



# 台阶式防波堤的消浪性能研究\*

刘春燕, 李雪艳, 曲恒良

(鲁东大学 水利土木学院, 山东 烟台 264025)

**摘要:** 为进一步提高透空式防波堤的消浪性能, 基于板式防波堤提出一种台阶式防波堤结构, 并探究其在规则波中的消浪性能。通过 Fluent 软件构建二维数值模型, 分析不同下挡板长度、潜深及波高对台阶式防波堤透射系数、反射系数和能耗系数的影响, 同时对该结构周围的流场变化进行分析。结果表明, 台阶式防波堤透射系数随相对下挡板长度、相对波高及相对潜深的增大而减小; 反射系数随相对下挡板长度的增大而增大, 随相对波高及相对潜深的增大而减小; 能耗系数随相对下挡板长度、相对波高及相对潜深的增大而增大。

**关键词:** 消浪性能; 台阶式防波堤; Fluent; 数值模型

中图分类号: U656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0036-07

## Wave dissipation performance of stepped breakwater

LIU Chunyan, LI Xueyan, QU Hengliang

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China)

**Abstract:** To further improve the wave dissipation performance of permeable breakwater, this paper proposes a stepped breakwater structure based on the plate breakwater, and explores its wave dissipation performance in regular waves. A two-dimensional numerical model is constructed by Fluent software to analyze the effects of different lower baffle lengths, diving depths and wave heights on the transmission coefficient, reflection coefficient and energy consumption coefficient of the stepped breakwater, and the changes of the flow field around the structure are analyzed. The research results show that the transmission coefficient of the stepped breakwater decreases with the increase of the relative lower baffle length, relative wave height and relative diving depth. The reflection coefficient increases with the increase of the length of the relative lower baffle, and decreases with the increase of the relative wave height and relative depth. The energy consumption coefficient increases with the increase of relative lower baffle length, relative wave height and relative diving depth.

**Keywords:** wave dissipation performance; stepped breakwater; Fluent; numerical model

港口、码头等作为海运经济的重要枢纽, 需要有相应的构筑物来保障其安全与稳定。传统的重力式防波堤存在建造难度大、阻碍水体交换等不足。透空式防波堤具有制造成本低、修筑快捷、对地质条件要求低且能够保证海水正常交换等优点, 因而具有良好的应用前景。

板式防波堤是透空式防波堤的主要形式之一。在板式防波堤的研究方面, Stoker<sup>[1]</sup>率先从理论方面对固定浮板在长波条件作用下的透反射系数展开研究。此后, 部分学者分别采用理论分析<sup>[2]</sup>、模型试验<sup>[3-4]</sup>以及数值模拟<sup>[5-6]</sup>等方法对板式防波堤进行深入研究。邱大洪等<sup>[7]</sup>于 1986 年提出薄板

收稿日期: 2024-10-14

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(52401328); 山东省自然科学基金项目(ZR2022ME145, ZR2023QE075)

作者简介: 刘春燕(1999—), 女, 硕士研究生, 从事波浪与海洋结构物相互作用研究。

通信作者: 曲恒良(1991—), 男, 博士, 副教授, 从事海洋可再生能源研究。E-mail: quhengliang@ldu.edu.cn

式防波堤模型,并针对单层板式防波堤开展理论分析;基于单平板模型,唐琰林等<sup>[8]</sup>提出了双平板防波堤结构;张恩铭<sup>[9]</sup>采用物模试验与工程分析的方法,对由桩基固定的防波堤加装单侧挡浪板进行研究,发现增加挡浪板的潜深能够有效提高防波堤的消浪效果,透射系数为 0.38~0.45,且在近岸水深相对较小时,挡浪板的潜深是影响透射系数的关键因素;刘宏霄等<sup>[10]</sup>探究了几何尺寸对 T 形防波堤水动力性能的影响,在淹没状态下,结构的相对宽度及波陡对反射系数和透射系数影响显著,透射系数为 0.30~0.75,增加 T 形结构中水平板的长度及潜深均能有效提升防波堤的消浪性能。

通过前人的研究可以发现,防波堤结构形式的改变对消浪性能有显著影响。基于此,本文提出一种台阶式防波堤,并对该模型在不同下挡板长度、潜深以及波高条件下的消浪性能展开研究。

