

· 综合 ·



# 规则波作用下桩基双挡板透空防波堤的 波浪荷载数值模拟研究\*

孙忠滨<sup>1</sup>, 孙新鹏<sup>2</sup>, 李金宣<sup>3</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;  
3. 大连理工大学, 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

**摘要:** 双挡板透空防波堤消浪效果好, 具有过水性、环境友好等特点, 可满足海洋环境保护对水工建筑物的要求。针对目前该类结构水动力特性研究不足的问题, 对波浪作用下双挡板透空防波堤波浪荷载进行研究。基于 Fluent 模型建立数值水槽, 模拟波浪与双挡板防波堤作用, 分析板间不同水面条件下, 相对水深、挡板入水深度、堤宽等因素对波浪荷载的影响。结果表明, 当双板间为非自由水面时, 结构荷载受相对水深和堤宽影响较小, 随入水深度增大而增大; 当双板间为自由波面时, 板间水体运动显著影响结构的受力, 结构最大荷载会明显增大, 结构荷载与各影响因素间关系也产生变化。双板间自由波面条件是防波堤常见的工作状态, 在结构设计时应充分重视。

**关键词:** 透空防波堤; 双挡板防波堤; 波浪荷载; 数值水槽

中图分类号: U656.31+4; P753

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0018-10

## Numerical simulation of wave load of piled open type breakwater with double baffles under regular waves

SUN Zhongbin<sup>1</sup>, SUN Xinpeng<sup>2</sup>, LI Jinxuan<sup>3</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;  
3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The open type breakwater with double baffles has good wave attenuation effect, and has the characteristics of water permeability and environmental protection, which can meet the requirements of the functions of structures due to the marine environmental protection. A study on wave loads acting on a opentype breakwater with double baffles under wave action is conducted to address the current shortcomings in hydrodynamic characteristic research of such structures. A numerical flume is built on the basis of the Fluent model, and the interaction between waves and the breakwater with double baffles is simulated. Then the influence of relative water depth, depth of baffle into water, width on wave load under different wave surface condition between two baffles is analyzed under different water surface conditions between baffles. The results show that when there is no free water surface between the two baffles, the structural load is less affected by the relative water depth and width of breakwater, and increases with the increase of depth into water. For the free wave surface condition, the water movement between the baffles significantly affects the wave load of the structure, the maximum load of the structure will increase significantly, and the relationship between the structural load and the influencing factors will also change. The condition of the free water surface between the two baffles is a common operational state for breakwaters, and it should be given full consideration during the structural design process.

**Keywords:** open type breakwater; breakwater with double baffles; wave load; numerical flume

收稿日期: 2024-10-27

\*基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12372270)

作者简介: 孙忠滨(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为波浪与海上建筑物相互作用。

防波堤作为港口水工建筑物的重要组成部分,它能够抵御波浪冲击,减少波浪进港,保证港内具有平稳的水面,以满足船舶在港内停泊、装卸作业和出入航行的安全要求。在长期的工程实践中,形成了以斜坡式和直立式防波堤为主的结构形式。然而,这些传统的斜坡堤和直立堤属阻水结构物,不利于港内水体的循环,容易造成港内水质下降,带来一系列生态问题,很难满足新时期对工程结构的要求。因此,发展既可满足防浪要求,又具有一定的透水性,可与自然环境相协调的新型防波堤结构形式,成为目前研究的热点。

桩基挡板透空式防波堤是一种新型结构,其上部的挡浪结构起消浪作用,从而使港区内的水面保持平稳;下部透空,因此水体可以自由地在港区内部和外部之间流动,从而使港区内部水体的质量满足要求。由于其良好的透水性,逐渐得到人们的重视。

对挡板透空式防波堤的研究始于 20 世纪中叶,起初都是以单个挡板为研究对象,最早, Ursell<sup>[1]</sup>基于势流理论对无限水深时单个直立透空薄板的透浪系数进行理论研究,并给出透射系数的理论解; Wiegel<sup>[2]</sup>假定透射波能等于薄板下的入射波波能,由微幅波理论得出有限水深时透射系数的解析解。该解析解计算方便、实用性强,被广泛使用。在我国,邱大洪等<sup>[3]</sup>提出“透空式防波堤”这个概念,并求出单块竖直薄板浸入水中时的透射系数与反射系数的解析解表达式。另外,胡亚娴<sup>[4]</sup>、Wang 等<sup>[5]</sup>和李爱军等<sup>[6]</sup>分别通过不同手段研究挡板透空防波堤水动力特性。

单板透空防波堤在短波作用时防护效果比较好,但长波作用时透射系数偏大,为了起到更好的防护效果,学者们提出了双挡板防波堤。McIver<sup>[7]</sup>、Porter 等<sup>[8]</sup>分别对有限水深条件下双挡板水动力特性进行理论分析,研究水深和挡板入水深度对透、反射系数影响,并发现当波数满足一定条件时,两板间水体会发生共振,即“窄缝共振”现象,并且在共振频率附近,会出现无反射、无透射以及全透射的现象; Neelamani 等<sup>[9]</sup>研究不

规则波和规则波作用下,前和后挡板入水深度相同的透空防波堤透射系数、反射系数和能量损失,结果表明双挡板能够较好削弱波浪透射和增大能量损失,不规则波作用时比规则波效果更明显;范骏等<sup>[10]</sup>、冯卫兵等<sup>[11]</sup>、Li 等<sup>[12]</sup>通过试验探究双挡板透空堤透浪系数与反射系数的影响因素和规律,其中包括内外挡板入水深度、防波堤宽度、挡浪墙高度等因素,得出挡板入水深度是影响透射系数的最关键因素,并分别给出透射系数的经验计算公式。

