



# 基于非静压模型与 Boussinesq 模型的 港池泊稳研究\*

王炳极<sup>1</sup>, 吕英康<sup>1</sup>, 王振鲁<sup>1,2</sup>, 梁丙臣<sup>1,2</sup>, 史璐铭<sup>1,2</sup>

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266000; 2. 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 防波堤掩护水域的泊稳条件对船舶进出港以及靠泊作业的安全性具有显著影响, 如何精准模拟堤后的波高分布对工程设计具有重要意义。通过试验和数值模拟方法, 深入探讨扭王字块护面的防波堤后泊稳条件。在物理模型试验的基础上, 采用基于非静压方程的 SWASH 模型, 对工程区域的波高分布进行数值模拟, 在 SWASH 模型中, 扭王字块防波堤通过孔隙层、地形与孔隙层结合以及等效底摩阻系数等 3 种方法进行表示。采用基于 Boussinesq 方程的 MIKE 21 BW 模型对工程实际区域的波高分布进行数值模拟, 并与非静压模型的结果进行比较。结果表明, 在实际工程中的港池泊稳研究方面, 基于非静压方程的 SWASH 模型中的等效底摩阻系数方法更具优势和适用性。

**关键词:** 非静压波浪模型; Boussinesq 方程; 扭王字块防波堤; 数值模拟

中图分类号: U653.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0028-09

## Harbor basin mooring stability based on non-hydrostatic and Boussinesq models

WANG Bingji<sup>1</sup>, LYU Yingkang<sup>1</sup>, WANG Zhenlu<sup>1,2</sup>, LIANG Bingchen<sup>1,2</sup>, SHI Luming<sup>1,2</sup>

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266000, China;

2. Shandong Key Laboratory of Ocean Engineering, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** The mooring stability conditions of breakwater cover waters have a significant impact on the safety of ships entering and leaving ports and berthing operations. How to accurately simulate the wave height distribution behind the breakwater is of great significance to engineering design. By means of test and numerical simulation, we discuss in depth mooring conditions behind the breakwater with an armor layer of accropode. Based on the physical model test, we use the SWASH model based on the non-hydrostatic equation to numerically simulate the wave height distribution in the engineering area, and represent the accropode armored breakwater by three methods in the SWASH model, such as the accropode armored breakwater passing through pore layer, topography and pore layer combination and equivalent bottom friction coefficient. Then we use the MIKE 21 BW model based on Boussinesq equation to simulate the wave height distribution in the actual engineering area, and the results are compared with those of the non-hydrostatic model. The results show that the equivalent bottom friction coefficient method in the SWASH model based on the non-hydrostatic equation is more advantageous and applicable in the study of harbor basin mooring stability in practical engineering.

**Keywords:** non-hydrostatic wave model; Boussinesq equation; accropode armored breakwater; numerical simulation

防波堤是港口与海岸工程中重要的建筑物, 其中扭王字块防波堤是我国沿海常见的护岸形式。

扭王字块防波堤后的泊稳条件是设计防波堤的重要水动力条件。工程实际中有多种波浪模型可以

收稿日期: 2024-03-10

\*基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(202362007、842213028)

作者简介: 王炳极(1998—), 男, 硕士研究生, 从事防波堤越浪研究。

模拟防波堤后的泊稳条件, 如非线性浅水方程模型、基于 Boussinesq 方程的波浪模型、N-S 方程模型、SPH 模型以及非静压波浪模型等。

近年来, 随着计算机技术的快速发展, Boussinesq 方程不断得到完善, MIKE 21 BW 就是基于改进的 Boussinesq 方程, 对沿海地区以及港口波浪水动力进行模拟和评估的程序<sup>[1]</sup>。董胜等<sup>[2]</sup>使用 MIKE 21 BW 对人工岛游艇码头的泊稳条件进行数值模拟, 数值模拟结果与物理模型试验结果对比表明 MIKE 21 BW 适用于码头泊稳条件的计算; 丁兆宽等<sup>[3]</sup>使用 MIKE 21 BW 构建日照港石臼港区的波浪模型, 研究不同方案组合下的港内泊稳条件; 杨锦凌等<sup>[4-5]</sup>基于工程实际案例, 使用 MIKE 21 BW 探究防波堤位置、防波堤的结构形式对泊稳条件的影响规律, 并基于波浪物理模型试验, 验证了 MIKE 21 BW 模型应用于港区泊稳条件的可行性。

