

# 基于神经网络的多向波作用下 直立堤越浪量预测模型 \*

张晓鹏<sup>1</sup>, 季新然<sup>2</sup>, 汤修潮<sup>3</sup>, 李金宣<sup>3</sup>

(1. 中交基础设施养护集团有限公司海南分公司, 海南海口 570228;

2. 海南大学, 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228;

3. 大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 海岸工程中常采用直立堤的结构形式, 波浪作用下的越浪量影响因素众多, 特别是考虑实际多向波的作用, 目前并没有统一的计算方法。利用神经网络方法在计算回归问题上的优势, 构建反向传播神经网络模型, 采用物理试验数据构建训练集, 建立多向波浪作用下直立堤越浪量的预测模型。通过与测试集、经验公式以及其他物理模型试验结果的对比, 显示了本模型具有良好的预测精度, 可满足工程设计需要。利用该模型进一步分析波浪入射角度和方向分布宽度对波浪越浪量的影响规律, 弥补了试验数据不全造成的变化规律不明显的问题。

**关键词:** 越浪量; 神经网络; 多向波; 直立堤

中图分类号: P753; U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0016-06

## Prediction model for wave overtopping calculation on vertical revetment based on neural networks

ZHANG Xiaopeng<sup>1</sup>, JI Xinran<sup>2</sup>, TANG Xiuchao<sup>3</sup>, LI Jinxuan<sup>3</sup>

(1. Hainan Branch of CCCC Infrastructure Maintenance Group Co., Ltd., Haikou 570228, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China;

3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The vertical revetment is a commonly used structural form in coastal engineering. There are numerous factors affecting wave overtopping under wave action, especially considering the actual multi-directional wave action, and currently, there is no unified calculation method. This paper utilizes the advantages of neural network methods in regression problems and constructs a BP neural network model. By using physical experimental data to build the training set, a predictive model for wave overtopping of sloping revetments under multidirectional wave action is established. Through comparisons with the test set, empirical formulas, and other experimental results, the model demonstrates excellent prediction accuracy and can satisfy engineering design needs. Furthermore, the model is utilized to analyze the influence of wave incident angle and directional spreading on wave overtopping, addressing the issue of indistinct variations caused by incomplete experimental data.

**Keywords:** overtopping; neural network; multi-directional wave; vertical revetment

收稿日期: 2023-05-18

\*基金项目: 辽宁省自然科学基金项目 (2021-KF-16-05)

作者简介: 张晓鹏 (1986—), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事路桥设计工作。

通讯作者: 李金宣 (1979—), 男, 博士, 副教授, 从事海岸工程科研与教学工作。E-mail: Lijx@dlut.edu.cn

越浪量是海岸堤防结构断面设计关注的一项重要指标<sup>[1-2]</sup>, 其主要用于确定结构的堤顶高程。一方面, 堤顶高程过低可能导致海浪越过堤顶, 对结构造成严重破坏, 甚至威胁后方地区的安全; 另一方面, 过高的堤顶高程可能增加工程投资, 并影响海岸的美观性。如何合理、准确地计算结构的越浪量对结构设计和安全至关重要。

波浪在海堤上的越浪量受许多因素的影响, 包括波浪高度、波浪周期、结构形状和尺寸, 甚至海底地形等。因此, 波浪的越浪量是一个复杂的问题, 需要综合考虑多种因素。从 20 世纪 50 年代开始, 国内外学者开始关注越浪现象, 主要通过模型试验进行研究, 如国外 Saville<sup>[3]</sup>、Owen<sup>[4]</sup>、Bruce 等<sup>[5]</sup>、van der Meer 等<sup>[6]</sup>进行了规则波、不规则波作用下斜坡堤的越浪量试验。国内王红等<sup>[7]</sup>研究单坡堤在不规则波浪作用下的越浪量, 分析影响越浪量的因素; 赵凤亚<sup>[8]</sup>研究斜向波和多向波在直立堤上的越浪量, 提出考虑波浪入射角度和方向分布影响参数的直立堤越浪量计算公式; 俞聿修<sup>[9]</sup>和范红霞<sup>[10]</sup>等在越浪量研究中也做了大量工作。

