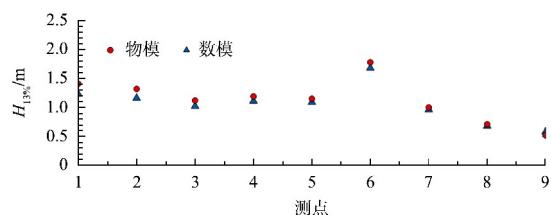
b) 物理模型

图 10  $h=7.65\text{ m}$ 、SSE 向入射条件下越浪过程

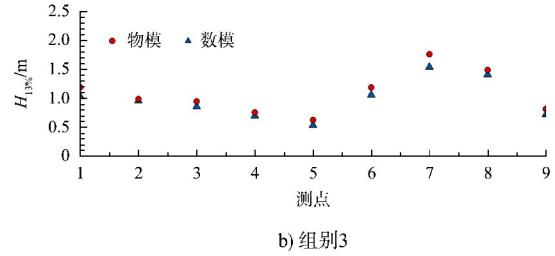
越浪组别(组别 1、3)物模与数模有效波高对比情况和绝对误差见图 11 和表 3, 可以看出, 越浪情况下的 2 个组别中各个测点有效波高的试验结果与数值模拟结果均吻合良好, 最大绝对误差为 0.220 m, 为组别 3 中 7 号测点处的绝对误差, 与不越浪组别的情况相同, 最小绝对误差为 0.030 m, 表明在越浪情况下, 该模型能够较好地模拟越浪水体产生的次生波浪与口门进入的绕射波浪叠加情况, 并准确反映港内波浪场分布情况。

表 3 越浪组别物模与数模有效波高的绝对误差

组别	最大绝对误差/m	最小绝对误差/m	平均绝对误差/m
1	0.180	0.030	0.091
3	0.220	0.030	0.107
合计	0.220	0.030	0.099



a) 组别1



b) 组别3

图 11 越浪组别物模与数模有效波高对比

图 12 为 SSE 向不规则波入射时数值水池内的波浪分布情况, 其中图 12a) 为越浪工况, 图 12b) 为不越浪工况。由图可见, 防波堤提前反射现象明显, 堤头处发生了绕射, 港内的波峰线平稳, 说明防波堤对港外入射波浪的掩护效果较为明显, 对保障港内的水面平稳起到了重要作用。另外, 在水深为 7.65 m 时, 由于防波堤对水体的阻挡, 水体不断聚集爬升, 发生了越浪, 如图 12a) 框中所示。

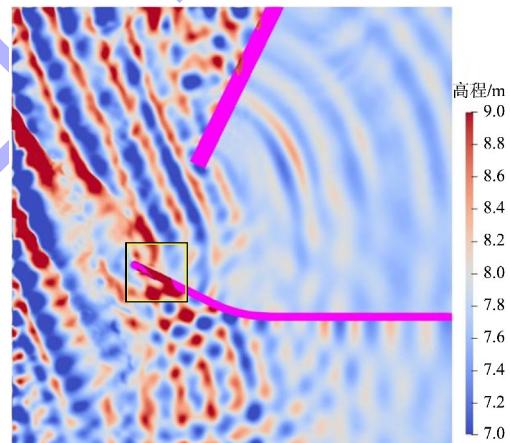
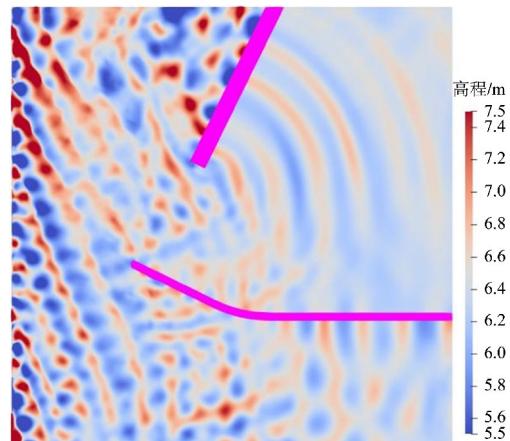
a)  $h=7.65\text{ m}$ b)  $h=6.25\text{ m}$ 

图 12 SSE 向入射条件下水池波浪分布

#### 4 结论

1) 通过在防波堤堤顶设置通量面来获得数值水池的越浪量，与物理模型试验的结果进行对比，可知数值模拟得到的越浪量结果准确，能够较好地模拟越浪的过程。

2) 通过比较数值模拟得到的港内多个测点的有效波高，发现堤顶越浪与不越浪的情形下，均与相同工况下的物理模型试验所得数据吻合良好，证实了该模型的有效性。

3) 建立考虑越浪情况的三维数值水池可用于优化港口布局的进一步研究。

#### 参考文献：

- [1] POS J D, KILNER F A. Breakwater gap wave diffraction: an experimental and numerical study [J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 1987, 113(1): 1-21.
- [2] 王登婷, 潘军宁, 黄海龙, 等. 竹排浮式结构消浪效果模型试验研究 [J]. 水运工程, 2006(5): 12-15.
- [3] 李鑫丹, 王震, 王登婷, 等. 直立式码头越浪量及排水系统试验研究 [J]. 水运工程, 2014(9): 57-63, 70.
- [4] SKOURUP J, Schäffer H A. Wave generation and active absorption in a numerical wave flume [C]//The Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference. Honolulu: International Society of Offshore and Polar Engineers, 1997: 85-91.
- [5] 林祥志, 王红川. 漳门湾水域波浪计算分析 [J]. 水运工程, 2004(7): 16-18.
- [6] 王登婷. 基于 N-S 方程的波浪与可渗防波堤相互作用的数值模拟 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2011, 26(5): 581-588.
- [7] 杨锦凌, 王绿卿, 饶永红, 等. Mike21-BW 在游艇码头平面规划布置中的应用 [J]. 水运工程, 2019(11): 47-53.
- [8] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [9] HIGUERA P, LARA J L, LOSADA I J. Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM [J]. Coastal engineering, 2013, 71(1): 102-118.
- [10] Schäffer H A, KLOPMAN G. Review of multidirectional active wave absorption methods [J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2000, 126 (2): 88-97.
- [11] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [12] 俞聿修, 柳淑学. 随机波浪及其工程应用 [M]. 3 版. 大连: 大连理工大学出版社, 2003.

(本文编辑 赵娟)

#### · 消息 ·

#### 中交集团顾明被授予“国家卓越工程师”称号

2024年1月19日上午，“国家工程师奖”表彰大会在北京人民大会堂举行。在“国家工程师奖”首次评选表彰之际，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平作出重要指示，向受表彰的“国家卓越工程师”和“国家卓越工程师团队”致以热烈祝贺。

习近平强调，面向未来，要进一步加大工程技术人才自主培养力度，不断提高工程师的社会地位，为他们成才建功创造条件，营造见贤思齐、埋头苦干、攻坚克难、创新争先的浓厚氛围，加快建设规模宏大的卓越工程师队伍。希望全国广大工程技术人员坚定科技报国、为民造福理想，勇于突破关键核心技术，锻造精品工程，推动发展新质生产力，加快实现高水平科技自立自强，服务高质量发展，为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业作出更大贡献。

为表彰工程技术领域先进典型，党中央、国务院决定开展“国家工程师奖”首次评选表彰，授予81名个人“国家卓越工程师”称号、50个团队“国家卓越工程师团队”称号。中交集团所属天航局首席顾问顾明被授予“国家卓越工程师”称号。