## 1 数值模型建立与验证

### 1.1 数值模型建立

本文借助 Fluent 软件进行数值模拟,利用该软件内置的用户自定义功能(user defined functions, UDF),实现数值水槽的速度造波及阻尼消波,进而构建波浪与台阶式防波堤的耦合数值模型。本文所采用的连续方程及动量方程见式(1)~(3)。

连续方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \mu(x) u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial z} = g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \mu(x) v \quad (3)$$

式中:  $u$ 、 $v$  分别为  $x$ 、 $z$  方向的速度分量;  $p$ 、 $\rho$ 、 $\nu$  分别为流体的压强、密度、黏性系数;  $g_z$  为垂

直方向的重力加速度,取值为  $9.81 \text{ m/s}^2$ ;  $\mu(x)$  为消波系数。

数值水槽上端  $AC$  属于大气边界,在该边界处采用流体体积(volume of fluid,VOF)方法追踪流体自由表面位置;水槽左端  $AB$  为造波边界,借助速度造波的方式产生稳定的二阶 Stokes 波;水槽右端  $CD$  为消波边界,在水槽尾端设置长度为 2 倍波长的区域进行阻尼消波,避免波浪反射;水槽底部  $BD$  为光滑壁面,法向速度为 0。边界条件见图 1。

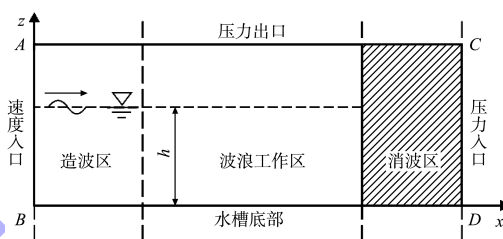


图 1 边界条件

Fig. 1 Boundary conditions

台阶式防波堤消浪性能的研究主要在二维数值水槽中开展,见图 2。在水槽内部布置 3 根浪高仪,其中浪高仪 1# 和 2# 布置在结构物迎浪向,用于监测入射波高;浪高仪 3# 布置在结构物背浪向,用于监测透射波高。结构模型见图 3,试验工况见表 1。

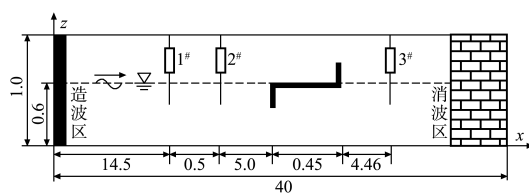
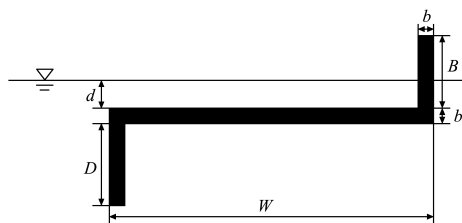


图 2 台阶式防波堤模型布置 (单位: m)

Fig. 2 Layout of stepped breakwater model (unit: m)



注:  $b$  为板厚;  $W$  为板宽;  $B$  为上挡板长度;  $D$  为下挡板长度;  $d$  为潜深,以平板上表面作为参考线,参考线在水面下时  $d$  为正,在水面上时  $d$  为负。

图 3 台阶式防波堤结构

Fig. 3 Structure of stepped breakwater

表 1 试验工况设计

Tab. 1 Design of test conditions

| 水深 $h/\text{m}$ | 周期 $T/\text{s}$         | 波高 $H/\text{m}$        | $d/\text{m}$   | $D/\text{m}$ | $B/\text{m}$ | $W/\text{m}$ | $b/\text{m}$ |
|-----------------|-------------------------|------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.6             | 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 | 0.06, 0.08, 0.10, 0.12 | -0.03, 0, 0.03 | 0.24         | 0.1          | 0.45         | 0.02         |

在兼顾数值计算效率与计算精度的要求下,对静水面附近及结构物上下一定区域进行网格加密处理。整个计算区域运用结构化网格,共划分为 16 块。块 1、6、7、10、11、16 为非加密区网格,网格尺寸为长  $x=0.02\text{ m}$ 、宽  $y=0.02\text{ m}$ ;其余部分则为加密区网格,网格尺寸为长  $x=0.01\text{ m}$ 、宽  $y=0.02\text{ m}$ ,见图 4。