关于双挡板防波堤的研究大多集中在其透射系数,而结构荷载也会影响防波堤的安全,是防波堤设计时另一个重要问题,但这方面研究相对偏少。我国现行 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》<sup>[13]</sup>(简称《规范》)仅是简单规定双挡板防波堤的透射系数按照直立式坐底结构计算;虞丹君等<sup>[14]</sup>在文献[11]的基础上,进一步分析双挡板透空防波堤的水平波压力,结果表明当透空率较大时,挡板压力与按《规范》方法得到的结果差别较大;尹亚军等<sup>[15]</sup>基于实际工程方案,研究双挡板透空防波堤的波浪力,同样发现实测波浪力要比《规范》的计算值偏大。另外,文献[14]和[15]仅研究了挡板前侧(迎浪侧)荷载,没有给出背侧(背浪侧)更为复杂流场内的压力计算方法。目前,挡板的整体荷载仍没有成熟的计算方法。

因此,本文基于 Fluent 模型,建立二维数值波浪水槽,考虑流体黏性,模拟规则波浪与双挡板防波堤作用,分析结构所受波浪荷载特点,研究双板间水面条件、相对水深、板入水深度、堤宽等因素对结构荷载的影响。研究结果有助于双挡板透空防波堤的设计与推广。

## 1 双挡板透空防波堤模型简化

典型的桩基双板透空防波堤见图 1,由桩基、挡板和顶板等上部支撑结构组成。由于桩基对结构水动力特性影响较小,为了简化模型在研究中通常不考虑桩基。另外,考虑到实际中水位变化,低水位时两板间水面不受支撑结构限制,可自由

波动；而高水位时，两板间支撑结构淹没在水中，水面也受支撑结构限制。这两种状况对防波堤的水动力影响较大，进而影响结构受力，所以本文将模型简化成两种情况，见图 2。其中图 2a) 为自由水面工况， $D$  为双板入水深度， $B$  为两板间距， $d$  为水深；图 2b) 为非自由水面工况，两板间由横板抑制水面变化， $e$  为横板与静水面距离。

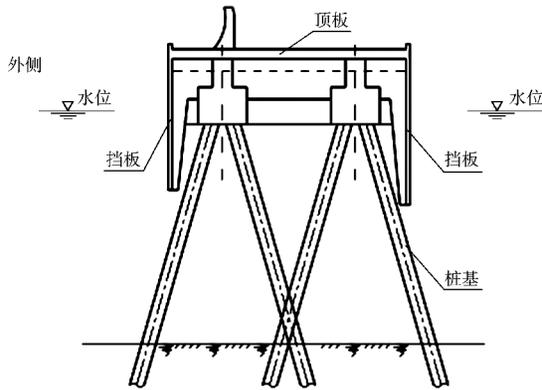
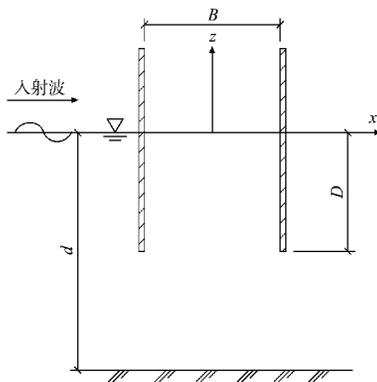
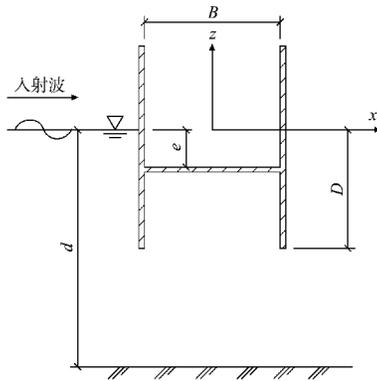


图 1 典型的桩基双挡板透空防波堤  
Fig. 1 Typical piled open type breakwater with double baffles



a) 自由水面工况



b) 非自由水面工况

图 2 简化的模型断面

Fig. 2 Simplified model cross-section

## 2 数值模型

### 2.1 控制方程

对于流体域来说，黏性不可压缩流体满足连续性方程和动量方程，分别表示为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

其中：

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left( \nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \right) \quad (3)$$

式中： $\rho$  为流体密度； $t$  为时间； $\mathbf{v}$  为速度矢量； $p$  为静压； $\boldsymbol{\tau}$  为应力张量； $\mathbf{g}$  为重力矢量； $\mathbf{F}$  为外力或依赖于模型的源项； $\mu$  为分子的黏度； $\mathbf{I}$  为单位张量。

### 2.2 边界条件

在 Fluent 模型中，用于定位和捕捉流体自由液面的方法为流体体积法 (volume of fluid, VOF)。在计算过程中先不区分计算域内的两相的分布变化，在此前提下求解方程，并用一个参数相函数  $\alpha$  定义自由液面的位置。相函数  $\alpha$  的定义为：

$$\begin{cases} \alpha = 0 & (\text{气体}) \\ 0 < \alpha < 1 & (\text{自由液面}) \\ \alpha = 1 & (\text{液体}) \end{cases} \quad (4)$$

当  $\alpha = 0$  时，代表网格单元中全为气体；当  $0 < \alpha < 1$  时，代表网格中既有气体也有液体，即此网格位于自由液面处；当  $\alpha = 1$  时，代表网格中全为液体。