非静压波浪模型相比于 N-S 方程模型或 SPH 模型计算量小、计算效率高<sup>[6]</sup>, 模拟精度较高, 并且可以完整地计算防波堤的越浪过程, 所以非静压波浪模型可以通过计算防波堤的越浪量检验港区的泊稳条件。邹国良等<sup>[7]</sup>为了在非静压波浪模型中实现无反射造波, 在连续性方程中添加质量源项进行域内源造波, 并通过阻尼消波方法进行数值消波; 张娜等<sup>[8]</sup>通过构建非静压模型模拟规则波和不规则波在斜坡上的波浪传播变形, 并在此基础上进行越浪量数值计算; 吴辰等<sup>[9]</sup>基于非静压波浪数学模型模拟规则波及不规则波在光滑不可渗斜坡堤上的越浪过程, 并分别就小尺度和大尺度水槽的越浪量试验研究成果进行比较; 王鑫钰等<sup>[10]</sup>在 SWASH 模型中利用等效底摩阻系数表示扭王字块防波堤与波浪之间的相互作用, 能够较好地反映人工块体护面斜坡堤的越浪变化; Rathnayaka 等<sup>[11]</sup>基于潜堤物理模型试验数据, 利用非静压模型 SWASH 模拟潜堤附近流场和波高特性, 研究发现非静压模型可以较准确地模拟结构附近波高和相位平均流速的分布。

本文基于物理模型试验, 测定扭王字块防波堤后泊稳条件; 然后应用非静压模型中表示扭王

字块防波堤的 3 种不同的方法, 基于工程实际区域开展数值模拟, 并将数值模拟结果与物理模型试验结果进行对比, 分析同一模型下不同方法的优缺点; 再应用基于 Boussinesq 方程的 MIKE 21 BW 模型对工程实际区域的波高分布进行数值模拟, 将模拟结果与非静压模拟结果进行对比, 分析不同波浪模型模拟扭王字块防波堤后波高分布的准确性; 最后对数值模拟结果进行定量分析。

## 1 数值模型

### 1.1 非静压模型

非静压波浪模型 SWASH 的三维控制方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中:  $u$ 、 $v$  和  $w$  分别为速度在  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向上的分量;  $\eta$  为自由水面;  $d$  为静水深;  $h$  为总水深, 其值为  $\eta$  与  $d$  之和;  $\rho_0$  为密度;  $t$  为时间;  $q$  为动压。

在 SWASH 模型中, 扭王字块护面块体防波堤有 3 种表示方式: 孔隙层方法、地形与孔隙层结合的方法以及等效底摩阻系数方法。

#### 1.1.1 孔隙层方法

在 SWASH 模型中, 孔隙层方法能够模拟波浪在遭遇多孔介质防波堤时的反射和折射现象。孔隙层内部流体的运动通过附加的层流阻力项  $f_1$ 、紊流阻力项  $f_i$  表示, 公式见式(5)、(6)。孔隙层中孔隙率  $n$  的大小取值为 0~1, 孔隙率的取值需要经过物理模型试验的校正。

$$f_1 = \alpha_E \cdot \frac{(1-n)^3}{n^2} \frac{\nu}{d'} \quad (5)$$

$$f_i = \beta \cdot \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{d'} \quad (6)$$

式中:  $d'$  为特征粒径的大小;  $\nu$  为运动黏性系数;

$\alpha_E$  和  $\beta$  均为 Forchheimer 常数, SWASH 模型中的默认值是 200 和 1.1。

当采用孔隙层方法描述扭王字块防波堤时, 需要在地形文件中移除扭王字块防波堤。在孔隙层方法中, height 参数用于表示防波堤的高度。在 SWASH 的早期版本中, 设置 height 参数并不能有效地阻挡波浪, 因为 height 参数的主要功能仅仅是计算当含水层中存在建筑物时, 含水层的平均孔隙率, 这与海绵层的功能相似, 只对波浪的传播产生耗散作用。然而, SWASH 的最新版本 9.01 对此进行了改进, height 参数不仅可以计算平均孔隙率, 还能有效地阻挡波浪。因此, 它可以模拟波浪的反射、折射和绕射现象, 从而对码头前沿的水域提供有效的保护。

### 1.1.2 地形与孔隙层结合方法

地形与孔隙层结合的方法是通过地形文件来刻画防波堤的形态, 随后在地形文件上叠加一层孔隙结构以模拟扭王字块对波浪的反射和透射效应。地形文件的引入使得斜坡式防波堤的形态得以有效地呈现, 而孔隙层的设定则负责表达扭王字块对波浪的耗散作用。因此, 这种方法不仅可以有效模拟扭王字块防波堤对波浪的阻挡作用, 还考虑了斜坡堤越浪影响。

### 1.1.3 等效底摩阻系数方法

等效底摩阻系数方法是一种基于地形文件中增加底摩阻系数的方法, 其主要目的是模拟防波堤的形状和对波浪的耗散作用。这种方法的关键在于确定底摩阻系数, 该系数取决于输入的波浪要素和防波堤的形状。首先, 需要确定曼宁系数, 本文采用文献[10]提出的经验公式确定曼宁系数, 见式(7), 然后根据曼宁系数公式计算出等效底摩阻系数, 见式(8), 并将等效底摩阻系数方法的模拟结果与其他方法进行比较。

$$\frac{n' H_s^{1/3}}{T_p} = 0.03 \times \left\{ 1 - \exp \left[ -277.3 \left( \frac{H_s}{L_0} \right)^{1.3} \right] \right\} \quad (7)$$

$$C_f = \frac{g n'^2}{h^3} \quad (8)$$

式中:  $n'$  为曼宁系数,  $H_s$  为有效波高,  $T_p$  为谱峰

周期,  $L_0$  为波长,  $h$  为水深,  $C_f$  为等效底摩阻系数。

## 1.2 Boussinesq 方程模型

Boussinesq 模型的控制方程为:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq'}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g}{c^2 \sqrt{h^2 + q'^2}} \cdot \frac{p}{h} - E \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{3} Dh \left( \frac{\partial^3 p}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 q'}{\partial x \partial y \partial t} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q'^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq'}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{g}{c^2 \sqrt{h^2 + q'^2}} \cdot \frac{q'}{h} - E \left( \frac{\partial^2 q'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q'}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{3} Dh \left( \frac{\partial^3 q'}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 p}{\partial x \partial y \partial t} \right) \quad (11)$$