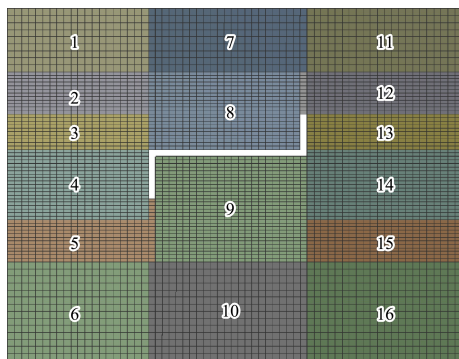


图 4 防波堤网格划分

Fig. 4 Breakwater meshing

## 1.2 数值模型验证

为验证水槽的造波与消波能力,构建一个长 40 m、高 1 m 的空水槽模型。对  $h=0.6\text{ m}$ 、 $T=2.0\text{ s}$ 、 $H=0.08\text{ m}$  的规则波进行计算,如图 5 所示,通过监测波面高程  $\eta$  历时曲线并对比  $x=20.0\text{ m}$  处数值解与理论解,发现两者高度吻合,证明空水槽模型能产生持续稳定的规则波。在消波中间段( $x=37.0\text{ m}$ )及消波末端( $x=39.9\text{ m}$ )设置 2 个监测点,结果显示波浪传至消波中间段时波高降低、波能衰减耗散,传至消波末端时波能几乎完全被吸收,表明构建的数值波浪水槽具有良好的消波性能。

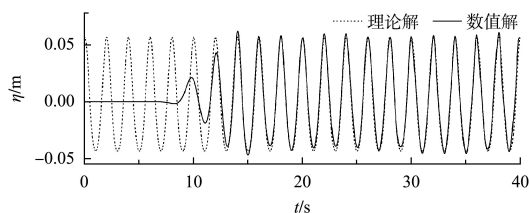
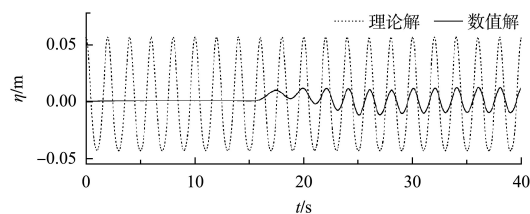
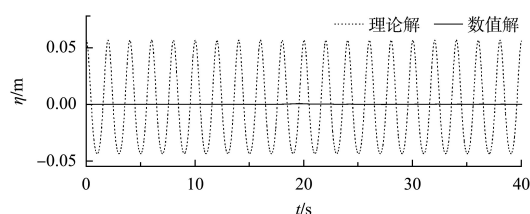
a)  $x=20.0\text{ m}$ b)  $x=37.0\text{ m}$ c)  $x=39.9\text{ m}$ 

图 5 计算域波面历时曲线数值解与理论解比较

Fig. 5 Comparison between numerical and theoretical solutions of waveplane diachronic curve in computational domain

为排除网格疏密程度对计算的影响,对不同疏密程度的网格进行验证,见表 2。

表 2 不同疏密程度网格参数

Tab. 2 Mesh parameters with different density levels

| 网格疏密程度 | 波高网格数 $N_H/\text{个}$ | 波长网格数 $N_L/\text{个}$ | 计算域中的网格数 $N/\text{个}$ |
|--------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 稀疏     | 6                    | 82                   | 33 000                |
| 常规     | 12                   | 164                  | 128 000               |
| 加密     | 24                   | 328                  | 512 000               |

$h=0.6\text{ m}$ 、 $H=0.12\text{ m}$ 、 $T=1.6\text{ s}$  时不同网格尺度下波面历时曲线对比情况见图 6。能够看出,加密、常规网格的波面历时曲线较接近,稀疏网格密度低于两者,波面历时曲线有差异。因此,在确保计算效率的前提下,采用常规网格便能够满足精度要求。

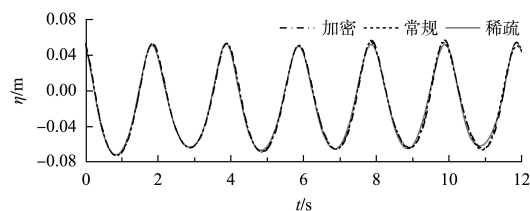


图 6 网格独立性验证对比

Fig. 6 Comparison of mesh independence verification

为验证水槽放入结构物后数值计算的准确性,本文参照张俊斌<sup>[11]</sup>物模试验中单平板模型开展模拟验证。由图7可知,当相对板宽  $W/L=0.21$  时,物模试验与数值模拟的误差最大,为4.59%。因此,本文计算的数值模拟结果与物模试验结果相比,透射系数  $K_t$  吻合较好。数值模型的精度能够满足后续研究要求。