我国现行 JTS 145—2015《港口航道与水文规范》<sup>[11]</sup>给出了斜坡式结构越浪量的经验计算公式, 该公式考虑波高、周期、堤顶在静水面以上的高度、胸墙墙顶在静水面以上的高度、胸墙前肩宽、斜坡坡度、建筑物前水深等因素。但规范并没有给出直立堤的越浪量计算公式, 学者基于物理模型试验结果, 总结出一些直立堤越浪量经验公式。俞聿修和魏德彬<sup>[12]</sup>考虑波浪周期、波高和胸墙墙顶在静水面以上的高度, 研究单向不规则波作用下直立堤越浪量, 并拟合正向入射波浪作用下平均越浪量的计算公式。Franco 等<sup>[13]</sup>也给出不规则波作用下直立堤的越浪量计算公式, 与俞聿修和魏德彬的公式类似, 未考虑相对水深和波陡的影响。

近些年来, 随着机器学习和神经网络的发展, 为越浪量计算问题的解决提供了新的方法。欧洲

研究机构对现有的越浪进行收集、整理, 建立越浪数据库, 通过神经网络模型, 建立探索比经验公式法更加通用的越浪量计算方法<sup>[14-16]</sup>。神经网络是由大量神经元相互连接而成的复杂非线性动力学系统, 具有强大的自适应性、学习能力、容错性和鲁棒性, 因而可有效地处理非线性问题, 在数值预测方面得到了很好的应用, 现已应用于海洋工程领域<sup>[17-19]</sup>。因此, 采用神经网络进行越浪量预测的研究意义重大, 并随着 AI 技术逐渐渗透于每个研究领域, 更具有极大的实用价值和应用前景。

已有的研究多针对单向波正向作用的情况, 而实际波浪为斜向作用, 且为多向不规则波浪, 目前该方面研究仍有很多不足。为完善越浪量研究, 以及为工程建设提供方便、可靠的依据, 本文通过研究传统神经网络, 结合 BP 神经网络在结构、神经元激活函数及学习规则方面研究的新成果, 搭建一个学习性能更好、准确率更高的改进型 BP 神经网络。针对规范中缺失的直立堤越浪量计算问题, 通过物理模型试验数据进行训练, 建立可以预测多向不规则波作用下的直立堤越浪量模型, 并对模型的准确性进行验证。

## 1 数据集建立及处理

数据对神经网络的训练至关重要, 而多向波作用下直立堤越浪量研究成果相对较少, 数据较难收集。本文采用课题组早年完成的试验成果, 即斜向和多向不规则波在直立堤上越浪量的试验结果, 该试验共计 195 组, 分别考虑多种影响越浪量的关键因素, 包括堤前水深  $d$ , 直立堤到静水面高度  $H_c$ , 方向角  $\theta_0$ , 波浪方向分布宽度  $\sigma$ , 有效波高  $H_s$ , 谱峰周期  $T_p$  等因素。试验考虑了较大的方向角, 分别为  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$  和  $45^\circ$ , 较宽方向分布宽度为  $0^\circ$ 、 $13^\circ$  和  $25^\circ$ , 为模型训练提供一定量的数据。试验参数定义见图 1, 该参数以及越浪量无量纲化后取值范围为: 堤前水深  $d/H_s$ :  $3.55 \sim 5.27$ ; 堤顶高度  $H_c/H_s$ :  $0.45 \sim 1.37$ ; 波向角  $\theta_0/2\pi$ :  $0 \sim 0.5$ ; 方向分布宽度  $\sigma/2\pi$ :  $0.0 \sim$

0.278; 谱峰周期  $H_s/(gT_p^2/2\pi)$ : 0.025 ~ 0.064;  
平均越浪量  $Q/\sqrt{gH_s^3}$ : 0.000 1 ~ 0.017 3。