二维的数值波浪水槽见图 3，其左端为造波边界，右端为消波边界。本文的造波方法为推板造波法，通过编写 UDF 程序定义造波边界的速度，使壁面做规律的往复运动以带动壁面附近的水质点运动，从而达到造波的目的。推板运动的速度表达式为：

$$v = \frac{\pi H \sin(2\pi t/T) [2kd + \sinh(2kd)]}{4T \sinh^2(kd)} \quad (5)$$

式中： $H$  为所造波的波高； $T$  为波浪周期； $k$  为波数。

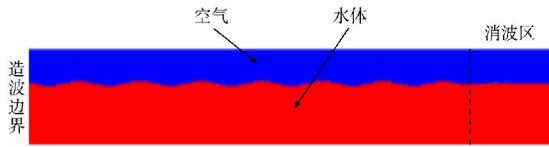


图 3 二维数值波浪水槽

Fig. 3 Two-dimension numerical wave flume

消波边界为水槽最右端的一段流体域, 长度一般为波长的 2 倍。在数值模拟中采用数值阻尼消波的方法, 在动量方程中添加阻尼项以消耗水质点在运动过程中的动量以达到减小水质点速度的目的。

### 3 数值模型验证

#### 3.1 模型试验

本文参考文献[9]的波浪与双挡板透空防波堤

作用物理模型试验。本文试验在大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室海洋环境水槽中进行。该水槽长 50 m、宽 3 m、深 1 m, 试验水深为 0.50 m。水槽一端为自制的液压伺服不规则波造波机, 水槽另一端铺设了斜坡式消能网, 以减小小波浪反射对试验结果的影响。

模型试验布置见图 4。模型放置在距造波板零点位置 21 m 处, 试验中共布置 8 根浪高仪进行测量。浪高仪①~④位于模型前方, 其中浪高仪①~③测量堤前波高, 用于分析反射波高, 浪高仪④在距前挡板 0.5 cm 处, 用于测量前挡板处波高; 浪高仪⑤~⑦(仅在自由水面工况中存在) 分别在两挡板间的左侧、中间和右侧位置, 用于测量两挡板间水面波动情况; 浪高仪⑧位于模型后方, 用于测量透射波高。

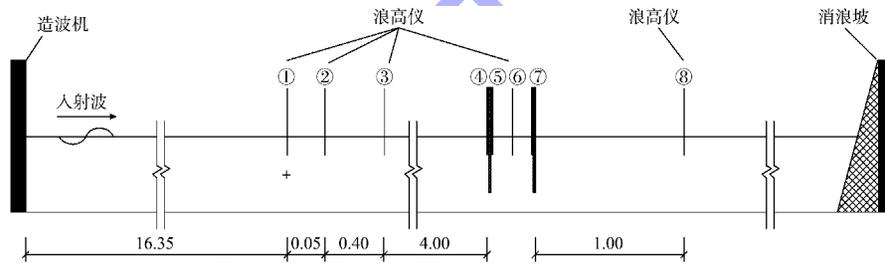


图 4 模型试验布置 (单位: m)

Fig. 4 Layout of model experiment (unit: m)

试验中也对前板的波浪压力进行测量, 测点布置见图 5。对于自由水面工况, 有 11 个测点分别布置于前板的前侧和后侧; 对于非自由水面工况, 有 9 个测点, 同样布置在前侧和后侧横板以下位置。

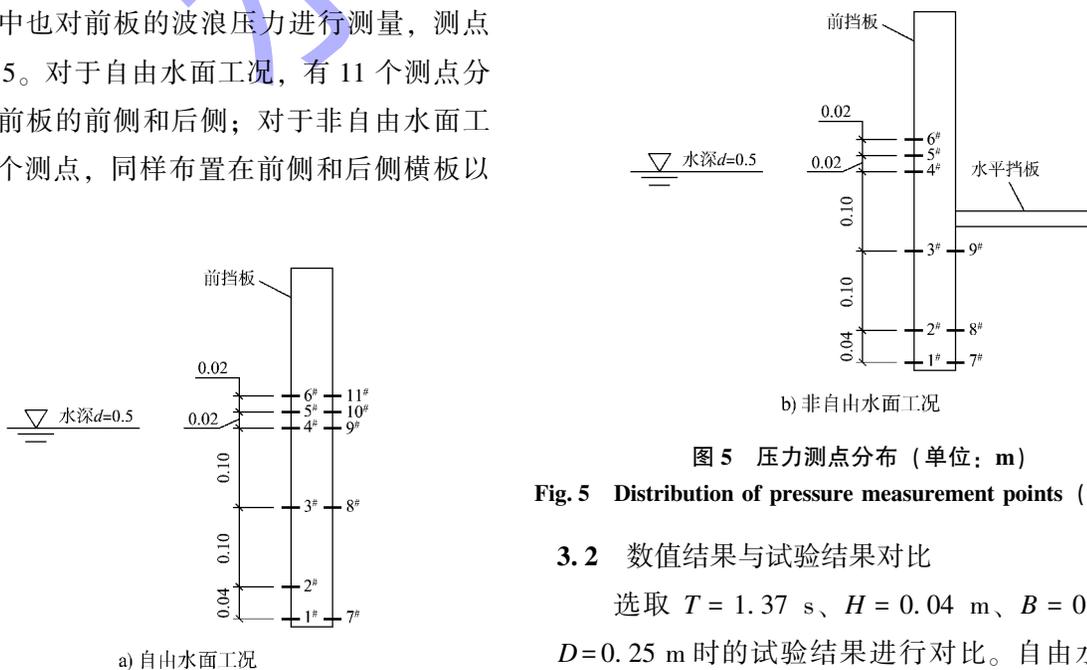


图 5 压力测点分布 (单位: m)

Fig. 5 Distribution of pressure measurement points (unit: m)