式中:  $x$  和  $y$  为水平坐标;  $t$  为时间;  $\xi$  为高出平均水位的水面高度;  $p$ 、 $q'$  为  $x$ 、 $y$  方向的流量密度;  $h$  为水深;  $D$  为平均水深;  $K$  为曼宁系数;  $C$  为谢才系数, 其值为  $Kh^{1/6}$ ;  $E$  为紊动涡黏系数。

## 2 物理模型试验

结合具体工程, 对某码头港池开展系统的波浪整体物理模型试验, 研究不同水位以及不同波高、周期的波浪对港池泊稳的影响, 并测定港池内的波高分布。物理模型试验地形布置见图 1, 整个工程包括码头(兼防波堤)、防波堤、道路、陆域建筑物及相应的配套设施等。其中靠近陆地部分为现有引堤改造工程, 长度约为 280 m; 现有引堤与码头之间为长 180 m 引堤; 码头(兼防波堤)长为 350 m, 包括两个泊位, 长分别为 110 和 240 m, 均为沉箱结构; 新建防波堤段长为 260 m, 此外堤头部分长为 30 m, 为斜坡式结构, 见图 2。



图 1 物理模型试验布置

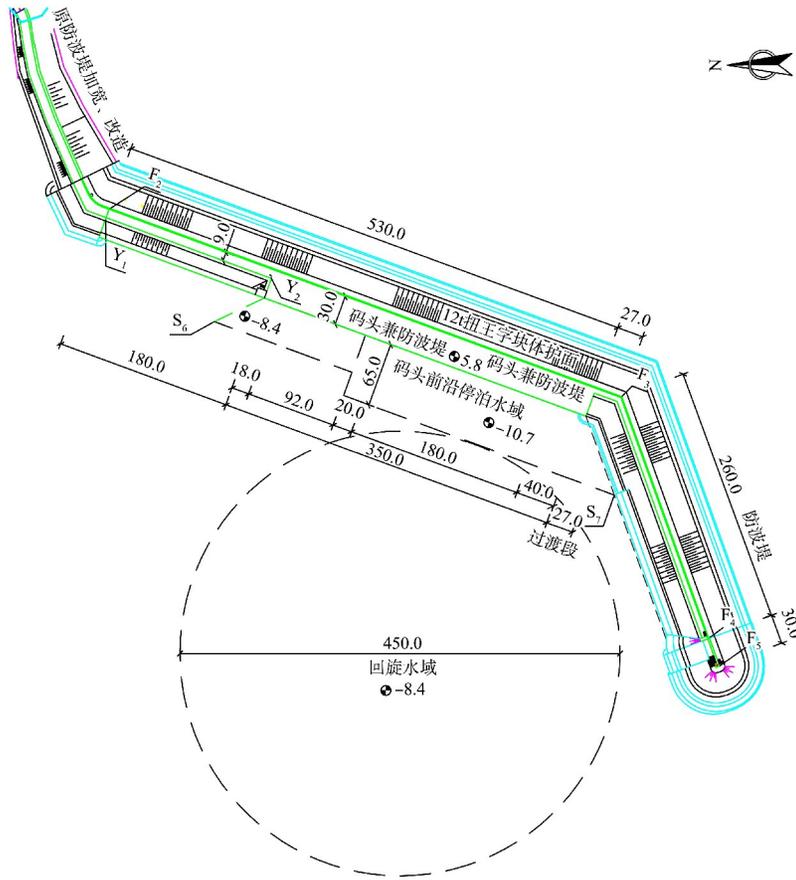


图 2 工程平面布置 (单位: m)

物理模型试验在中国海洋大学山东省海洋工程重点实验室波流水池中进行, 水池长 60 m、宽 36 m、深 1.5 m。模型试验选择正态比尺, 根据重力相似准则, 综合考虑模型区域、设备能力等因素, 选择模型长度比尺  $\lambda = 50$ 。模型制作并布置在水池后, 在港池内共布置 60 支波高仪进行波高测量(图 3), 能够满足测量要求。3 种不同特征水位下 2 a 一遇、S 向波浪作用的物理模型试验工况见表 1。物理模型试验结果为非静压模型以及 Boussinesq 模型的构建提供验证数据。

