

· 综合 ·



# 中长周期波浪作用下双层水平板防波堤 水动力特性数值研究\*

薛寒来, 郭子坚

(大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 双层水平板防波堤是一种新型透空式防波堤, 由于波浪能主要集中在水体表面, 可据此设计防波堤结构形式, 以实现消浪功能。基于 FLUENT 平台, 采用数值模拟方法, 对5种不同入射周期波浪的作用结果进行横向对比, 研究双层水平板结构消浪特性及波压力分布。结果表明, 实验范围内该结构消浪效果良好, 并得到其消浪性能随相对板宽的变化规律; 通过研究各代表时刻下结构表面波压力分布情况, 得到其与相对板宽间的联系; 通过研究结构周围流场形态, 分析结构消浪机理。

**关键词:** 中长周期波; 双层水平板防波堤; 数值模拟; 水动力响应特性

中图分类号: U652.3; TV139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)05-0013-10

## Numerical study on hydrodynamic characteristics of horizontal twin-plate breakwater under medium-long period waves

XUE Hanlai, GUO Zijian

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The horizontal twin-plate breakwater is an advanced permeable structure. Since the wave energy is mainly concentrated on the surface of water body, the breakwater structure can be designed accordingly to realize the function of wave reduction. Based on FLUENT platform, the numerical simulation method is used to compare the action results of five kinds of wave with different incident period, and the wave reduction characteristics and wave pressure distribution of horizontal twin-plate structure are studied. The results demonstrate the structure's effective wave reduction within the tested range, revealing the relationship between the structure's wave reduction efficiency and the relative plate width. Additionally, the wave pressure distribution on the structure's surface at representative time points is analyzed, establishing a connection with the relative plate width. The study of the flow field morphology around the structure provides insights into the wave reduction mechanisms at play.

**Keywords:** medium-long period wave; horizontal twin-plate breakwater; numerical simulation; hydrodynamic response characteristics

不同于国内设计波浪周期通常处于8~10 s之间, 海上丝绸之路沿线国家涌浪海区的设计波浪周期多在14~18 s, 两者差异明显<sup>[1]</sup>。中长周期波通常具有波速较快、波高不大、波长较长等特点,

具有较强的穿透性。与传统防波堤相比, 双层水平板透空式防波堤有以下优点<sup>[2-3]</sup>: 水深适应性强, 深水水域成本较低, 环境影响小, 对地基承载力要求低。因此, 研究中长周期波浪作用下双

收稿日期: 2024-06-26

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600200)

作者简介: 薛寒来(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为面向海洋能源与空间开发的双层板结构水动力设计。

通信作者: 郭子坚(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智慧港口关键技术、港口空间规划理论等。

E-mail: zjguo@dlut.edu.cn

层水平板的水动力特性具有重要意义。

在中长周期波浪领域,国内外学者已在港口工程设计、系泊条件、波高分布以及多层水平板的消浪性能等方面进行了深入研究<sup>[4-6]</sup>。透空式防波堤结构,特别是双层水平板的透射/反射系数、水动力响应和消浪性能、以及不同类型水平板的波浪衍射问题<sup>[7-12]</sup>,也受到了广泛关注和研究。

本文基于黏性流体理论,使用流体分析软件 FLUENT,运用流体体积(volume of fluid,VOF)方法,结合重整化群理论(re-normalization group,RNG)  $k-\varepsilon$  模型,对 Navier-Stokes 方程进行求解,研究数值造波和消波技术,建立具备造波和消波功能的二维数值波浪水槽,并以此方法研究中长周期波作用下双层水平板的水动力响应特性,给出不同波浪周期对双层水平板结构消浪性能以及水动力响应特性的影响。

## 1 数值模拟基本原理

本文采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型作为封闭求解模型的控制方程。湍动能的  $k$  方程和湍流耗散率的  $\varepsilon$  方程分别为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\omega - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_p + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中:  $G_k$ 、 $G_b$  为湍动能;  $Y_M$  为可压缩湍流中脉动膨胀对总耗散率的影响;  $\mu_t$  为湍流黏性系数;  $C_1$ 、 $C_2$  均为经验常数,  $C_2=1.9$ ;  $t$  为时间;  $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.2$  分别为  $k$  方程、 $\varepsilon$  方程的普朗特数;  $\bar{\Omega}_{i,j}$  为角速度  $\omega_k$  参考系下的时均转动速率张量;  $U^*$  为无旋流场;  $S_k$  为湍动能项,  $S_\varepsilon$  为湍流耗散源项。

基本控制方程采用质量守恒方程、动量守恒方程及雷诺平均方程<sup>[13-14]</sup>。

### 1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $u$ 、 $v$  和  $w$  分别为速度矢量  $\mathbf{u}$  在直角坐标系下  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量,  $\text{m/s}$ 。

### 2) 动量守恒方程:

$$\begin{cases} F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) = \frac{du_x}{dt} \\ F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) = \frac{du_y}{dt} \\ F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) = \frac{du_z}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  分别为流体的单位质量力在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量,  $\text{m/s}^2$ ;  $p$  是流体微元体上的压强,  $\text{Pa}$ ;  $\nu$  为运动黏度,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $u_x$ 、 $u_y$ 、 $u_z$  分别为流体沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的流速分量,  $\text{m/s}$ 。

### 3) 雷诺时均连续方程与雷诺平均方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\delta(\overline{u'_i u'_j})}{\partial x} + f_i \quad (6)$$