#### 3.2 数值结果与试验结果对比

选取  $T = 1.37$  s、 $H = 0.04$  m、 $B = 0.2$  m、 $D = 0.25$  m 时的试验结果进行对比。自由水面和

非自由水面工况时，结构前后测点处(浪高仪④和⑧)波面时间过程线的对比见图 6。可以看出，数值结果与物理模型结果吻合较好。前板前后侧的压力最大值对比见图 7。可以看出，除了迎浪面静水位置处( $z=0$  m)外，其他测点数值模型都能较好地模拟试验结果。静水面附近，物理模型试验结果

明显偏大，分析其原因可能为在物理模型试验中，静水面及静水面上方的测点处水面波动较为剧烈，压力测点处可能会出现气液互掺的现象，这种现象在数值模拟中是无法模拟的，因而导致物理模型试验的测量值偏大。总体来看，数值模型能够较好地模拟波浪与双挡板防波堤的相互作用。

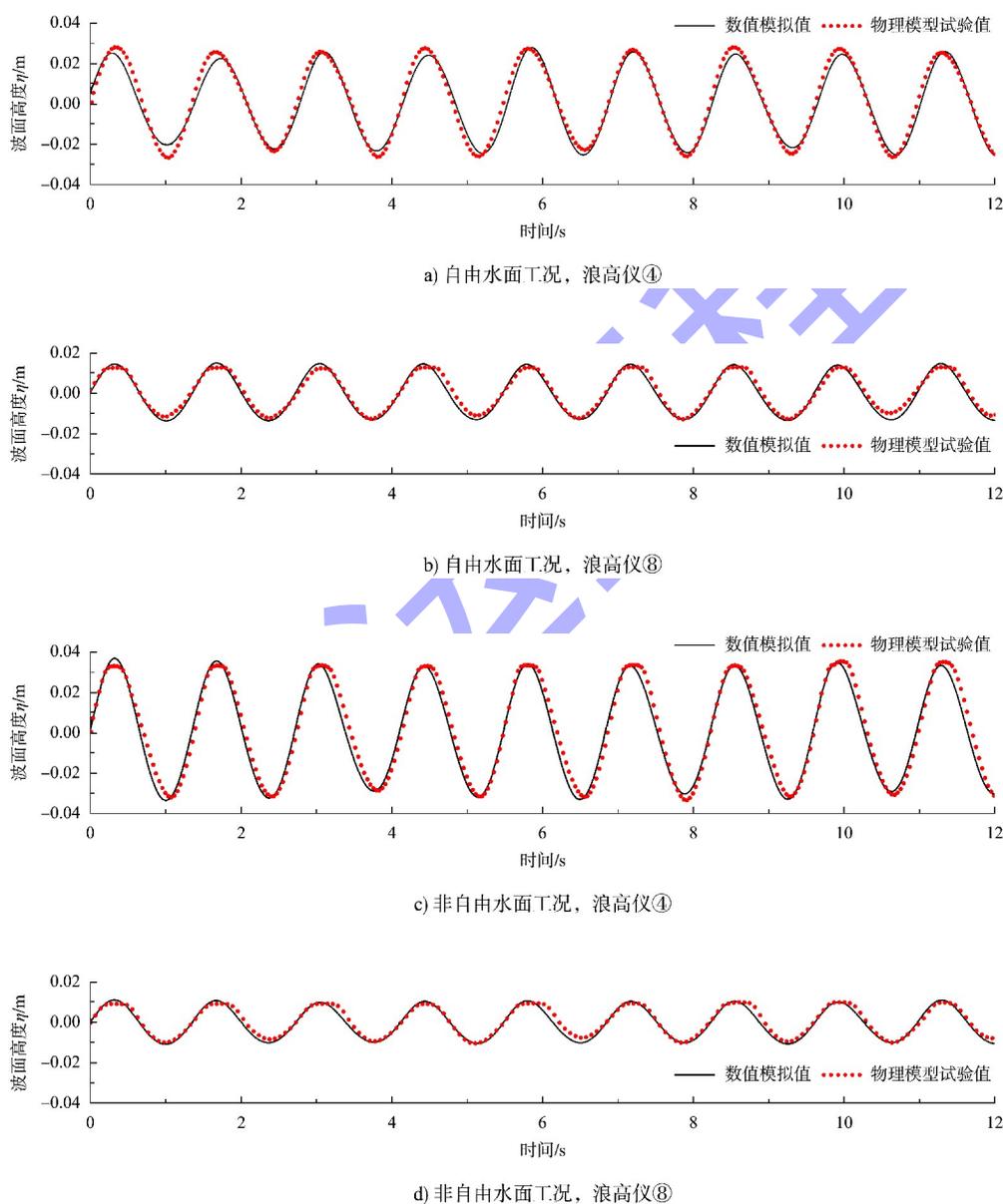


图 6 规则波作用下模型前后侧波面的时间过程线对比  
Fig. 6 Comparison of time history of surface elevation front and back of model under regular waves

