

· 综 合 ·



气囊型浮式防波堤挡浪消波的数值模拟^{*}

苏林王^{1,2}, 林欣然^{3,4}, 王雪刚^{1,2}

- (1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;
3. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;
4. 深圳市水务规划设计院股份有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 临时挡浪设施在海况较差的海域为施工船舶提供一定的避浪掩护时使用。气囊型浮式防波堤具有运输方便、投放便捷以及造价低廉的特点, 成为了首选的挡浪消波措施之一。通过调整网格划分方式、控制时间步长以及对自由液面网格局部加密等措施, 建立了稳定的数值波浪水槽。采用原物理模型试验比尺建立气囊型浮式防波堤的水动力模型, 并利用试验结果验证了数值计算方案的准确性。计算结果表明: 距离挡浪模型后 3 m 范围内的计算结果精确, 波高值误差在 1% 以内; 在该数值模拟方案下计算值随时间的变化规律与试验结果吻合得较好。该数值模拟方案具有可行性和有效性, 数值模拟结果具有较高的参考价值, 可以为后续各临时挡浪设施选型研究提供计算基础。

关键词: 浮式防波堤; 气囊; 挡浪; 消波; 黏性流

中图分类号: U 656. 6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0001-07

Numerical simulation of airbag type floating breakwater on wave blocking and wave elimination

SU Lin-wang^{1,2}, LIN Xin-ran^{3,4}, WANG Xue-gang^{1,2}

- (1.CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2.Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China; 3.College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4.Shenzhen Water Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Temporary wave blocking facilities are used to provide certain protection for construction ships with poor sea conditions. Airbag-type floating breakwater with convenient transportation, convenient delivery, and low cost has become one of the preferred wave blocking and wave elimination measures. A stable numerical wave flume is established by adjusting the grid division, controlling the time step, and encrypting the free liquid surface network. The hydrodynamic model of airbag type floating breakwater is established by using the same scale of the original physical model test, and the accuracy of the numerical calculation scheme is verified by the test results under the condition of the physical model test. The calculation results show that the calculation results within the range of 3 m after blocking the wave model are accurate, and the error of the wave height is within 1%. The variation law of the calculated value with time under the numerical simulation scheme is in good agreement with the test results. The numerical simulation scheme is feasible and effective, and the numerical simulation results have an available reference, which can provide a calculation basis for the subsequent research on the selection of various temporary wave containment facilities.

Keywords: floating breakwater; airbag; wave blocking; wave elimination; viscous flow

收稿日期: 2020-11-12

^{*}基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0805303); 广东省省级科技计划项目(2017B020221003)

作者简介: 苏林王(1979—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事结构工程和港口工程施工等方面的研究。

随着“一带一路”倡议的深入推进,我国对海洋的开发更加关注,把握“一带一路”沿线的海域情况,为沿线海洋工程的建设提出相应的工程对策在此背景下更具有战略意义。防波堤作为一种常见的消浪结构,起到了抵挡外海波浪入侵、保护港域内波浪平稳和船舶安全作业的作用。相较于传统的重力式防波堤,浮式防波堤的提出为海洋工程的初期建设提供了经济有效的临时掩护,其受到水深及海床条件的影响较小、环境友好、海水交换能力强、受潮汐变化影响小,由于这些优点受到了许多学者的关注。