式中:  $i, j=1, 2, 3$ ;  $\bar{u}'_i \bar{u}'_j$  为雷诺应力;  $f_i$  为体积力在  $i$  方向上的分量。

本文中流场数值求解方法为 PISO (pressure implicit with splitting of operators, 即利用算子分裂的方法进行隐式求解压力和速度) 算法, 处理自由液面时采用 VOF 法。

当单元体中的液相为水时, 体积函数控制方程可写为:

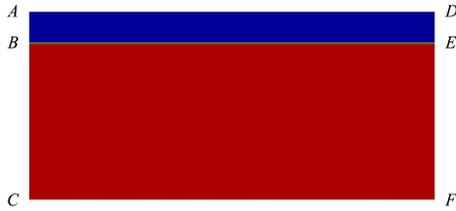
$$\frac{\partial q_a}{\partial t} + u_i \frac{\partial q_a}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

式中:  $q_a$ 、 $q_b$  分别为流体计算区域内水体和空气所占计算区域体积分数的相对比例;  $u_i$ 、 $x_i$  分别为速度和坐标的分量, 且  $\{u_i = u, v, w\}$ 、 $\{x_i = x, y, z\}$ 。

## 2 数值水槽的建立与验证

图 1 为数值波浪水槽模型, 固体边界满足无渗透、可滑移边界条件, 选用二阶 Stokes 波通过边界

造波法进行数值造波, 模型尺寸为 10 m×0.6 m, 上半为空气, 下半为水体。



注: AB、BC 为速度入口, AD、DE、EF 为压力出口, CF 为固体壁面。

图1 数值波浪水槽模型

Fig. 1 Numerical wave flume model

对自由液面附近约 2 个波高大小的区域进行网格加密, 网格的整体划分尺寸为  $dx = 0.010\ 0$ ,  $dy_{max} = 0.026\ 0$ , 自由表面处加密网格的尺寸为  $dx = 0.002\ 2$ 。图 2 为网格的整体轮廓和液面加密情况。

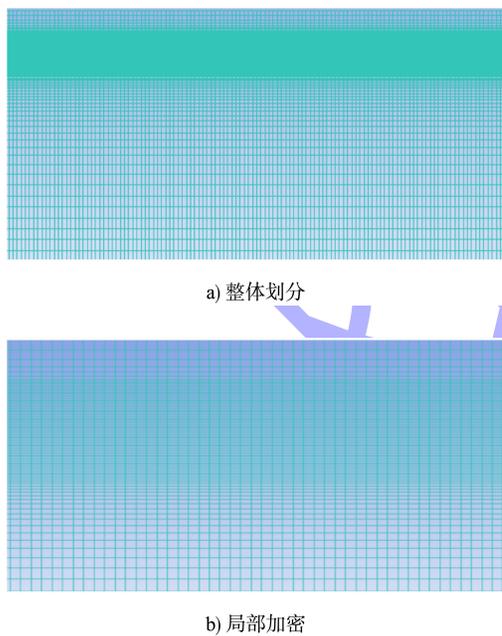


图2 数值波浪水槽网格整体划分及局部加密

Fig. 2 Overall division and partial encryption of numerical wave flume grids

模型采用 1:45 的比例进行缩放, 本次计算中水深  $h = 0.5\ m$ , 波高  $H = 0.05\ m$ , 周期  $T = 1.4\ s$ , 对波面  $x$  在 2.0、4.0、6.0、9.5 m 处的波面时间历程曲线进行监测, 并与理论解进行比较, 以此验证建立的数值波浪水槽的有效性和准确性。