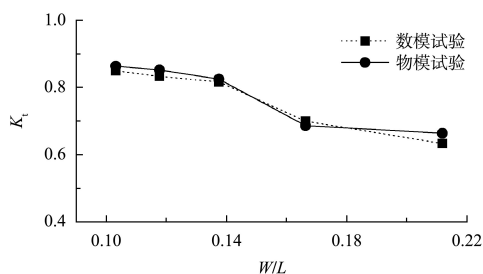


图7 数模试验与物模试验  $K_t$  验证对比

Fig. 7 Comparison of  $K_t$  verification between digital-analog test and physical model-based test

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 相对下挡板长度对消浪性能的影响

$H=0.10$  m、 $D$  取值范围为  $0\sim 0.30$  m(依次间隔  $0.03$  m)时,台阶式防波堤消浪性能的变化趋势见图8。

由图8a)可知,当  $D/h=0$ 、 $0.05$ 、 $0.10$  时,  $K_t < 0.6$  的工况占比为  $6.7\%$ ;当  $D/h=0.15$ 、 $0.20$ 、 $0.25$  时,该占比为  $20\%$ ;当  $D/h=0.30$ 、 $0.35$ 、 $0.40$  时,该占比为  $33.3\%$ ;当  $D/h=0.45$ 、 $0.50$  时,该占比为  $60\%$ ,这表明,  $D/h$  越大,台阶式防波堤的消浪性能越好。

由图8b)可知,当  $D/h=0$ 、 $0.05$ 、 $0.10$  时,反射系数  $K_r > 0.5$  的工况占比为  $20\%$ ;当  $D/h=0.15$ 、 $0.20$ 、 $0.25$  时,该占比为  $20\%$ ;当  $D/h=0.30$ 、 $0.35$ 、 $0.40$  时,占比为  $33.3\%$ ;当  $D/h=0.45$ 、 $0.50$  时,占比为  $40\%$ ,这表明,  $D/h$  越大,台阶式防波堤的反射性能越好。

由图8c)可知,在不同相对板宽情况下,当  $W/L=0.21$  时,能耗系数  $K_d$  较大;而在其他相对板宽情况下,台阶式防波堤  $K_d$  差值较小,均随  $D/h$  的增大而增大。

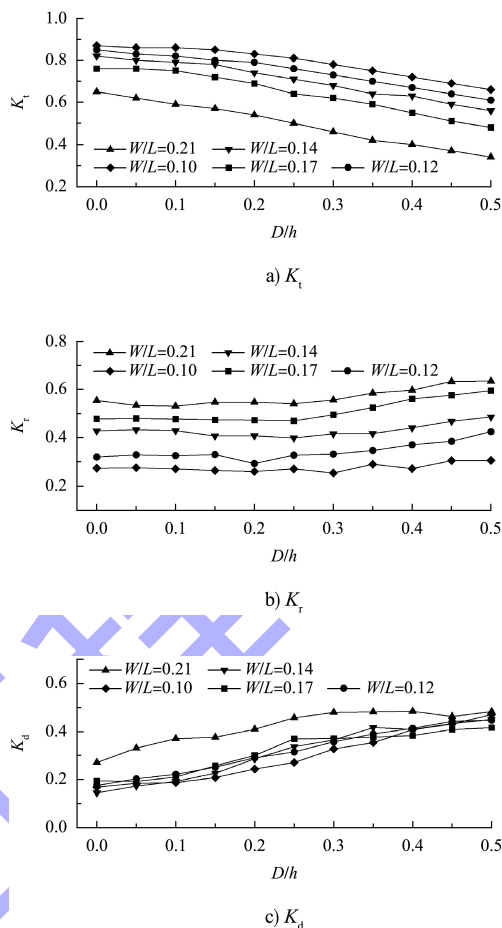


图8 台阶式防波堤消浪性能随  $D/h$  的变化趋势

Fig. 8 Variation trend of wave dissipation performance of stepped breakwater with  $D/h$