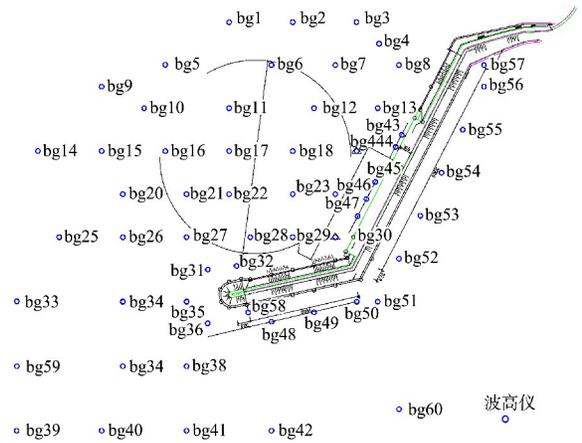


图 3 物理模型试验波高仪布置

表 1 物理模型工况

重现期/ a	水位	有效 波高/m	谱峰 周期/s	波向
2	极端高水位(5.13 m)	1.23	5.8	S
	设计高水位(4.15 m)	1.15	5.8	S
	设计低水位(0.45 m)	1.11	5.8	S

### 3 数值计算

#### 3.1 非静压模型

本文 SWASH 模型的计算区域精确对应实际工程区域, 长 1 800 m、宽 3 600 m, 并采用 1 m 的网格分辨率, 模型中水深为正值。为了更精确地

模拟波浪的色散性和非线性特性，垂直方向上采用了2层 Sigma 层。模型的计算时间设定为 1 800 s，时间步长为 0.01 s。首先根据工程水文实测的有效波高和谱峰周期作为目标值进行模型率定。经反复校正后的有效波高 1.10 m 和谱峰周期 7.5 s 被用作造波边界的输入值，造波边界选择弱反射型边界条件。在其余边界设置 3 倍波长的海绵层，用于吸收模型内部传播到边界的波浪。根据物理模型试验结果，扭王字块防波堤的孔隙率约为 0.5。数值模拟工况采用的水位为 S 向 2 a 一遇条件下的极端高水位、设计高水位和设计低水位，这与物理模型试验工况相吻合。

### 3.1.1 孔隙层方法

孔隙层方法所描绘的极端高水位水深见图 4，全场瞬时波面云图见图 5。可以看出，当波浪遇到由孔隙层方法所描述的扭王字块防波堤时，堤头处会发生明显的反射、折射和绕射现象。因此，这种方法可以有效地模拟波浪在近岸的传播过程。然而根据图 6 可以看出，在不同的水位下，绝大多数数值模拟值小于物理模型试验值，这种现象在设计高水位和设计低水位的情况下更为明显。这是因为孔隙层方法所描述的防波堤无法精确地刻画斜坡式防波堤，因此在计算中未考虑到越浪量，导致堤后的波高偏小。

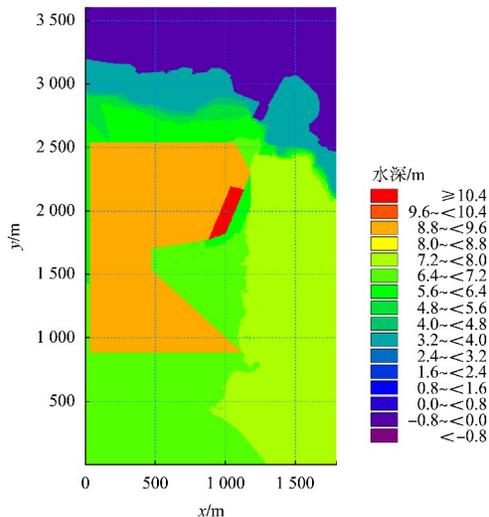


图 4 孔隙层方法下极端高水位水深云图

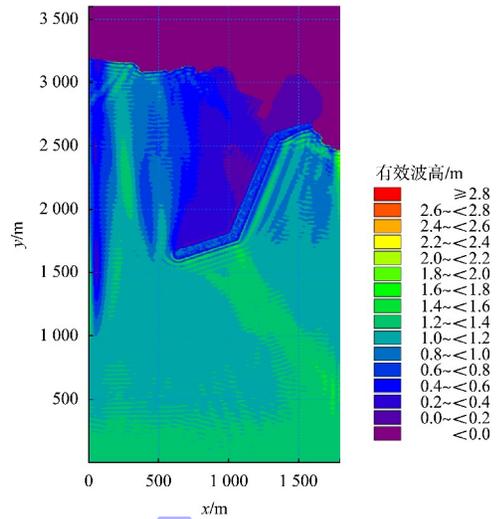
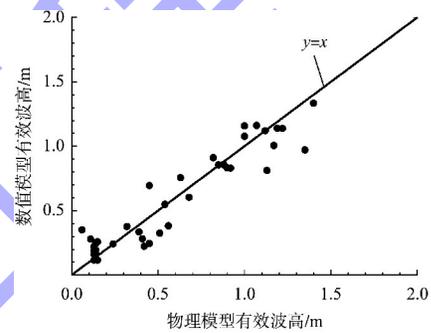
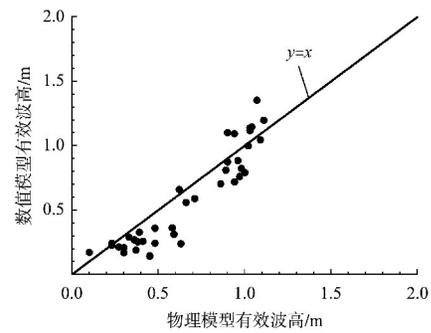