由图 3 可知, 随着时间进行, 模拟数值解和理论解析解趋于一致, 说明波浪沿水槽方向传播

良好; 当波浪到达消波区后, 可以观察到明显的波浪消减效果, 说明消波区消浪效果良好。

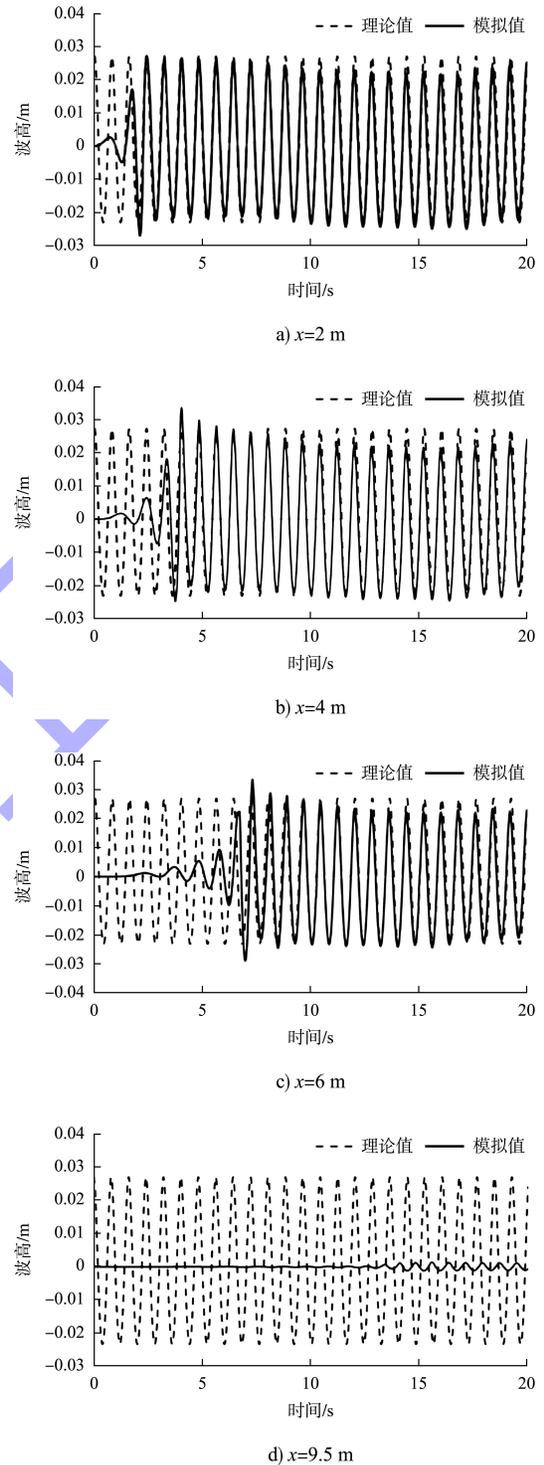


图3 不同位置处数值波形和理论波形对比

Fig. 3 Comparison of numerical and theoretical waveforms at different positions

### 3 双层水平板水动力特性分析

计算工况(模型参数)见表 1, 模型布置见图 4。

表 1 中长周期波计算工况  
Tab. 1 Calculation conditions for medium and long-period waves

水深 $d/m$	板宽 $B/m$	板间距 $S/m$	相对波高 $H/d$	周期 $T/s$	比例
0.5	1	0.1	0.15、0.17、0.19、0.21、0.25	1.67、2.00、2.40、2.80、3.00	1:45

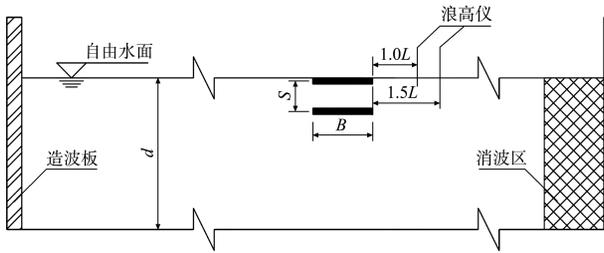


图 4 数值水槽模型布置

Fig. 4 Layout of numerical wave flume model

### 3.1 双层水平板消浪特性

#### 3.1.1 透射系数随相对板宽变化规律

透射系数  $C_t$  为:

$$C_t = H_t/H_i \quad (8)$$

式中:  $H_i$  为板前入射波高;  $H_t$  为板后透射波高。

固定以下参数:  $d=0.5\text{ m}$ ,  $S=10\text{ cm}$ , 相对板间距  $S/d=0.2$ ,  $H=0.1\text{ m}$ , 使入射周期在  $1.67\sim 3.00\text{ s}$  之间变化, 给出  $C_t$  随相对板宽  $B/L$  变化的结果, 如图 5 所示,  $C_t$  均小于 0.5, 且随  $B/L$  减小而增大, 证明结构消浪效果良好。

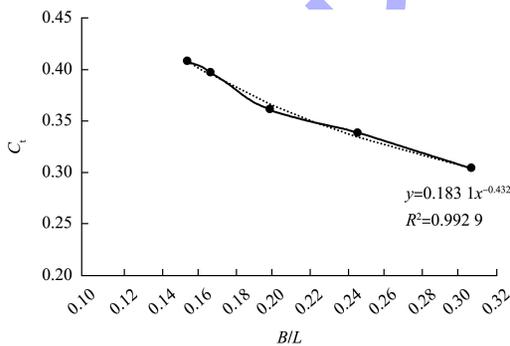


图 5  $C_t$  随  $B/L$  的变化拟合曲线

Fig. 5 Fitted curve of variation of  $C_t$  with  $B/L$

#### 3.1.2 透(反)射系数随 $R$ 数变化规律

引入参数  $R$  评价结构消浪性能, 入射波静水面处水质点以速度描述入射波浪特征。

$$R = U_{\max} T/B \quad (9)$$

式中:  $U_{\max}$  为静水面位置入射波浪最大水平水质点速度。

由于  $R$  与透射系数  $C_t$  和反射系数  $C_r$  的相关性不够显著, 故采用去除相对波高因子后重新定义, 记为  $R'$ :

$$R' = \frac{R}{H/d} = \frac{\pi H B \cosh(kd) / \sinh(kd)}{H/d} = \frac{\pi B d \cosh(kd)}{\sinh(kd)} \quad (10)$$

相较于  $R$ ,  $R'$  同  $C_t$  和  $C_r$  的变化规律更加协调, 能够更有效地用于描述双层水平板的消浪性能<sup>[15]</sup>。