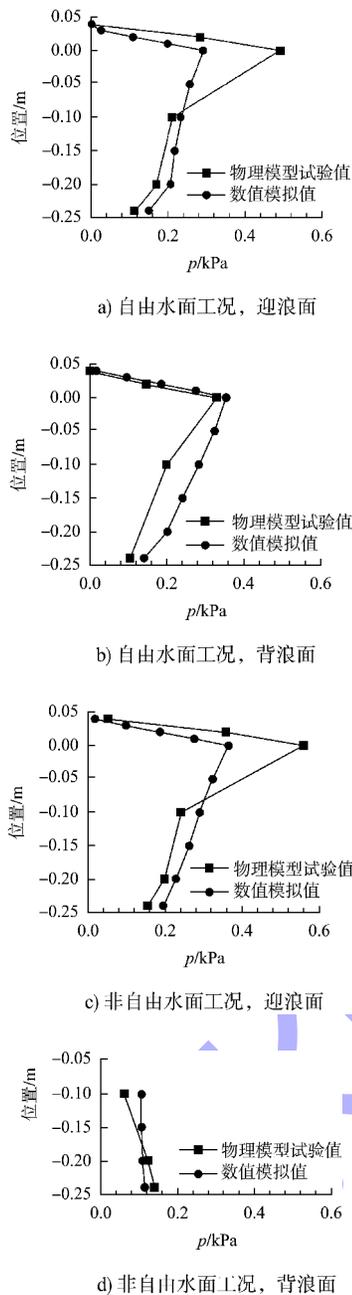


图 7 不同测点压力最大值比较

Fig. 7 Comparisons of maximum pressure of different measurement points

## 4 数值模拟结果

### 4.1 模拟工况

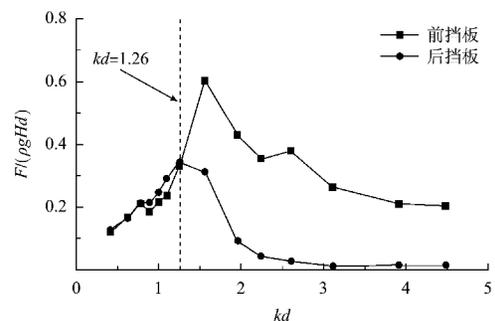
模拟所采用波浪和结构参数见表 1。模拟水深  $d=0.5$  m, 采用规则波,  $H=0.04$  m 保持不变, 改变  $T$ , 变化范围在  $0.67 \sim 3.49$  s。  $B$  分别取 0.2、0.3 和 0.5 m; 前后挡板入水深度相同, 分别为 0.125、0.250 和 0.375 m。所有工况都考虑两板间自由水面和非自由水面工况。

### 4.2 模拟结果

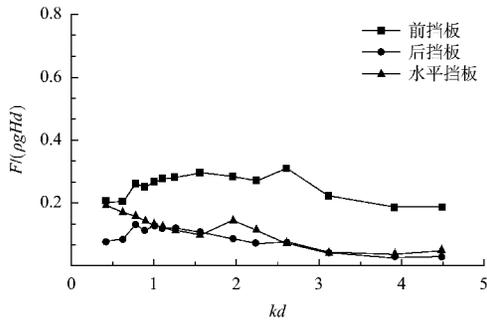
本文通过 Fluent 模型计算前挡板和后挡板的迎浪面与背浪面所受水平波浪力, 规定波浪传播方向为水平正方向。挡板所受总的水平波浪力为单块挡板的迎浪面与背浪面所受水平波浪力的总和。在挡板受力稳定后, 统计每个波浪周期中挡板受力的绝对值最大值, 并不少于 10 个波浪周期的统计值的平均值作为挡板所受的最大波浪力。水平波浪力均采用无量次量  $F/(\rho g H d)$  表示。

#### 4.2.1 相对水深对结构受力的影响

$B=0.20$  m、挡板相对入水深度  $D/d=0.50$  时, 自由水面和非自由水面工况的前、后挡板所受波浪力大小随相对水深  $kd$  的变化趋势见图 8。由图 8a) 可看出, 对于自由水面工况, 当相对水深的值较小时, 两块挡板受力大小十分接近, 随着相对水深值的继续增大, 两板受力逐渐增大, 前挡板所受波浪力会逐渐大于后挡板受力, 达到峰值后两板受力又逐渐减小, 且前挡板受力会在某个值附近趋于稳定, 后挡板所受波浪力会趋近于 0。这是因为当相对水深较小时(波浪周期较大), 波浪穿透能力较强, 模型前、模型后和两挡板中间水面波动幅度较为接近, 因此各个挡板所受波浪力较为接近。当相对水深较大时(波浪周期较小), 波浪穿透能力很弱, 波浪能量绝大部分都被前挡板反射回去, 因而此时后挡板受力趋近于 0, 前挡板受力趋于稳定。由图 8b) 可看出, 对于非自由水面工况, 前挡板所受水平波浪力总是大于后挡板, 并且两者受水深影响不如自由水面工况明显, 其大小均随相对水深的增大而先略微增大, 之后会不断减小。水平挡板所受竖直波浪力则会随相对水深的增大而不断减小。



a) 自由水面工况



b) 非自由水面工况

图 8 挡板受力大小随相对水深  $kd$  的变化趋势  
Fig. 8 Variation trend of force on baffle with relative water depth  $kd$

由图 8 可看出，两板间水面条件不同时，结构波浪力随相对水深变化趋势明显不同，特别是图 8a) 两板间为自由水面工况，可以看出前后两块挡板受力大小均随相对水深的增大而先增大后减小，并存在一个峰值。根据文献[12]的透空防波堤水动力特性研究结果，这可能跟两板间自由水面的运动有关。为了继续探讨自由水面工况下挡板所受波浪力出现峰值的原因，前挡板的迎浪面、前挡板的背浪面和前挡板所受总水平波浪力随相对水深的变化趋势见图 9。当相对水深  $kd$  较小(波浪周期较大)，波浪透射能力强时，挡板迎浪面和背浪面受力相当，迎浪面略大；但板总力要比单侧受力偏小很多。这主要是由板两侧波浪力相位不同而引起。