王永学等^[1]系统地介绍了近四十年来国内外浮式防波堤结构的研究进展与工程应用情况。Rahman 等^[2]利用流体体积法建立了浮筒式系泊浮式防波堤在波浪作用下的非线性动力学模型,对防波堤表面因波浪作用而改变其位置的数值网格单元进行了处理,其所建立的数值模型能够较好地再现浮体的动力特性。刘崇期^[3]利用有限元和 VOF 方法对具有波浪能转换功能的圆柱形浮式防波堤进行数值模拟计算,并进一步研究了双圆柱形浮式结构在波浪作用下的运动响应。Tabatabaei 等^[4]利用数值方法比较了具有相似矩形截面和圆形截面的浮式防波堤透射系数,提出 3 个新的参数来表明浮式防波堤的消浪性能。Williams^[5]利用边界元法计算了一对矩形截面系泊浮式防波堤的波浪反射特性,利用格林函数对每个区域应用边界积分方程法,发现结构的波浪反射特性与浮筒的宽度、吃水和间距以及系泊索的刚度有很大的关系。毛伟清^[6]研究了浮式防波堤在规则波作用下的运动响应、消波性能、系泊缆绳的受力性能,并计算其在不规则波中的消波性能。郑艳娜等^[7]建立了浮式方箱的时域数值模型,分别在规则波和不规则波的工况下进行计算,提出了在长周期、大波高下的浮式防波堤设计标准。陈阳^[8]应用光滑粒子流体动力学方法 (SPH),基于悬链线方程理论建立了浮式防波堤与系泊系统耦合水动力数值模型。杨科^[9]采用物理模型试验探究浮式防波堤的运动响应、系缆绳的拉力以及水槽内波浪波幅的

变化情况,分析了堤宽比变化和网衣数量对方箱型浮式防波堤和双圆筒型浮式防波堤消浪效果和运动响应的影响。

综上所述,目前浮式防波堤挡浪消波效果研究多基于试验研究,而数值模拟多用于分析浮式防波堤在波浪中的运动响应和系泊系统的设计。本研究利用 STAR-CCM+,通过调整网格划分方式、控制时间步长以及对自由液面网格局部加密等措施,建立稳定的数值波浪水槽。采用原物理模型试验比尺建立水动力模型,利用试验的两种工况下结果验证了使用黏性流方法数值计算浮式防波堤挡浪消波效果的准确性。

1 数学模型

整个流场属于单相、三维、黏性和非定常的不可压缩流体流动,对于湍流的模拟采用雷诺平均方法,在空间固定坐标系下,控制方程为如下连续性方程和动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

式中:引入了求和约定符号,其中 u_i 、 u_j 分别为流体速度沿 i 、 j 方向的分量; x_i 和 x_j 分别为空间坐标沿 i 、 j 方向分量; $i, j = 1, 2, 3$; ρ 为流体密度; t 为时间; p 为压强; μ 为流体动力黏性系数。

2 数值方法

2.1 模型参数

模型试验在某拖曳水池完成,采用波浪周期为 5~8 s、波高为 1~2 m 的规则波,试验主要探究适合于短期施工使用的浮式消波装置在不同波高、周期条件下的消波效果。模型装置的几何比尺为 20,模型呈近似圆柱状结构,采用轻质柔性材料制作而成,直径 0.4 m、长 4 m,试验过程中气囊充水至刚性状态。模型装置迎浪横向布置,波高仪 1 和波高仪 2 分别设置在装置背浪向中轴线后 3、5 m 处,模型试验布置见图 1。试验波浪

参数见表 1。

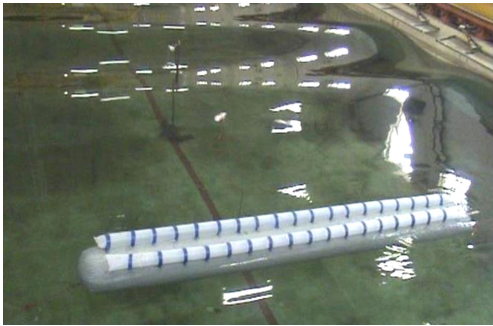


图 1 试验模型

表 1 试验波浪参数			
试验周期/s	试验波高/m	原型周期/s	原型波高/m
1.342	0.050	6	1.0
1.342	0.075	6	1.5
1.342	0.100	6	2.0
1.342	0.150	6	3.0
1.118	0.075	5	1.5
1.565	0.075	7	1.5
1.789	0.075	8	1.5

2.2 数值水池设置

STAR-CCM+提供了边界造波和消波阻尼模块，其中速度入口式的边界可设置一定波高、波周期、流速、风速下的规则波和经典波浪谱的不规则波(P-M 谱和 Jonswap 谱)。