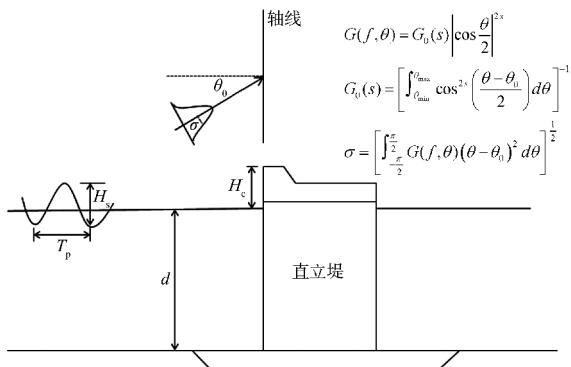


图 1 试验参数定义

## 2 反向传播神经网络搭建

神经网络是一种强大的机器学习模型，其中反向传播(back propagation)神经网络(BP 神经网络)是一种最经典的模型。它通过使用反向传播算法优化模型的权重和偏差，从而实现高效的学习过程。本研究中网络结构分为输入层、隐藏层和

输出层，每层之间采用全链接的形式。考虑到影响越浪量的主要因素有  $d$ 、 $H_c$ 、 $\theta$ 、 $\sigma$ 、 $H_s$ 、 $T_p$  6 个参数，采用无因次形式，最终确定输入层为 5 个参数，见图 2，其中  $L_p$  是由  $T_p$  计算的深水波长。这 5 个参数输入时需做归一化处理。输出层仅为越浪量结果。隐藏层中增加层数和每层神经元个数决定了模型预测精度，增加层数和神经元可以提高模型学习能力，但也会带来过拟合问题，降低模型的泛化能力，应结合训练情况合理确定。研究中通过调整层数和神经元数量，比较损失函数，按照误差最小原则确定隐藏层为 3 层，每层神经元为 10 个。另外，采用 tanh 函数作为激活函数，在神经网络反向传播时，使用 Adam 算法更新神经网络的权重值，设置隐藏层的 Dropout(随机消除)比例为 0.1，随机删除 10% 的网络权重，以抑制训练过程中的过拟合现象。损失函数随训练次数增大的变化见图 3，可知训练次数在 300 次左右时损失函数达到最小值，且损失函数逐渐平稳。

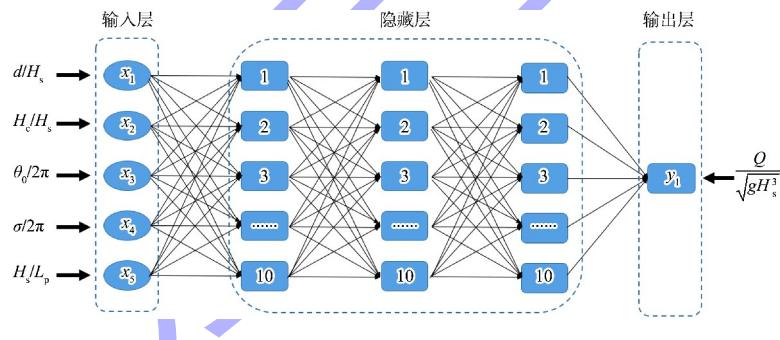


图 2 神经网络结构

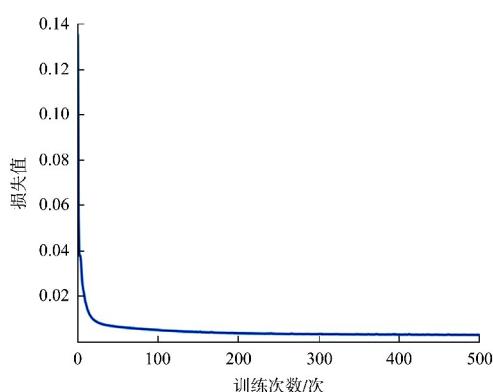


图 3 损失函数变化

## 3 神经网络的预测效果

### 3.1 与测试集对比

为了验证该模型计算越浪量的精度和泛化能力，随机选取 10 组数据不参与训练，作为测试数据，表 1 给出了测试数据预测值和神经网络预测结果。由表可知神经网络预测值与试验值吻合较好，误差大部分在 20% 以内，平均相对误差为 15.5%，说明神经网络对于测试集的预测具有很高的精度。