### 2.2 相对潜深对消浪性能的影响

$H=0.10$  m、 $D=0.24$  m 时,台阶式防波堤消浪性能随相对潜深  $d/h$  的变化趋势见图9。

由图9a)可知,当  $d/h=-0.05$  时,  $K_t$  平均值为  $0.614$ ;当  $d/h=0$  时,  $K_t$  平均值下降至  $0.594$ ;而当  $d/h=0.05$  时,  $K_t$  平均值变为  $0.548$ 。这表明,  $d/h$  越大,台阶式防波堤的消浪性能越好。

由图9b)可知,当  $d/h=-0.05$  时,  $K_r$  平均值为  $0.48$ ;当  $d/h=0$  时,  $K_r$  平均值下降至  $0.448$ ;当  $d/h=0.05$  时,  $K_r$  平均值变为  $0.406$ 。这表明,  $d/h$  越小,台阶式防波堤的反射性能越好。

由图9c)可知,当  $d/h=-0.05$  时,  $K_d$  平均值为  $0.365$ ;当  $d/h=0$  时,  $K_d$  平均值上升至  $0.419$ ;当  $d/h=0.05$  时,  $K_d$  平均值达到  $0.508$ 。这表明,  $d/h$  越大,台阶式防波堤的耗能越多。

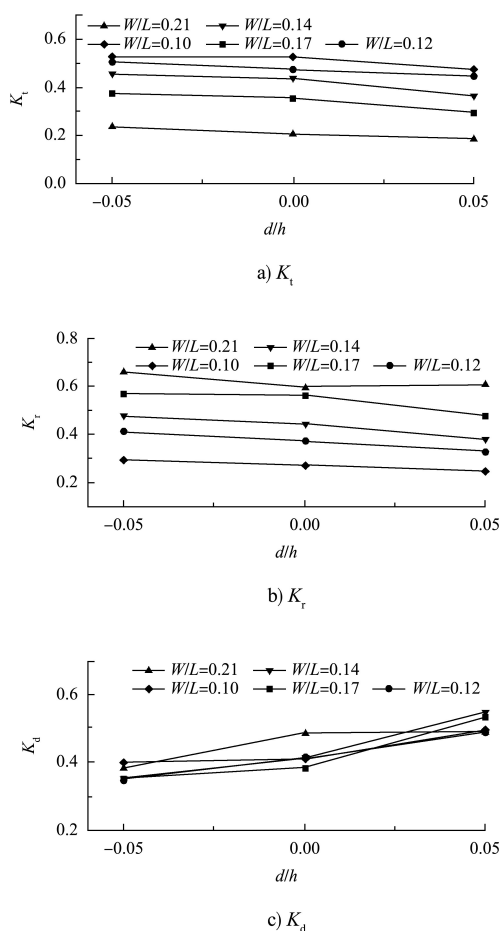


图9 台阶式防波堤消浪性能随  $d/h$  的变化趋势  
Fig. 9 Variation trend of wave dissipation performance of stepped breakwater with  $d/h$

### 2.3 相对波高对消浪性能的影响

$d=0$  m、 $D=0.24$  m 时, 台阶式防波堤消浪性能随相对波高  $H/h$  的变化趋势见图 10。

由图 10a) 可知, 当  $H/h=0.10$  时,  $K_t$  平均值为 0.657;  $H/h=0.13$  时,  $K_t$  平均值降至 0.623;  $H/h=0.17$  时,  $K_t$  平均值进一步降至 0.594;  $H/h=0.20$  时,  $K_t$  平均值变为 0.567。这表明,  $H/h$  越大, 台阶式防波堤的消浪性能越好。

由图 10b) 可知, 当  $H/h=0.10$  时,  $K_r$  平均值为 0.530;  $H/h=0.13$  时,  $K_r$  平均值降至 0.485;  $H/h=0.17$  时,  $K_r$  平均值进一步降至 0.448;  $H/h=0.20$  时,  $K_r$  平均值变为 0.425。这表明,  $H/h$  越小, 台阶式防波堤的反射性能越好。

由图 10c) 可知, 台阶式防波堤的  $K_d$  随相对波高的增大而增大。当  $H/h=0.10$  时,  $K_d$  平均值为 0.260;  $H/h=0.13$  时,  $K_d$  平均值升至 0.350;