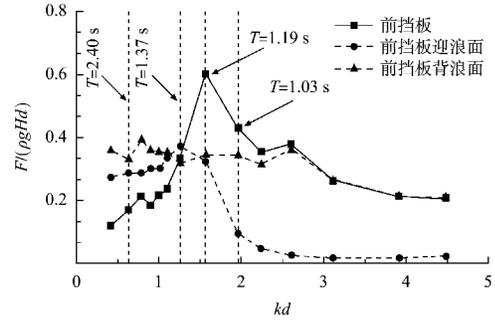
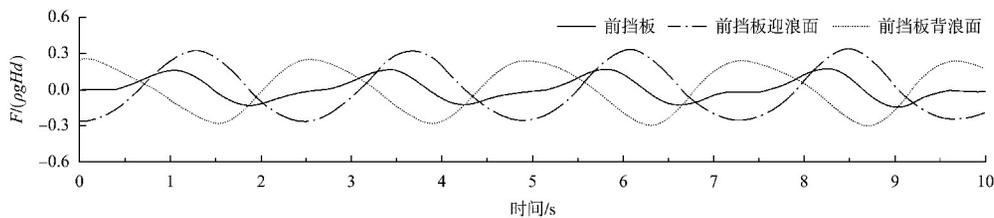
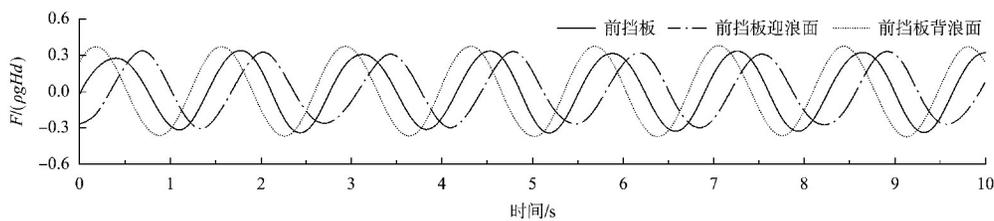


图 9 前挡板受力大小随相对水深  $kd$  的变化趋势  
Fig. 9 Variation trend of force on front baffle with relative water depth  $kd$

一组典型相对水深  $kd=0.63$  ( $T=2.4$  s) 时板迎浪面、背浪面和总力随时间变化的对比见图 10a)。可以看出，迎浪面和背浪面受力相位相差接近  $180^\circ$ ，引起总力变小。相位的差别会随着相对水深的增大(周期减小)而减小，进而总力增大。由图 10b)、c) 可看出迎浪面和背浪面受力相位差逐渐减小。当  $kd=1.55$  ( $T=1.19$  s) 时，波浪仍具有一定透射能力，背浪面波浪力仍与迎浪面相当，此时两者相位接近，见图 10c)，产生波浪总力最大。随着  $kd$  值进一步增大，虽然板两侧波浪力相位差别更小，见图 10d)，但由于波浪透射能力减弱，背浪面受力变小，整体总力也逐渐变小。当  $kd$  增大到一定程度，几乎没有透浪，背浪面受力趋近于 0，此时板的总荷载都是由迎浪面引起，迎浪面和总力相当。



a)  $T=2.40$  s



b)  $T=1.37$  s

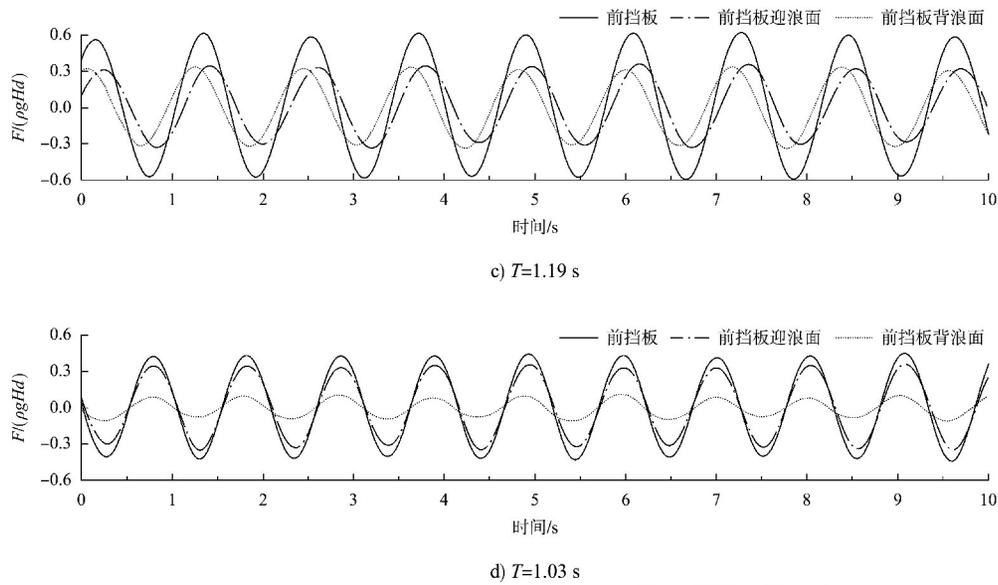


图 10 前挡板各个表面受力大小历时曲线对比

Fig. 10 Comparison of time history curves of force on different surfaces of front baffle

4.2.2 挡板相对入水深度对挡板受力的影响

$B=0.20$  m 时, 自由水面条件下和非自由水面条件下前、后挡板受力大小随挡板相对入水深度  $D/d$  变化趋势见图 11。可以看出, 前挡板所受水平波浪力均随挡板相对入水深度的增大而增大, 这是因为挡板相对入水深度越大, 挡板与流体相互作用的长度也会随之增大, 因而前挡板受力也会增大。对于后挡板来说, 其所受水平波浪力大小总体来说也会随着挡板相对入水深度的增大而增大, 但对于小入射波周期 ( $T=1.37$  s) 自由水面工况来说可能出现相反的变化趋势, 这是因为挡板相对入水深度越大, 能透射过前挡板的波浪能量越少, 因此会导致后挡板所受水平波浪力减小。另外, 也可以注意到, 对后挡板的受力, 自由水面工况比非自由水面工况时要明显偏大, 这主要由双板间水体运动引起。