本数值水槽计算尺寸与模型试验尺寸基本保持一致，为节省计算量和计算时间，水槽侧壁采用对称边界，数值水槽计算域长 20 m、宽 5.4 m、高 2 m、深 1.5 m。设定入口造波边界为速度入口边界，出口边界为压力出口边界，采用一阶斯托克斯波作为造波模型，模拟规则波的波浪场。为避免出口边界处的虚假波反射，可通过对水质点在垂直方向的运动施加阻力来产生波阻尼，消波区域一般取计算工况的 1~2 倍波长，本研究在压力出口边界设置长度为 4 m 的波浪阻尼。

采用切割体网格生成器进行分割，并在自由液面区域进行网格加密，在出口边界局部粗糙化网格，以保障计算稳定性和计算速度。计算采用流体体积法(volume of fluid,VOF)捕捉自由液面的运动状态；湍流模型采用雷诺平均纳维-斯托克斯

方程。通过网格收敛性分析，数值水槽的网格数在 5 万左右时可以获得较为稳定的波浪场，网格划分见图 2。

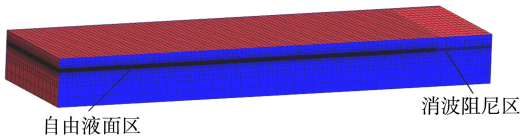


图 2 数值水槽网格划分

沿波浪传播方向设置 5 个虚拟波高仪记录自由液面变化情况以验证数值水槽模型建立的准确性。在水槽宽度中点距速度入口 5、7、10、12、14 m 处设置虚拟波高仪 1~5，波高仪位置见图 3。经检验各虚拟波高仪位置处在 35 s 内波浪最大衰减幅度仅为波高的 4.08%，数值模拟结果与理论解吻合得较好，即在该网格划分密度及时间步长等计算参数设置下可以获得稳定的波浪场。

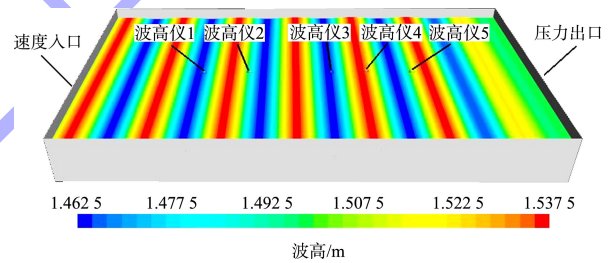


图 3 初始化波面位置及波高仪位置

2.3 计算区域和边界条件

选取物理模型试验中波高为 0.075 m 且周期为 1.118、1.342 s 两种工况下的试验结果对数值模拟方案进行有效性验证。由于挡浪模型对称分布，为节省计算资源，计算域一侧取对称边界。由于挡浪模型为横向迎浪布置，模型前波浪反射较为严重，为避免模型前波反射影响到入口边界造波，模型至入口边界距离取 3 倍波长。为减少计算域出口处的波浪反射，设置长度为 1.5 倍波长 L 的波阻尼。计算域的宽度和高度设置与试验水槽尺寸相同。由于试验中水-气囊挡浪模型在这两种工况下的运动幅度可忽略不计，故此处假设挡浪模型横向纵向无运动以平衡计算性能。气囊型浮式防波堤模型各参数均采用试验模型参数，挡浪模型计算域、边界条件设置见图 4。

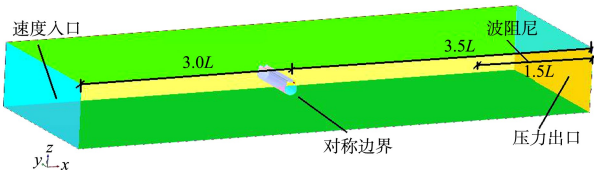


图 4 气囊型浮式防波堤模型计算域及边界条件设置

2.4 网格划分

利用软件自带的网格划分技术，采用切割体网格和棱柱层网格生成器，通过网格表面重构以获得更好的网格。自由液面区域及消波区域的网格控制方式与数值模拟水槽的网格控制相同，并在挡浪模型表面设置局部网格划分控制，使得网格划分精度能精确捕捉波高和波长在波浪运动过程中的变化。棱柱层网格设定以满足挡浪模型表面旋涡典型雷诺数 y^+ 值的最终计算结果在 30~300 (无量纲) 范围内为宜，模型最终网格划分结果见图 5。