$H/h=0.17$  时,  $K_d$  平均值上升至 0.419;  $H/h=0.20$  时,  $K_d$  平均值达到 0.473。这表明,  $H/h$  越大, 台阶式防波堤的能耗越多。

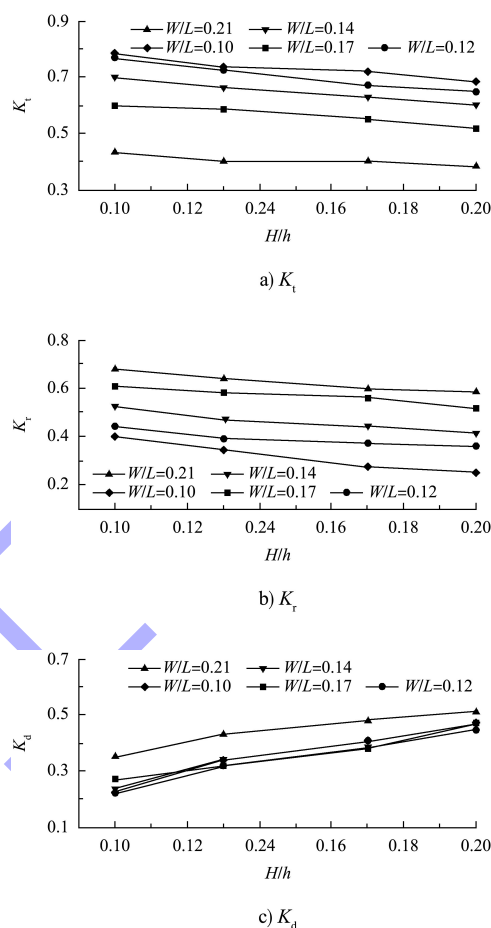
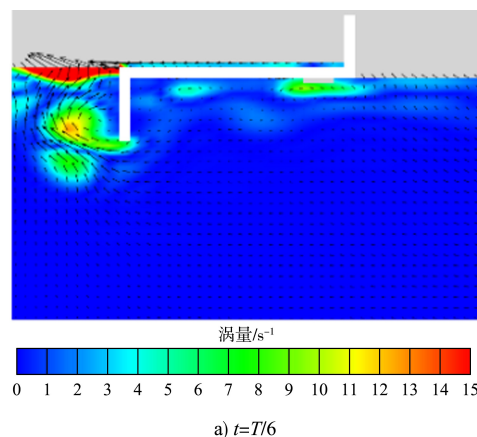


图10 台阶式防波堤消浪性能随  $H/h$  的变化趋势  
Fig. 10 Variation trend of wave dissipation performance of stepped breakwater with  $H/h$