图 6 为透射系数  $C_t$  和  $C_r$  随  $R'$  的变化规律和拟合结果。

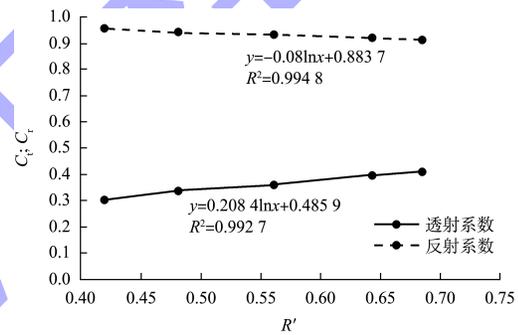


图 6  $C_t$ 、 $C_r$  随  $R'$  的变化拟合曲线

Fig. 6 Fitted curve of variation of  $C_t$  and  $C_r$  with  $R'$

#### 3.1.3 透射系数随相对波高变化规律

在周期为  $2.4\text{ s}$  的条件下, 设置 5 种相对波高工况进行试验, 结果如图 7 所示,  $C_t$  变化范围介于  $0.34\sim 0.39$ , 变化较小, 说明结构消浪性能受相对波高影响不显著。

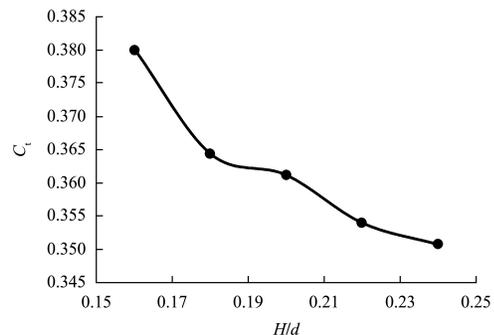


图 7  $C_t$  随  $H/d$  的变化拟合曲线

Fig. 7 Fitted curve of variation of  $C_t$  with  $H/d$

### 3.2 双层水平板的压力分布特征

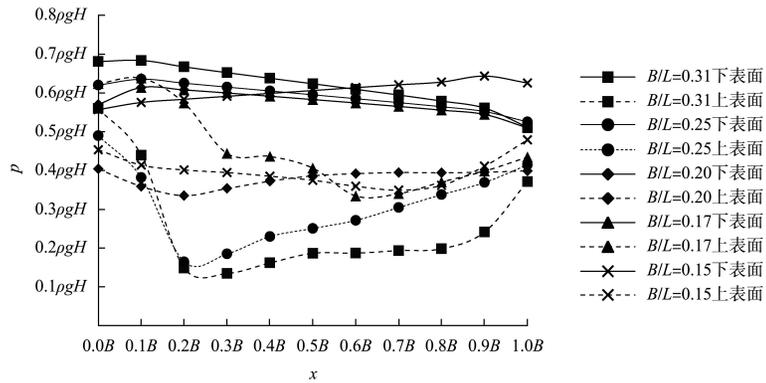
#### 3.2.1 同步波压力分布变化规律

本文仅讨论结构垂直方向受力。规定波压力向上为正向, 选取总浮托力  $F_{\text{浮}}$  最大时刻和向下波浪力  $F_{\text{下}}$  最大时刻进行分析。以总浮托力最大时刻  $B/L=0.31$  工况下为例, 图 8 给出了中长周期波浪作用下, 向上、向下总力最大时, 结构 4 个受力面的同步波压力分布情况。

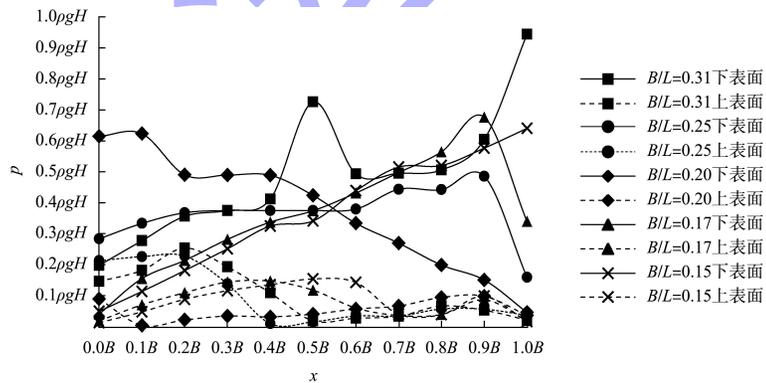
由图 8a) 可见, 在总浮托力最大时刻, 结构 4 个表面均受压, 波动压力均大于 0。下层板表面

波压力沿板宽分布大体对称; 上层板下表面的波压力分布随波峰经过发生变化, 但波压力峰值没有明显变化; 上层板上表面的波压力大小基本为 0。

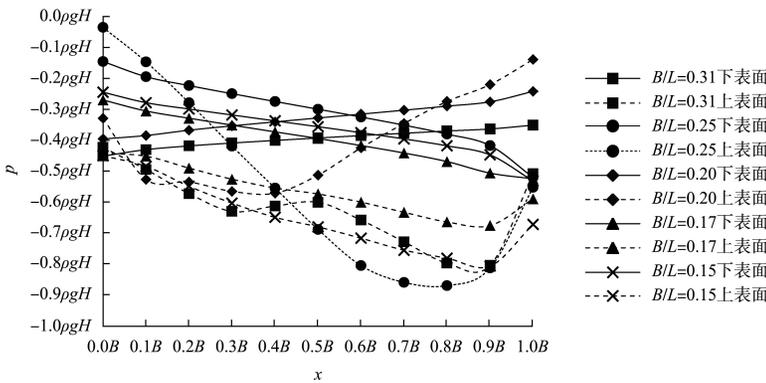
由图 8b) 可见, 向下总力最大时, 上层板上表面波动压力大于 0, 受波压力作用; 其余受力面波动压力均小于 0, 受波吸力作用。上层板上表面的最大波压力出现在板中部, 首尾两端波动压力基本为 0, 其余表面波压分布呈现中间大、两端小的规律。