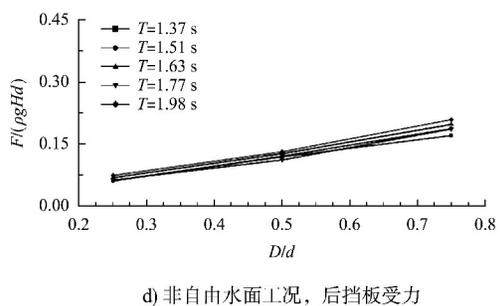
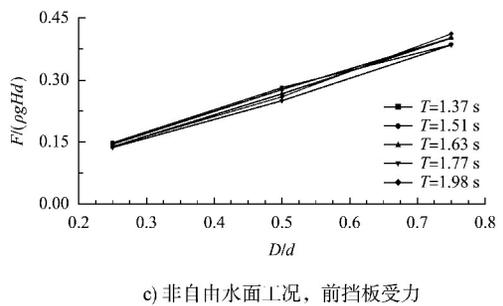
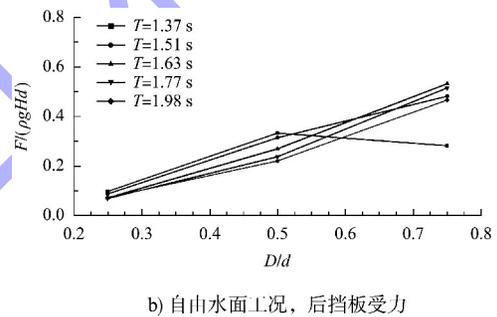
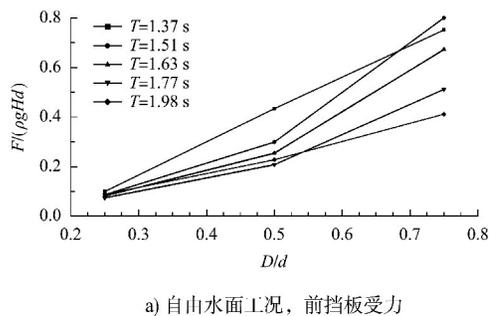
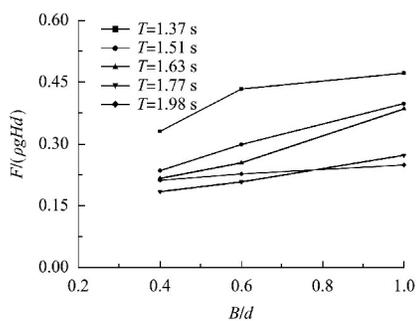


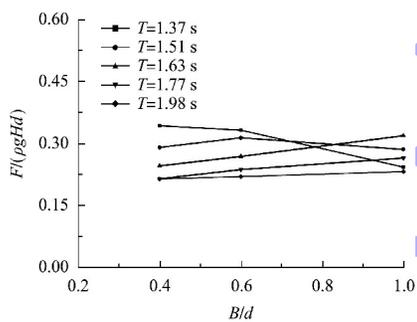
图 11 挡板受力大小随挡板相对入水深度  $D/d$  的变化趋势  
Fig. 11 Variation trend of force on baffle with relative depth of baffle into water  $D/d$

### 4.2.3 相对堤宽对挡板受力的影响

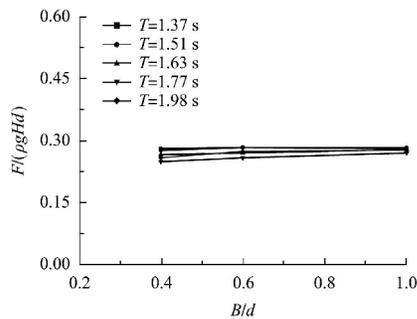
$D/d=0.50$  时, 自由水面和非自由水面工况下, 前、后挡板受力大小随相对堤宽变化的趋势见图 12。总体来说, 随相对堤宽的变化对非自由水面工况下前、后挡板所受水平波浪力的影响十分有限。对于自由水面工况, 前挡板总体是随板宽增大而增大, 但增大幅度与波浪周期有关。而对于后挡板, 波浪周期的影响更明显, 小周期时, 受力甚至会随板宽增大而减小。这主要是由于板宽变化引起两板间水动力变化, 进而改变前挡板后侧和后挡板前侧受力。