### 2.4 流场影响因素分析

$H=0.06$  m、 $T=2.0$  s、 $D=0.12$  m 时, 一个周期内台阶式防波堤周围流场的变化见图 11。



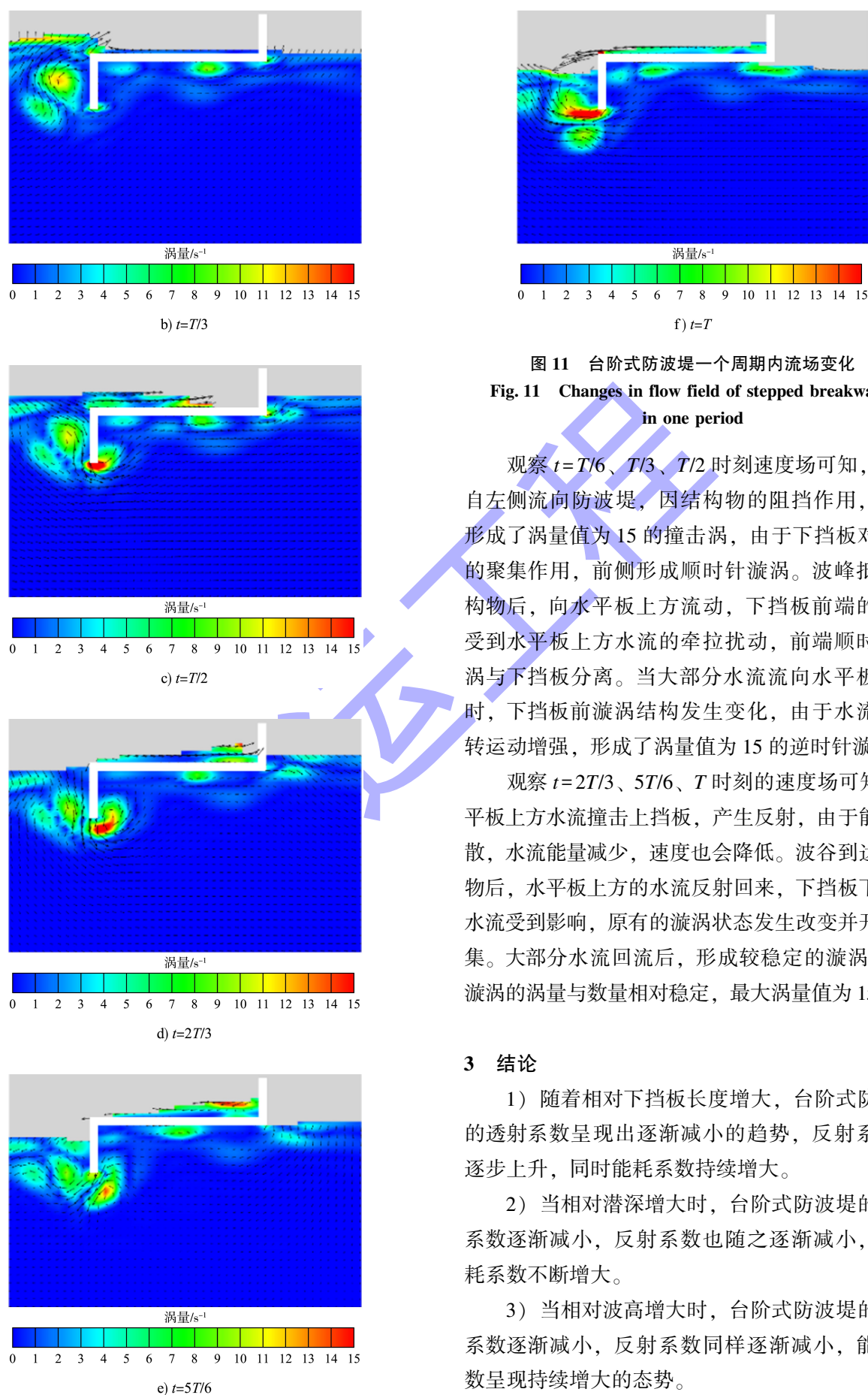


图 11 台阶式防波堤一个周期内流场变化

Fig. 11 Changes in flow field of stepped breakwater in one period

观察  $t=T/6$ 、 $T/3$ 、 $T/2$  时刻速度场可知, 水流自左侧流向防波堤, 因结构物的阻挡作用, 前端形成了涡量为 15 的撞击涡, 由于下挡板对水流的聚集作用, 前侧形成顺时针漩涡。波峰抵达结构物后, 向水平板上方流动, 下挡板前端的水流受到水平板上方水流的牵拉扰动, 前端顺时针漩涡与下挡板分离。当大部分水流流向水平板上方时, 下挡板前漩涡结构发生变化, 由于水流的旋转运动增强, 形成了涡量为 15 的逆时针漩涡。

观察  $t=2T/3$ 、 $5T/6$ 、 $T$  时刻的速度场可知, 水平板上方水流撞击上挡板, 产生反射, 由于能量耗散, 水流能量减少, 速度也会降低。波谷到达结构物后, 水平板上方的水流反射回来, 下挡板下端的水流受到影响, 原有的漩涡状态发生改变并开始聚集。大部分水流回流后, 形成较稳定的漩涡结构, 漩涡的涡量与数量相对稳定, 最大涡量为 15。