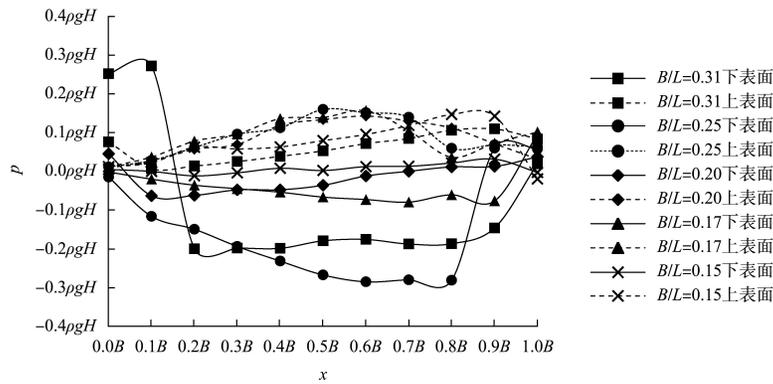
a)  $F_{\text{浮}}$ 最大, 下层板



b)  $F_{\text{下}}$ 最大, 上层板



c)  $F_{\text{下}}$ 最大, 下层板



d)  $F_r$ 最大, 上层板

图 8 不同相对板宽下同步波压力分布

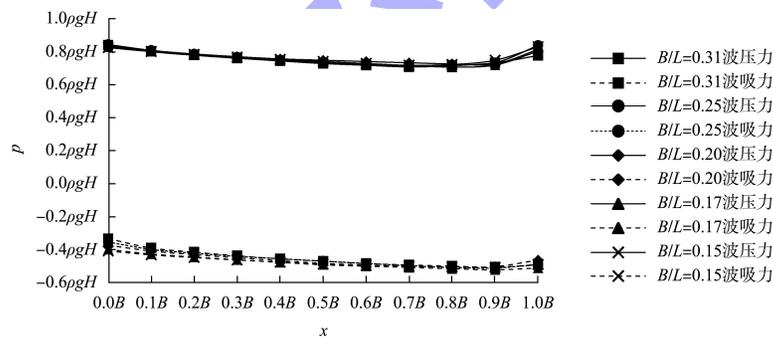
Fig. 8 Synchronous wave pressure distribution under different relative plate widths

### 3.2.2 双层水平板波压包络分布特征

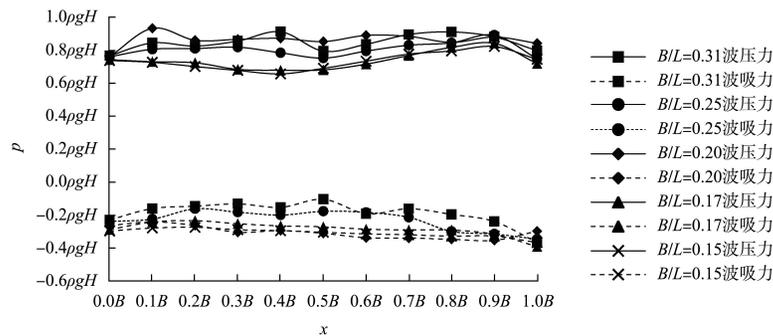
图 9 为结构各受力面无因次波压力包络值沿板宽分布的试验结果。

由于板两端波浪发生破碎, 最大波压力多出现在板两端位置。上层板上表面波吸力均在 0 附近, 其余表面包络值分布大体对称。下层板下表

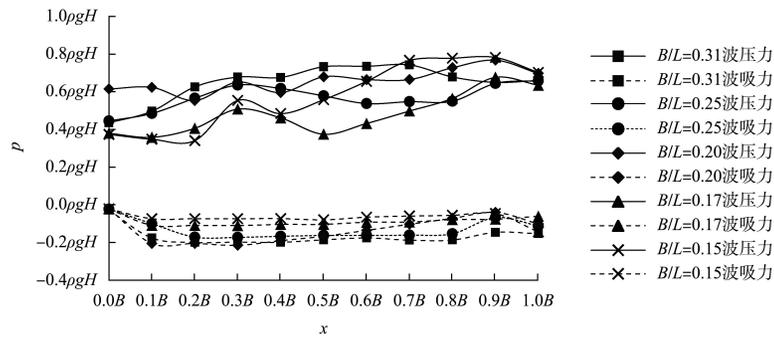
面的波压力和波吸力包络值基本稳定在 0.8 和 0.4 附近, 上表面基本保持在 0.8 和 -0.3 附近; 上层板下表面的波压力和波吸力包络随波峰经过而变化, 且随相对板宽的减小而整体趋向平稳, 上表面的波压力和波吸力包络基本保持稳定, 波压力大小保持在 0.2 附近, 波吸力基本为 0。