表1 测试集神经网络预测值与试验值对比

提前 水深/m	堤顶 高度/m	方向分布 宽度/(°)	方向角/ (°)	谱峰 周期/s	波高/ m	平均越浪量/ ( $\times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	预测值/ ( $\times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	误差/ %
0.47	0.11	13	10	1.29	0.117	0.21	0.180	-14.2
0.49	0.08	0	0	1.40	0.123	1.57	1.112	-29.1
0.49	0.10	13	45	1.39	0.123	0.32	0.354	10.5
0.47	0.07	0	10	1.16	0.114	0.50	0.515	3.0
0.47	0.07	25	0	1.33	0.113	0.47	0.556	18.2
0.49	0.08	13	10	1.44	0.122	0.90	0.842	-6.5
0.47	0.07	25	0	1.26	0.114	0.68	0.564	-17.0
0.44	0.12	0	30	1.75	0.122	0.16	0.162	1.5
0.47	0.11	13	30	1.32	0.113	0.09	0.127	41.1
0.47	0.07	25	45	1.56	0.112	0.52	0.447	-14.1

### 3.2 与经验公式的对比

基于前期试验数据给出了相应的越浪量经验计算公式<sup>[20]</sup>:

$$\frac{Q}{\sqrt{gH_s^3}} = A \exp \left( -B \frac{H_c}{H_s} \sqrt{\frac{s_{op}}{2\pi\gamma_\theta\gamma_\sigma}} \right) \quad (1)$$

式中:  $A$  和  $B$  为与谱型有关的经验系数, 分别取 0.04 和 32.8;  $\gamma_\sigma$  为相对单向波的方向分布影响因子,  $\gamma_\theta$  为相对正向波的波向影响因子, 这两个参

数因方向分布宽度和方向角不同而变化, 应用时需查表确定;  $s_{op}$  为深水波陡。该公式形式较为复杂, 不固定参数多, 应用较麻烦。

为比较神经网络预测模型的精度, 图 4 给出了基于训练集的数据, 分别采用 BP 神经网络预测和经验公式计算分别与试验结果对比, 可知神经网络预测结果与试验结果吻合, 经验公式虽然也取得较好的结果, 但离散度明显大于神经网络结果。

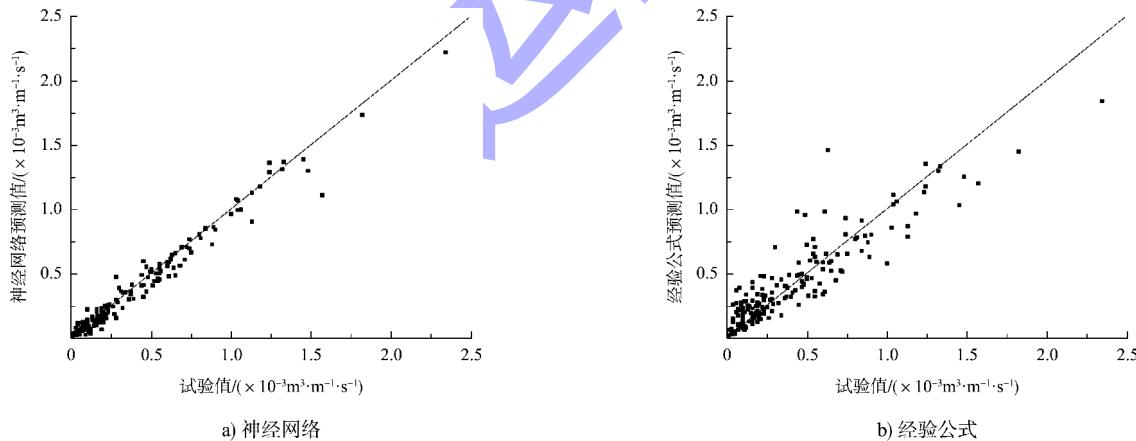


图4 训练集神经网络和经验公式分别与试验值对比

### 3.3 其他试验数据验证

利用收集到的直立堤越浪量试验数据<sup>[21-22]</sup>对神经网络模型的精度进一步验证。具体试验参数和预测结果见表 2, 其中数据 1、2 来自文献[21], 数据 3~6 来自文献[22], 虽然均为二维试验, 但也能反映出研究模型的精度。从结