### 3 结论

1) 随着相对下挡板长度增大, 台阶式防波堤的透射系数呈现出逐渐减小的趋势, 反射系数则逐步上升, 同时能耗系数持续增大。

2) 当相对潜深增大时, 台阶式防波堤的透射系数逐渐减小, 反射系数也随之逐渐减小, 而能耗系数不断增大。

3) 当相对波高增大时, 台阶式防波堤的透射系数逐渐减小, 反射系数同样逐渐减小, 能耗系数呈现持续增大的态势。

4) 台阶式防波堤的消浪性能受下挡板对水流的阻挡作用、水流与上挡板的撞击和反射作用、水平板上方水流牵拉作用的共同影响。

#### 参考文献:

- [1] STOKER J J. Water waves: the mathematical theory with applications[M]. New York: Interscience Publishers, 1957.
- [2] PATARAPANICH M. Maximum and zero reflection from submerged plate[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 1984, 110(2): 171-181.
- [3] WANG Y X, WANG G Y, LI G W. Experimental study on the performance of the multiple-layer breakwater[J]. Ocean engineering, 2006, 33(13): 1829-1839.
- [4] NEELAMANI S, GAYATHRI T. Wave interaction with twin plate wave barrier[J]. Ocean engineering, 2006, 33(3/4): 495-516.
- [5] 王科, 许旺. 平板及立板型式防波堤透射及反射系数研究[J]. 船舶力学, 2010, 14(5): 487-494.  
WANG K, XU W. Transmissivity and reflectivity for breakwater of horizontal or vertical plate type[J]. Journal of ship mechanics, 2010, 14(5): 487-494.
- [6] 王科, 许旺, 张志强. 近自由水面水平板式防波堤消波特性及消波机理研究[J]. 船舶力学, 2010, 14(4): 362-371.  
WANG K, XU W, ZHANG Z Q. Study on submerged plate type breakwater very close to free surface[J]. Journal of ship mechanics, 2010, 14(4): 362-371.
- [7] 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 D H, WANG X G. Theoretical analysis of deep-water thin-plate breakwater[J]. Port & waterway engineering, 1986(4): 8-12.
- [8] 唐琰林, 张宁川, 刘爱珍. 双层水平板型透空式防波堤消波性能试验研究[J]. 水道港口, 2006, 27(5): 284-288.  
TANG Y L, ZHANG N C, LIU A Z. Test on wave-dissipating performance of twin-plate penetrating breakwater[J]. Journal of waterway and harbor, 2006, 27(5): 284-288.
- [9] 张恩铭. 桩基透空堤的实际应用研究[J]. 建筑与预算, 2021(1): 98-100.  
ZHANG E M. Study on practical application of pile foundation permeable dike[J]. Construction and budget, 2021(1): 98-100.
- [10] 刘宏霄, 董国海, 许条建. T型开孔防波堤消波性能研究[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(4): 181-185, 190.  
LIU H X, DONG G H, XU T J. Study on wave dissipation performance of T-shaped perforated breakwater[J]. China water transport (the second half of the month), 2017, 17(4): 181-185, 190.
- [11] 李雪艳, 王庆, 朱小松, 等. 不同板式透空堤消浪性能的数值研究[J]. 船舶力学, 2019, 23(10): 1198-1209.  
LI X Y, WANG Q, ZHU X S, et al. Numerical study on the wave attenuation performance of the different plate type open breakwaters[J]. Journal of ship mechanics, 2019, 23(10): 1198-1209.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 35 页)

- [8] 戚彦福, 蔺鹏臻, 李岩, 等. 考虑静荷载与环境耦合作用的钢结构涂层劣化实验研究[J]. 材料导报, 2024, 38(18): 165-174.  
QI Y F, LIN P Z, LI Y, et al. Experimental study of steel structure coating deterioration considering coupling effect of static load and environment[J]. Materials reports, 2024, 38(18): 165-174.
- [9] 杨海成, 唐云, 李超, 等. 海工混凝土干湿交替区域的氯离子侵蚀研究进展[J]. 水运工程, 2010(10): 26-31.  
YANG H C, TANG Y, LI C, et al. Research progress on invasion of chloride iron of marine concrete structures under alteration of wetting and drying[J]. Port & waterway engineering, 2010(10): 26-31.
- [10] 王胜年, 苏权科, 范志宏, 等. 港珠澳大桥混凝土结构耐久性设计原则与方法[J]. 土木工程学报, 2014, 47(6): 1-8.  
WANG S N, SU Q K, FAN Z H, et al. Durability design principle and method for concrete structures in Hong Kong-Zhuhai-Macau sea link project[J]. China civil engineering journal, 2014, 47(6): 1-8.
- [11] AMEY S L, JOHNSON D A, MILTENBERGER M A, et al. Predicting the service life of concrete marine structures: an environmental methodology[J]. ACI structural journal, 1998, 95(2): 205-214.

(本文编辑 赵娟)