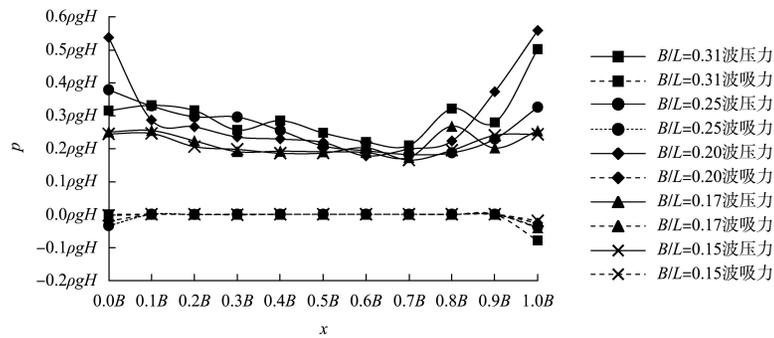
a) 下层板下表面



b) 下层板上表面



c) 上层板下表面



d) 上层板上表面

图 9 不同相对板宽下压力包络分布

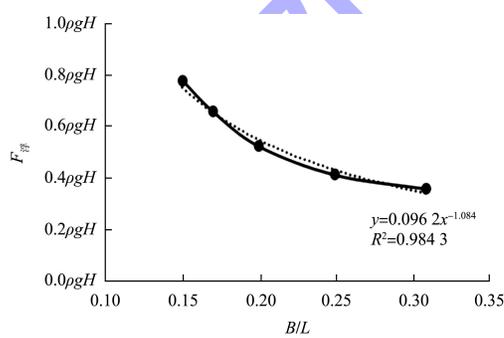
Fig. 9 Pressure envelope distribution under different relative plate widths