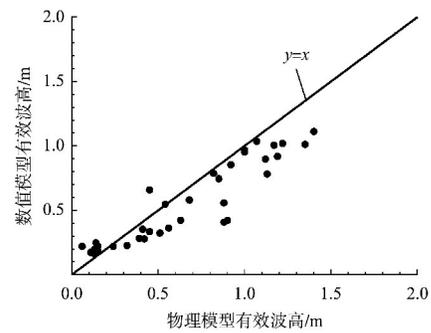
图 5 极端高水位全场瞬时波面云图



a) 极端高水位



b) 设计高水位



c) 设计低水位

图 6 不同水位条件下计算值与试验值有效波高对比

### 3.1.2 地形与孔隙层结合方法

在极端高水位下, 地形与孔隙层结合方法表示的扭王字块防波堤水深云图见图 7, 全场瞬时波面云图见图 8。可以看出, 当波浪遇到防波堤时, 发生了明显的折射、绕射和反射现象。因此, 地形与孔隙层结合方法能够模拟近岸波浪传播的过程。在 3 种不同水位下, 数值模拟值与物理试验值的对比结果见图 9。相较于仅使用孔隙层方法, 地形与孔隙层结合方法由于考虑了越浪量的影响, 使得堤后的波高值明显大于孔隙层方法模拟的波高值。数值模拟结果与物理模型试验结果的吻合程度良好, 由此可见, 非静压模型中地形与孔隙层结合的方法可以有效地模拟防波堤后的泊稳条件。在工程实际模拟中, 地形与孔隙层结合的方法优于孔隙层方法。

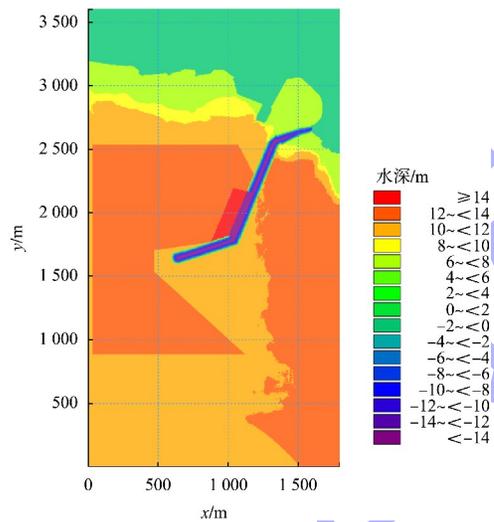


图 7 孔隙层与地形结合方法下极端高水位水深云图

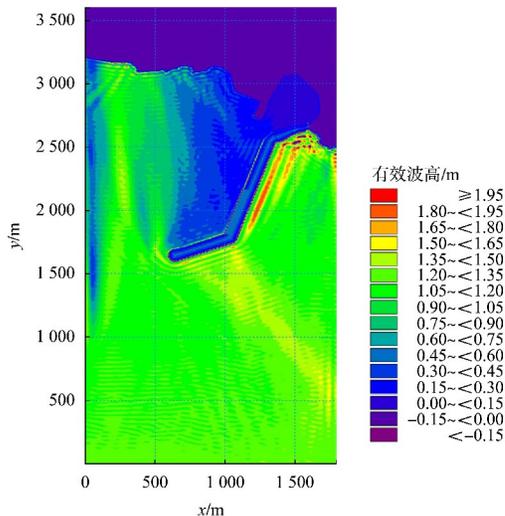
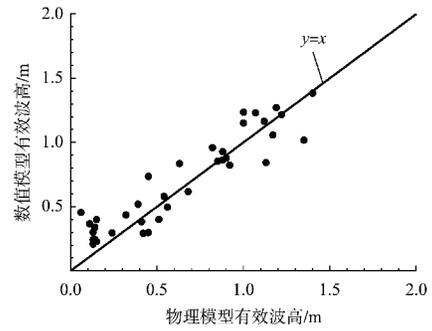
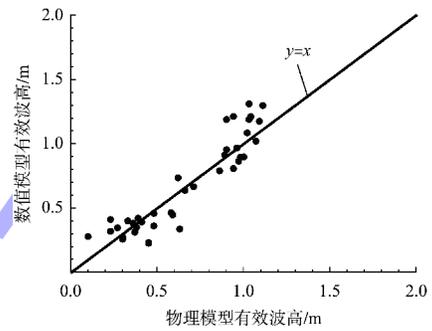