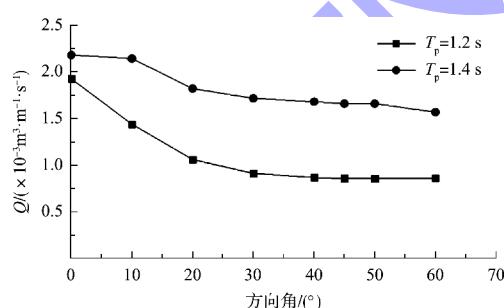
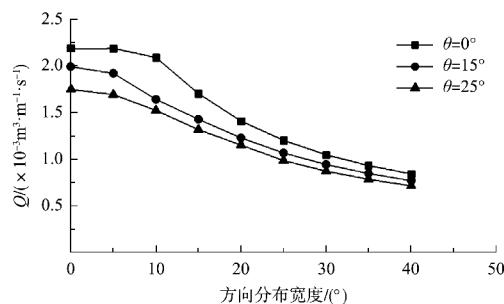
果来看, 个别组次(第 2 组)预测结果偏离试验数据较大, 主要是由于无因次越浪量偏离模型训练范围较大, 预测值与实测值有一定差别。但绝大多数组次误差小于 50%, 平均误差 38.4%, 可满足工程需要, 说明神经网络模型预测效果较好。

表 2 神经网络模型越浪量预测结果

序号	堤前 水深/m	堤顶 高度/m	方向分布 宽度/(°)	方向角/ (°)	谱峰 周期/s	波高/ m	平均越浪量/ ( $\times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	预测值/ ( $\times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	误差/ %
1	1.16	0.18	0	0	2.59	0.27	2.01	2.61	29.9
2	1.08	0.26	0	0	2.59	0.26	0.45	0.89	97.8
3	0.50	0.15	0	0	1.60	0.12	0.19	0.28	47.4
4	0.50	0.15	0	0	1.40	0.11	0.13	0.16	23.1
5	0.52	0.08	0	0	2.12	0.17	2.25	2.33	3.7
6	0.52	0.08	0	0	2.12	0.15	1.35	1.74	28.5

#### 4 方向角和方向分布宽度对平均越浪量的影响

受工作量的限制,物理模型试验不能详细研究每个参数对越浪量的影响规律,基于建立的神经网络模型良好的泛化能力,可分析不同参数对直立堤越浪量的影响。在赵凤亚试验研究基础上,对波向角和方向分布宽度做进一步详细分析。方向角度扩展到60°,方向分布宽度扩展到40°。图5、6分别给出了堤前水深0.49 m,堤顶到水面高度0.06 m,波高0.12 m时,越浪量与 $\theta_0$ 、 $\sigma$ 的关系。可知越浪量随 $\theta_0$ 增加而减小,大于30°后,变化趋缓,不同波浪周期具有类似规律。同样,方向分布宽度增大,较大方向角成分增大,越浪量也随着减小,特别是分布宽度大于10°,越浪量迅速减小。图中的变化规律较赵凤亚试验结果更明确。

图 5 越浪量与  $\theta_0$  关系图 6 越浪量与  $\sigma$  关系

#### 5 结论

1) 基于BP神经网络搭建了越浪量模型,考虑6个影响波浪越浪的参数,包括:堤前水深 $d$ 、堤顶高度 $H_c$ 、有效波高 $H_s$ 、谱峰周期 $T_p$ 、波向角 $\theta$ 和波浪分布宽度 $\sigma$ 。隐藏层为3层,每层神经元为10个。采用tanh函数作为激活函数,选用Adam反向传播算法。

2) 建立多向波作用下直立堤越浪量数据集,将试验数据进行无量纲化处理,为神经网络的训练和测试提供了数据的支持。

3) 采用测试集、经验公式及其他试验结果对模型预测能力进行验证分析,发现搭建的预测越浪量的神经网络模型的精度较好、泛化能力较强,预测结果能够满足工程需要。

4) 基于建立的预测模型对方向角和方向分布宽度对越浪量影响进行分析,得出越浪量随方向角度增大而减小,方向角度大于30°后,越浪量变化趋缓;方向分布宽度增大,越浪量也随之减小,方向分布宽度大于10°,越浪量减小明显。

#### 参考文献:

- [1] 王聪,陈国平,严士常,等.不规则波作用下斜坡堤越浪量试验研究[J].水运工程,2017(2): 49-52.
- [2] 黄宁,孙大鹏,吴浩,等.模拟斜坡堤上越浪量一种新的数值模式[J].水道港口,2014,35(6): 567-572.
- [3] SAVILLE T. Laboratory data on wave runup and overtopping [R]. Washington D C: Lake Okeechobee Levee sections. US Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 1955.
- [4] OWEN M W. Overtopping of sea defence[C]//Proceeding