### 3.3 双层水平板结构总力分布特征

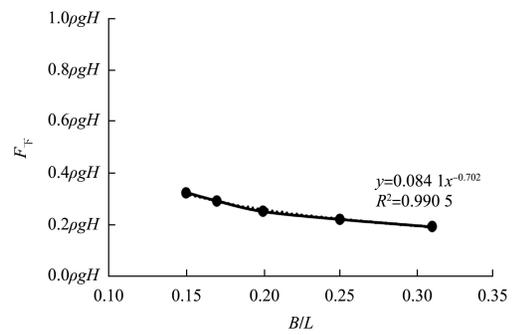
#### 3.3.1 结构总力与相对板宽的关系

总力即总力的最大值, 图 10 为不同相对板宽

条件下总浮托力与向下总力随相对板宽变化的试验结果。随着相对板宽的减小, 结构总力均呈减小的趋势, 且结构受到的总浮托力明显大于向下总力。



a)  $F_{\text{浮}}$



b)  $F_{\text{下}}$

图 10 结构总力随  $B/L$  的变化拟合曲线

Fig. 10 Fitted curve of variation of total structural force with  $B/L$

#### 3.3.2 结构总力与 $R'$ 的关系

均随  $R'$  增大而增大。

图 11 为结构  $F_{\text{浮}}$  和  $F_{\text{下}}$  随  $R'$  变化的试验结果,

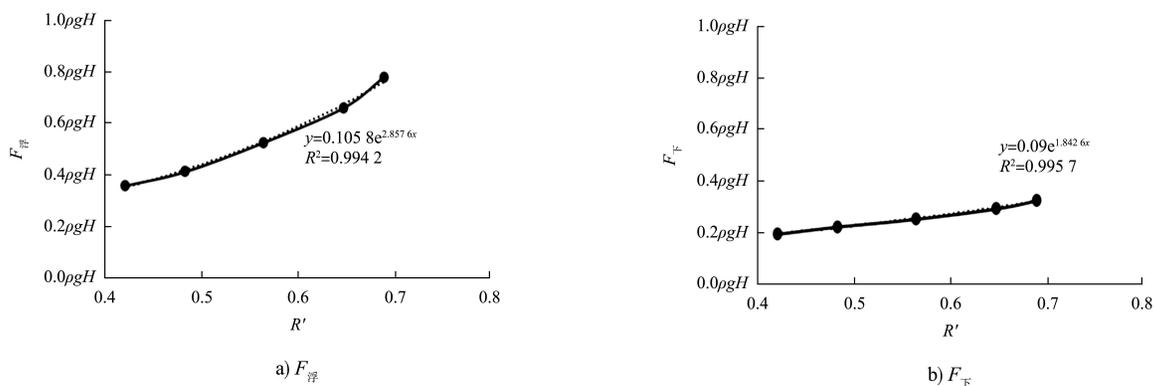


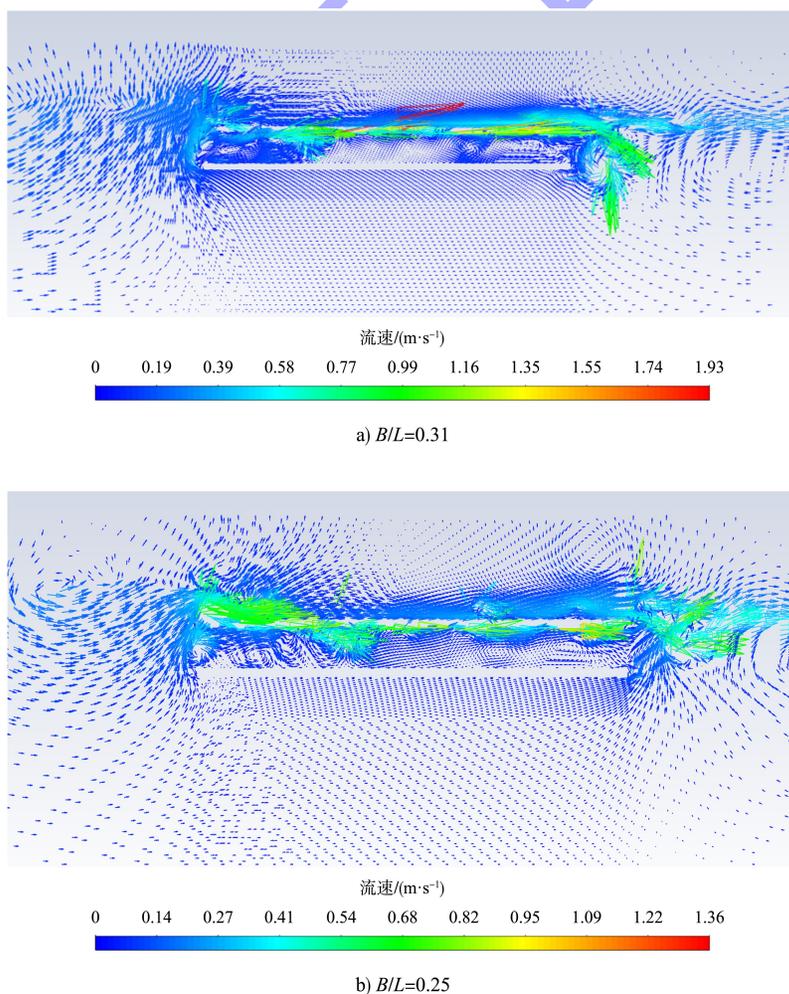
图 11 结构总力随  $R'$  的变化拟合曲线

Fig. 11 Fitted curve of variation of total structural force with  $R'$

### 3.4 双层水平板结构周围流场特性

通过 FLUENT 后处理模块，选取各工况浮托力最大时刻，其速度矢量见图 12。由图可知，随着相对板宽减小，波浪破碎程度也随之减小，5 种工况下上层板区域对波浪的响应相较于下层板而

言都更明显。透空性结构对来流方向水质点速度矢量的大小和方向影响不大，但波浪在经过结构时水深发生突变，导致结构后方水质点速度矢量受到明显干扰，而干扰主要集中在上层板，下层板受到的影响较小。