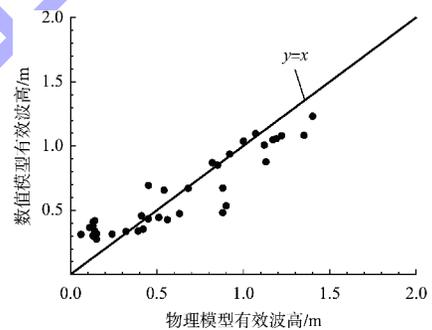
图 8 极端高水位全场瞬时波面云图



a) 极端高水位



b) 设计高水位



c) 设计低水位

图 9 不同水位条件下计算值与试验值有效波高对比

### 3.1.3 等效底摩阻系数方法

在极端高水位水深云图(图 10)中, 由于有效波高和谱峰周期在 3 种工况下差距不大, 因此在极端高水位、设计高水位和设计低水位 3 种工况下, 等效底摩阻系数均设定为 0.16。从全场瞬时波面图(图 11)可以看出, 扭王字块防波堤处的波浪出现了折射、绕射和反射现象, 这表明等效底摩阻系数方法能够有效地模拟近岸波浪的传播过程。此外, 物理模型试验与数值模型的散点图(图 12)对比结果显示, 数据点分布集中且均匀, 这进一步证明了等效底摩阻系数方法能够有效地

模拟扭王字块防波堤堤后的泊稳条件。这种模拟方法的准确性和实用性为海洋工程的设计和和实施提供了有力的支持。

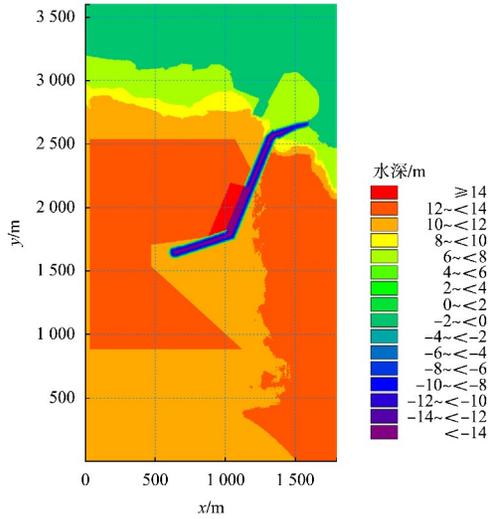


图 10 等效底摩阻系数方法下极端高水位水深云图

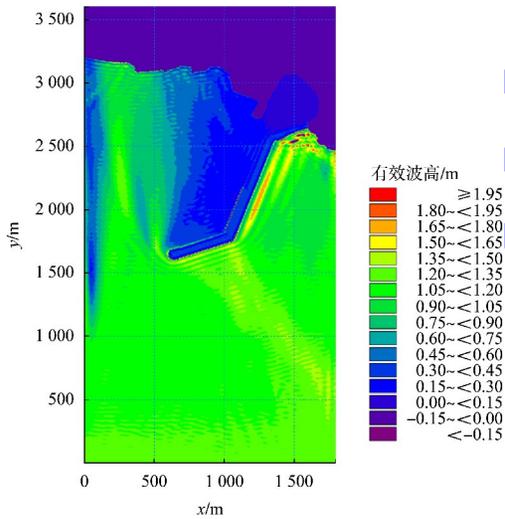
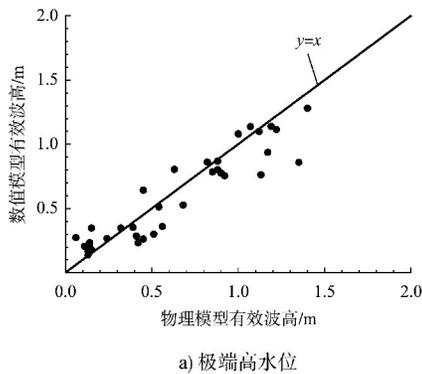
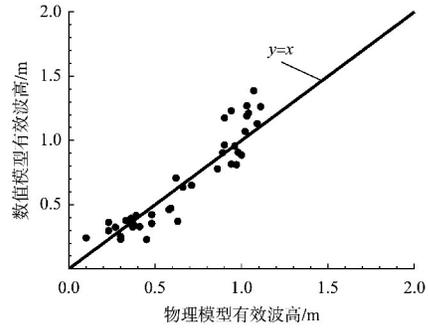