- of Int. Conference on Hydraulic Modelling of Civil Engineering, BHRA Structures. Conventry: 1982: 469-480.
- [5] BRUCE T, VAN DER MEER J W, FRANCO L, et al. Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters [J]. Coastal engineering, 2009, 56(2): 166-179.
- [6] VAN DER MEER J, BRUCE T. New physical insights and design formulas on wave overtopping at sloping and vertical structures [J]. Journal of waterway, port, coastal & ocean engineering, 2014, 140(6): 04014025.
- [7] 王红, 周家宝, 章家昌. 单坡堤上不规则波越浪量的估算 [J]. 水利水运科学研究, 1996(1): 58-63.
- [8] 赵凤亚. 直立堤上斜向和多向不规则波的越浪量研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [9] 俞聿修. 斜坡堤上平均越浪量计算方法的比较 [J]. 港工技术, 2011, 48(1): 1-4.
- [10] 范红霞. 斜坡式海堤越浪量及越浪流试验研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [11] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [12] 俞聿修, 魏德彬. 不规则波越浪量的试验研究 [J]. 海岸工程, 1992, 11(1): 1-12.
- [13] FRANCO C, FRANCO L. Overtopping formulas for caisson breaking with nonbreaking 3D wave [J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 1999, 125(2): 98-108.
- [14] VAN DER MEER J W. Technical Report of Wave Run-up and Wave Overtopping at Dikes [R]. Delft: Technical Advisory Committee on Flood Defense, 2002.
- [15] FORMENTIN S M, ZANUTTIGH B, VAN DER MEER J W. Update of the Eurotop Neural Network Tool: improved prediction of wave overtopping [C]//35th International conference on coastal engineering, Antalya: [s. n.], 2017.
- [16] FORMENTIN S M, ZANUTTIGH B, VAN DER MEER J W, et al. The new EurOtop Neural Network tool for an improved prediction of wave overtopping [C]//ICE. Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2017. Liverpool: [s. n.], 2018.
- [17] ZANUTTIGH B, FORMENTIN S M, BRIGANTI R. A neural network for the prediction of wave reflection from coastal and harbor structures [J]. Coastal engineering, 2013, 80(10): 49-67.
- [18] 霍俊波, 拾兵, 刘文沛, 等. 基于 RBF 神经网络的桥墩局部冲刷深度预测模型 [J]. 中国水运 (下半月), 2017, 17(7): 101-103.
- [19] 黄建, 董丽红. 海堤越浪量的人工神经网络模型算法 [J]. 水道港口, 2020, 41(4): 489-494.
- [20] 赵凤亚, 俞聿修, 李晓亮, 等. 直立堤上斜向和多向不规则波越浪量研究 [C]// 中国海洋工程学会. 第十二届中国海岸工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2005: 457-462.
- [21] 交通运输部天津水运工程科学研究所, 海南洋浦区域国际集装箱枢纽港扩建工程(一阶段)波浪断面模型试验报告 [R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2023.
- [22] 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 海南省环岛旅游公路珊瑚岛停车区防浪堤波浪试验 [R]. 大连: 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 2021.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 15 页)

- [16] MONAGHAN J J, CAS R A, KOS A, et al. Gravity currents descending a ramp in a stratified tank [J]. Journal of fluid mechanics, 1999, 379: 39-69.
- [17] RUFFINI G, BRIGANTI R, DE GIROLAMO P, et al. Numerical modelling of flow-debris interaction during extreme hydrodynamic events with DualSPHysics-CHRONO [J]. Applied sciences, 2021, 11(8): 3618.
- [18] VERBRUGGHE T, STRATIGAKI V, ALTOMARE C, et al. Implementation of open boundaries within a two-way coupled SPH model to simulate nonlinear wave-structure interactions [J]. Energies, 2019, 12(4): 1-23.
- [19] OMIDVAR P, NOROUZI H, ZARGHAMI A. Smoothed particle hydrodynamics for water wave propagation in a channel [J]. International journal of modern physics(C), 2015, 26(8): 1550085.

(本文编辑 王传瑜)