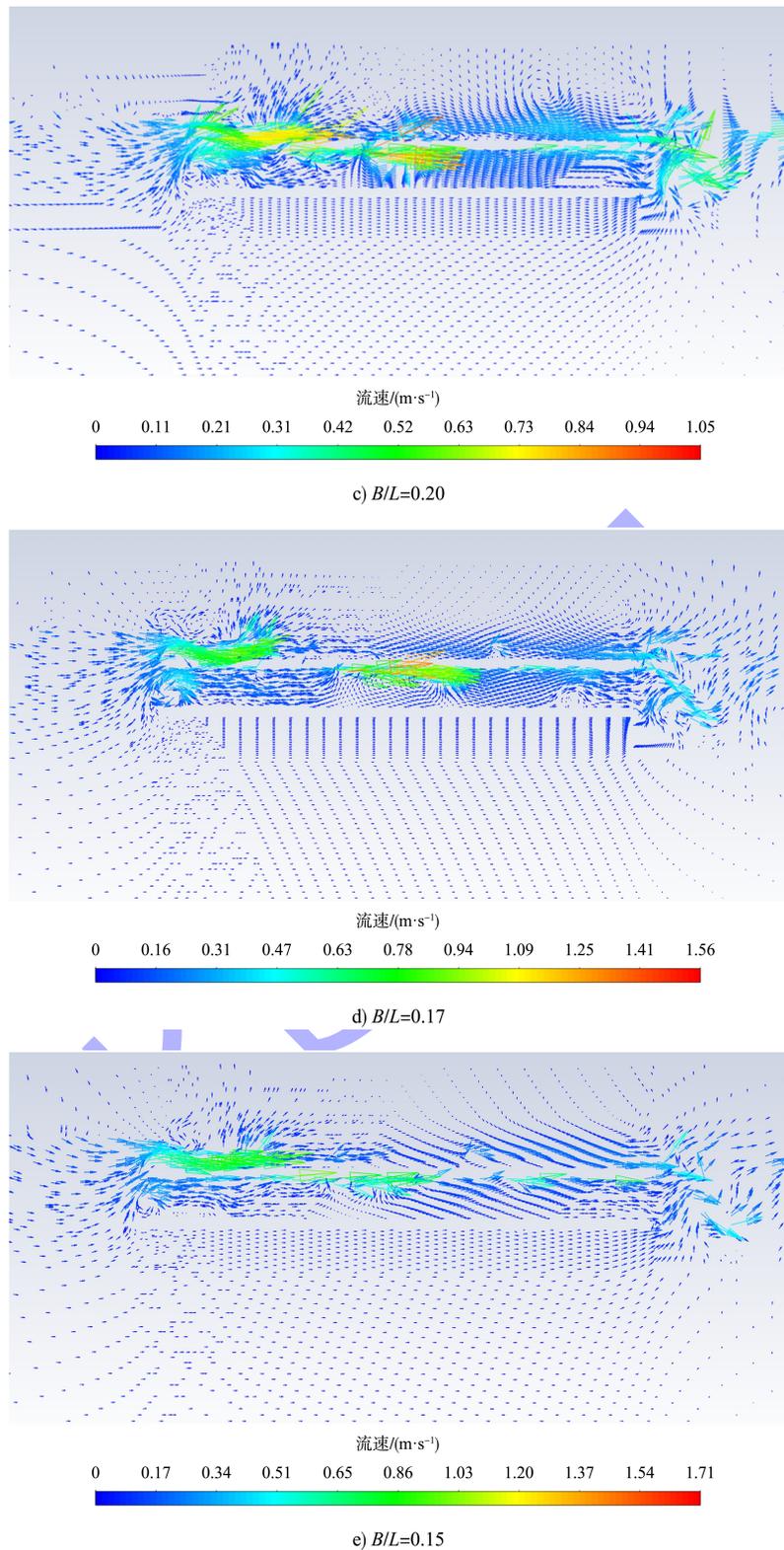


图 12 不同相对板宽下的速度矢量

Fig. 12 Velocity vectors with different relative plate widths

当波浪到达结构后方时, 流场结构受到强烈扰动, 水平板后方会有漩涡形成, 与此同时, 部分水体沿斜向下方向流入两水平板之间, 沿结构中间空隙传向结构前方, 两板之间的水质点主要

进行水平方向的往复运动, 在结构两端常有漩涡形成, 而板下方的水质点则基本沿水平方向进行往复流动, 受干扰较小。因此可以认为, 波浪透过结构传递到双层水平板后方时, 水深发生突变,

波浪能量并没有完全向结构后方传播,部分波能发生逆向传播,这是结构的主要消浪机理。

#### 4 结语

1) 通过分析透射系数随  $R'$  及波高的变化趋势,对双层水平板结构的消浪效果进行了深入探讨。研究表明,此结构在消浪方面具有良好的效果,且受相对波高的影响并不十分显著。

2) 通过对向上和向下波浪力最大时刻的波压力分布进行分析,得到中长周期波浪作用下结构4个受力面的波压力分布情况,发现由于板两端波浪破碎,最大波压力多出现在板两端。

3) 通过分析结构总力随相对板宽和  $R'$  的变化趋势发现,结构总力均随着相对板宽和  $R'$  的减小而减小,并得到相应的变化规律。

4) 通过分析结构周围流场特性发现,波浪在通过结构时由于水深的突变,导致结构后方水质点速度矢量受到显著干扰,流场结构遭受强烈扰动,表明波浪经过结构时水深的突变导致波浪能量并未完全向后传播,部分波能发生逆向传播,这是结构消浪的主要机理。

#### 参考文献:

- [1] 康海贵,王科. 潜型水平板水动力特性的数值研究[J]. 海洋通报, 2002, 21(1): 1-8.  
KANG H G, WANG K. Numerical investigation on submerged horizontal plate [J]. Marine science bulletin, 2002, 21(1): 1-8.
- [2] 王昊天. 长周期波作用下斜坡堤水动力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.  
WANG H T. The analysis of hydrodynamic characteristics of sloping breakwater under long period wave[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [4] 肖明明. 长周期波对港口工程设计波要素影响的数值模拟试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.  
XIAO M M. Numerical simulation testing study on effects of long-period waves on design wave parameters for port engineering[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [5] 张志,孔友南,程培军. 长周期波作用下防波堤透浪对港内系泊稳定影响分析[J]. 水道港口, 2017, 38(6): 561-566.  
ZHANG Z, KONG Y N, CHENG P J. Analysis of influence

of long-period transmitted wave through breakwater on mooring stability in the harbor [J]. Journal of waterway and harbor, 2017, 38(6): 561-566.

- [6] 王超,秦世杰,于明,等. 长周期波作用下透空式防波堤的防浪性能研究[J]. 港工技术, 2019, 56(4): 20-24.  
WANG C, QIN S J, YU M, et al. Study on wave sheltering effect of permeable breakwater under long periodic wave[J]. Port engineering technology, 2019, 56(4): 20-24.
- [7] CHEONG H F, PATARAPANICH M. Reflection and transmission of random waves by a horizontal double-plate breakwater[J]. Coastal engineering, 1992, 18(1/2): 63-82.
- [8] WANG K H, SHEN Q. Wave motion over a group of submerged horizontal plates [J]. International journal of engineering science, 1999, 37(6): 703-715.
- [9] 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.
- [10] LIU Y, LI Y C, TENG B. Wave motion over two submerged layers of horizontal thick plates[J]. Journal of hydrodynamics (ser B), 2009, 21(4): 453-462.
- [11] 陈旭达. 开孔和不开孔双层水平板防波堤水动力特性的对比研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.  
CHEN X D. Comparative study on the hydrodynamic characteristics of perforated and non-perforated double-layer horizontal plate breakwaters [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [12] 陈旭达,张宁川. 一种新型透空式防波堤水动力特性试验研究[J]. 水道港口, 2011, 32(1): 7-11.  
CHEN X D, ZHANG N C. Study of hydrodynamic performance of a new-type penetrating breakwater [J]. Journal of waterway and harbor, 2011, 32(1): 7-11.
- [13] LIU Y, LI H J. Hydrodynamic performance of a composite breakwater with an upper horizontal porous plate and a lower rubble mound [J]. Ocean systems engineering, 2013, 3(1): 55-70.
- [14] RAWAR S, SAN O. CFD Julia: a learning module structuring an introductory course on computational fluid dynamics [J]. Fluids, 2019, 4(3): 159.
- [15] 顾倩. 波浪对双层水平板防波堤作用试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.  
GU Q. The experimental study for the effect of waves on the twin-plate breakwater [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.

(本文编辑 王传瑜)