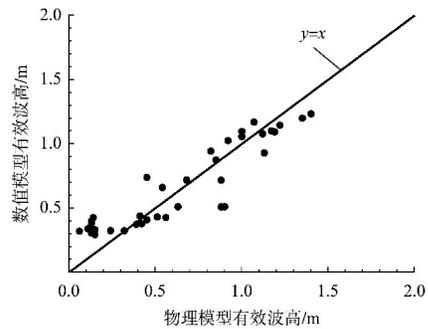
图 11 极端高水位全场瞬时波面云图



a) 极端高水位



b) 设计高水位



c) 设计低水位

图 12 不同水位条件下计算值与试验值有效波高对比

### 3.2 Boussinesq 方程模型

为了对比不同波浪模型在模拟扭王字块防波堤后波高分布的准确性，本文选择基于 Boussinesq 方程的 MIKE 21 BW 模型作为比较对象。该模型的计算区域与工程实际区域相符，极端高水位水深云图见图 13。在 MIKE 模型中水深为负值，其中  $x$  方向长度为 1 800 m、 $y$  方向长度为 3 600 m，网格分辨率为 3 m。计算总时间为 1 650 s，时间步长为 0.11s。在模型的校验过程中，采用物理模型试验中的实测值进行模型参数的校准。校准后的波高 1.03 m 和谱峰周期 7.5 s 作为模型造波边界的输入值。在其余边界设置 3 倍波长的海绵层，用于吸收模型内部传播到边界的波浪。同时，利用 MIKE 21 Toolbox 中的计算工具计算扭王字块防波堤的孔隙率，其计算结果为 0.8。通过以上的模型设定和参数校准，能够更准确地模拟扭王字块防波堤堤后的波高分布，从而为防波堤的设计优化提供更有力的科学依据。

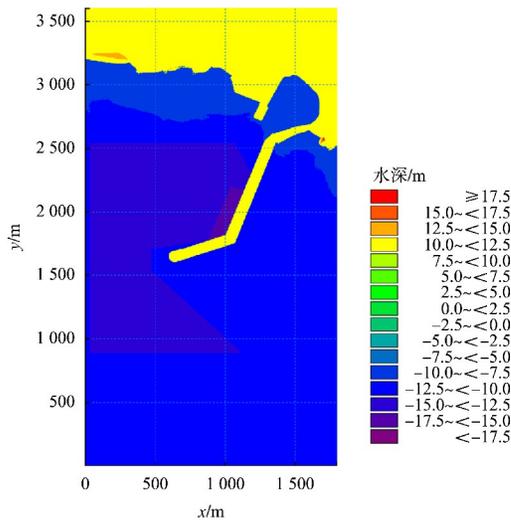


图 13 MIKE 21BW 极端高水位水深云图

极端高水位全场瞬时波面云图见图 14。可以看出, MIKE 21 BW 模型计算出的极端高水位下波高分布表明波浪传播至扭王字块防波堤时, 会发生显著的反射、折射和绕射现象, 这表明基于 Boussinesq 方程的 MIKE 21 BW 模型能够有效地模拟近岸波浪传播过程。然而根据图 15 可以观察到, 与非静压模型相比, 散点分布较为分散。这表明, 数值模拟结果与物理模型试验结果的相关性, 比非静压模型低。此外, 数值模拟的结果相较于物理模型试验值偏小, 这一差异可归因于基于 Boussinesq 方程的 MIKE 21 BW 模型并未考虑越浪量的影响。在物理模型试验中, 扭王字块防波堤处的越浪现象较为明显, 且不可忽视。因此, 未考虑越浪量因素的 MIKE 21 BW 模型所得的数值模拟结果偏小, 这一点在未来的改进和研究中需要予以充分考虑。