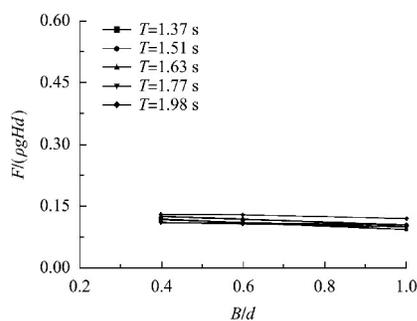
a) 自由水面工况, 前挡板受力



b) 自由水面工况, 后挡板受力



c) 非自由水面工况, 前挡板受力

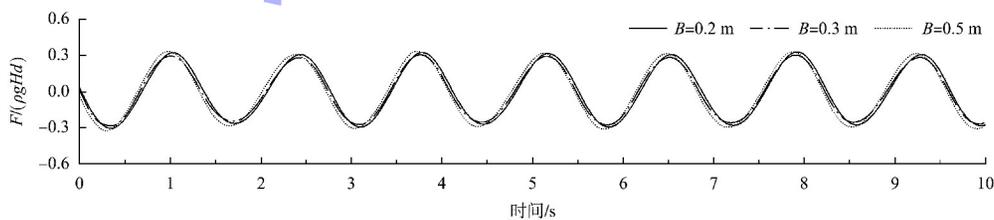


d) 非自由水面工况, 后挡板受力

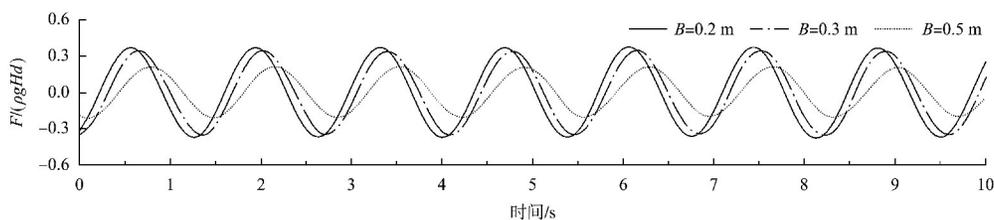
图 12 挡板受力大小随相对堤宽  $B/d$  的变化趋势

Fig. 12 Variation trend of force on baffle with relative width  $B/d$

自由水面工况下, 前挡板  $D/d$  为 0.50、入射波周期  $T$  为 1.37 s 时, 不同堤宽下前挡板迎浪面和背浪面受力历时曲线见图 13。可以看出, 不同堤宽条件下, 前挡板迎浪面所受水平波浪力的大小和相位几乎相同, 而背浪面受力历时曲线的相位也会受相对堤宽大小的影响, 这种变化会进而影响前后挡板总力的变化。



a) 迎浪面受力



b) 背浪面受力

图 13 不同堤宽条件下前挡板受力大小历时曲线对比

Fig. 13 Comparison of time history curves of force on front baffle with different breakwater widths

## 5 结论

1) 当双挡板间为非自由水面时,结构荷载受相对水深和堤宽影响较小,随入水深度增大而增大。

2) 当防波堤双挡板间的水面为自由条件时,防波堤水动力特性会改变,进而结构前挡板和后挡板的波浪荷载显著增大。

3) 在实际应用中,为发挥挡板透空防波堤的消浪效果,上部横板位置不宜过低。更多时双板间为自由水面,因此应重点关注该种情况。

## 参考文献:

- [1] URSELL F. The effect of a fixed barrier on surface waves in deep water [J]. Mathematical proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1947, 41(3): 374-382.
- [2] WIEGEL R L. Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier [J]. Journal of the waterways and harbors division, 1960, 86(1): 1-12.
- [3] 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.
- [4] 胡亚娟.波浪作用下挡板透空防波堤底部流场特性分析[D].大连:大连理工大学,2019.  
HU Y X. Bottom flow field analysis of baffle-type breakwater in wave action [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [5] WANG L X, DENG Z Z, WANG C, et al. Scattering of oblique water waves by two unequal surface piercing vertical thin plates with stepped bottom topography [J]. China ocean engineering, 2018, 32(5): 29-40.
- [6] 李爱军,刘勇.斜向波对开孔挡板防波堤作用的精确解析解[C]//中国海洋工程学会.第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上).北京:海洋出版社,2015:452-456.  
LI A J, LIU Y. Accurate analytical solution for the effect of oblique waves on perforated baffle breakwaters [C]// Chinese Ocean Engineering Society. Proceedings of the 17th China Marine (Shore) Engineering Academic Symposium (volume 1). Beijing: Ocean Press, 2015: 452-456.
- [7] MCLIVER R. Scattering of surface waves by two surface-piercing vertical barriers [J]. IMA journal of applied mathematics, 1985, 35: 1-17.
- [8] PORTER R, EVANS D V. Complementary approximation to wave scattering by vertical barriers [J]. Journal fluid mechanics, 1995, 294(1): 155-180.
- [9] NEELAMANI S, VEDAGIRI M. Wave interaction with partially immersed twin vertical barriers [J]. Ocean engineering, 2002, 29: 215-238.
- [10] 范骏,王宇楠,杨斯汉,等.双挡板透空堤透浪与反射系数实验研究[J].海洋工程,2011,29(4):60-67.  
FAN J, WANG Y N, YANG S H, et al. Experimental research on reflection coefficient and transmitted coefficient of double barriers penetrated breakwater [J]. The ocean engineering, 2011, 29(4): 60-67.
- [11] 冯卫兵,丁文林,叶小红.桩基挡板透空式防波堤透浪特性研究[J].水运工程,2014(3):62-67,79.  
FENG W B, DING W L, YE X H. Wave transmission coefficient of piled baffle penetrated breakwater [J]. Port & waterway engineering, 2014(3): 62-67, 79.
- [12] LI J, CHENG J, LIU S. An experimental study on the hydrodynamic performance of the twin vertical baffles underflow breakwater [J]. Ocean engineering, 2022, 256: 111566.
- [13] 防波堤与护岸设计规范:JTS 154—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.  
Code of design for breakwaters and revetments: JTS 154-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [14] 虞丹君,冯卫兵,李艳波,等.桩基双挡板透空式防波堤水平波压力试验与计算[J].水运工程,2015(1):19-24.  
YU D J, FENG W B, LI Y B, et al. Experimental study and calculation of horizontal wave pressure of piled baffle penetrated breakwater [J]. Port & waterway engineering, 2015(1): 19-24.
- [15] 尹亚军,郑城,许忠厚,等.桩基双挡板透空式码头水平波浪力试验研究[J].水道港口,2016,37(4):336-341.  
YIN Y J, ZHENG C, XU Z H, et al. Experiment study of horizontal wave force of piled double baffles permeable wharf [J]. Journal of waterway and harbor, 2016, 37(4): 336-341.