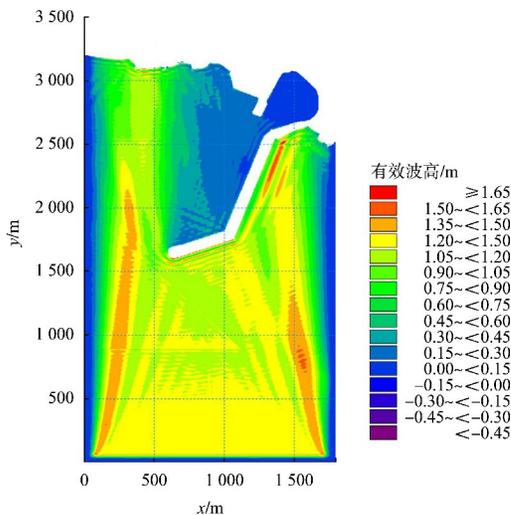


图 14 极端高水位全场瞬时波面云图

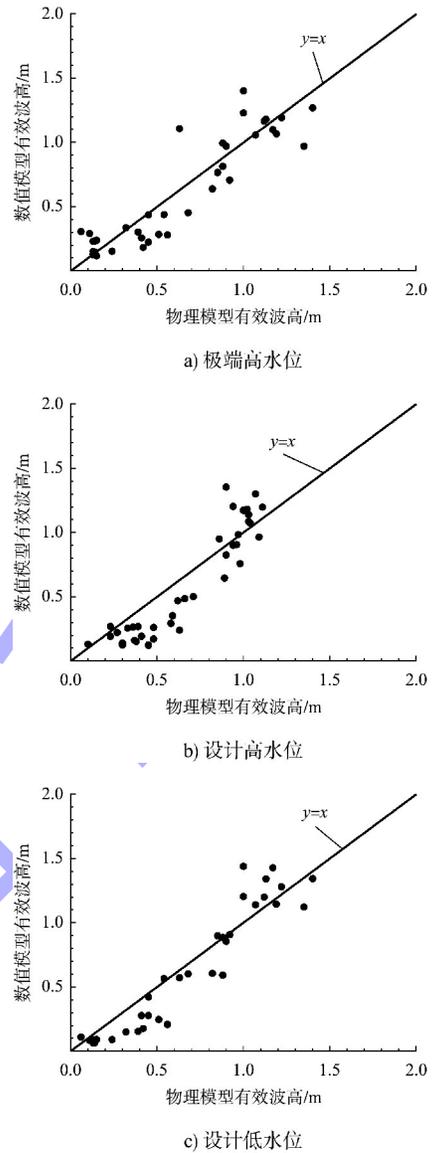


图 15 不同水位条件下计算值与试验值有效波高对比

### 3.3 定量比较

前文只是定性地比较了同一模型下不同方法和不同模型之间模拟扭王字块防波堤后泊稳条件的准确性。为了更好地比较同一模型下不同方法之间和不同模型之间模拟扭王字块防波堤堤后泊稳条件的准确性, 本文采用 3 个指标进行定量比较, 即偏差  $B_{ias}$ 、均方根误差  $E_{RMS}$  和相关性系数  $R$ , 公式见式(12)~(14), 计算结果见表 2。其中偏差也被称为平均误差, 较小的偏差值表明观测值和预测值之间具有更好的一致性。

$$B_{ias} = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} (S_i - M_i) \quad (12)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} (S_i - M_i)^2} \quad (13)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} [(S_i - \bar{S})(M_i - \bar{M})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_d} (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_d} (M_i - \bar{M})^2}} \quad (14)$$

式中： $N_d$  为观测值和预测值数量的总和， $S_i$  为预测值， $M_i$  为观测值， $\bar{S}$  为预测平均值， $\bar{M}$  为观测平均值。

表 2 不同工况下  $B_{ias}$ 、 $E_{RMS}$  和  $R$  计算结果

水位	模型	方法	$B_{ias}$	$E_{RMS}$	$R$
极端高水位	非静压模型	孔隙层方法	-0.055 9	0.157 8	0.915 6
		地形与孔隙层结合	0.013 7	0.148 1	0.925 2
		等效底摩阻方法	0.035 3	0.141 9	0.923 6
	Boussinesq 方程模型	-	0.116 4	0.275 1	0.858 6
设计高水位	非静压模型	孔隙层方法	0.178 8	0.185 3	0.893 7
		地形与孔隙层结合	0.076 1	0.164 4	0.931 6
		等效底摩阻方法	0.091 5	0.166 9	0.928 5
	Boussinesq 方程模型	-	0.157 3	0.229 9	0.909 0
设计低水位	非静压模型	孔隙层方法	-0.114 2	0.249 0	0.903 8
		地形与孔隙层结合	0.061 3	0.177 5	0.953 6
		等效底摩阻方法	0.092 6	0.188 1	0.924 7
	Boussinesq 方程模型	-	0.095 6	0.200 1	0.922 6

在海洋学领域，非静压模型和 Boussinesq 方程模型是两种重要的工具，它们都能有效地模拟波浪的折射、绕射和反射现象，同时，这两种模型也适合用于模拟近岸波浪的传播过程。然而，在实际应用中，需要更深入地探讨这两种模型的优劣。在非静压模型中，用于表示扭王字块防波堤的 3 种方法中，从定量分析的角度看(表 2)，地形与孔隙层结合的方法优于其他两种。这一结论可由  $B_{ias}$  和  $E_{RMS}$  的数值较小以及散点集中度较高结果得出。此外，模拟值与物理试验值的接近程度及较高的  $R$  值也证实了这一点。这些数据表明，地形与孔隙层结合的方法在预测波浪行为方面，与物理模型试验结果的接近程度较高。尽管等效底摩阻系数的方法在模拟精度上略低，但其在确定底摩阻系数方面的简便性优于地形与孔隙层结合的方法，而后者则需要通过繁琐的物理模型试验来校准孔隙率。因此，综合实际应用的便捷性与对波高分布的模拟精度，等效底摩阻系数的方法是更好的选择。从模拟防波堤堤后泊稳条件的角度来看，非静压模型优于 Boussinesq 方程模型。这一点可从模拟值与实测值的散点图的集

中度更高、 $B_{ias}$  和  $E_{RMS}$  的数值较小以及  $R$  较高结果中看出。因此，在选择近岸波浪模型时，非静压模型可能是更好的选择。综上所述，虽然非静压模型和 Boussinesq 方程模型各有优势，但在特定的应用场景中，需要根据具体需求和条件，选择更适合的模型。

#### 4 结论

1) 地形与孔隙率结合的方法明显优于其他两种方法。然而，孔隙率的确定过程相对复杂，需要依赖物理模型试验进行确定。此外，本文还验证了虽然底摩阻系数方法的精确度略低于地形与孔隙层结合的方法，但其确认过程较为简单。因此，在工程实际模拟时，可以考虑采用等效底摩阻系数方法。

2) Boussinesq 方程模型对于波高的模拟值与实测值的散点图分布较为分散，模拟堤后波浪的准确性低于非静压模型。

3) 等效底摩阻系数方法在对波高分布的预测精度方面与地形与孔隙层方法接近，但因参数确定简单便捷，因此工程中可优先采用等效底摩阻系数方法。