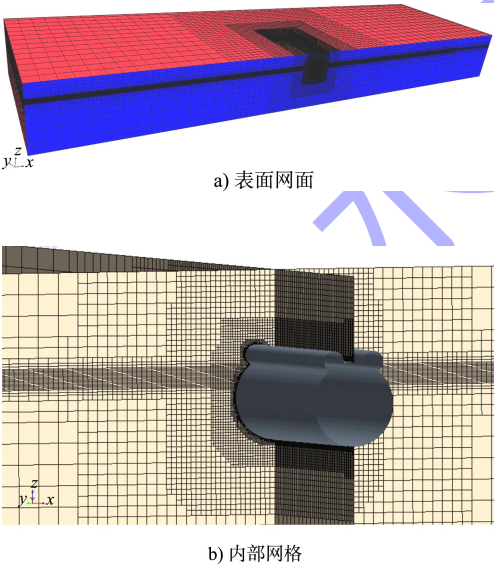


图 5 计算域网格划分

3 数值计算和结果分析

3.1 数值求解

以有限体积法离散流体运动的控制方程和湍流方程，其中扩散项采用中心差分格式，对流项、湍流动能方程以及湍流耗散率方程采用二阶迎风

差分格式。综合考虑计算精度和计算时间，计算中选择 RNG $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型。速度、压力的耦合迭代采用 SIMPLEC 算法，采用自由液面的兴波 VOF 模型，采用非恒定迭代求解。

3.2 方法验证和结果分析

工况 1：波高为 0.075 m、周期为 1.118 s；工况 2：波高为 0.075 m、周期为 1.342 s。两种工况下进行挡浪模型横向迎浪放置状态水动力数值模拟计算，并分别提取挡浪模型中轴线后方 $D=3$ 、5 m 处波面随时间变化的历时幅值与试验数据进行对比。

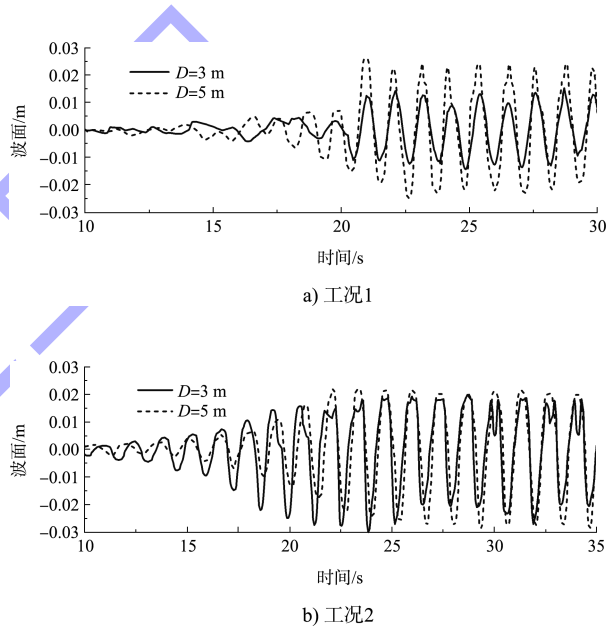


图 6 波面历时曲线

图 6 为两种工况下模型试验中挡浪模型中轴线后方 3、5 m 处波高仪记录的波面历时曲线。可以看出，试验进行至 20 s 后波幅达到比较稳定的状态。在波高不变的条件下，随着周期增加波浪幅值有所增大，其中距挡浪模型轴线后 3 m 处的波幅随周期增长较为明显，且当波浪周期为 1.342 s 时，距离为 3 m 和 5 m 处的波浪幅值变化差异不大。取试验进行 20 s 后的波高仪数据与数值模拟结果数据进行模型有效性验证，结果见图 7 和表 2。

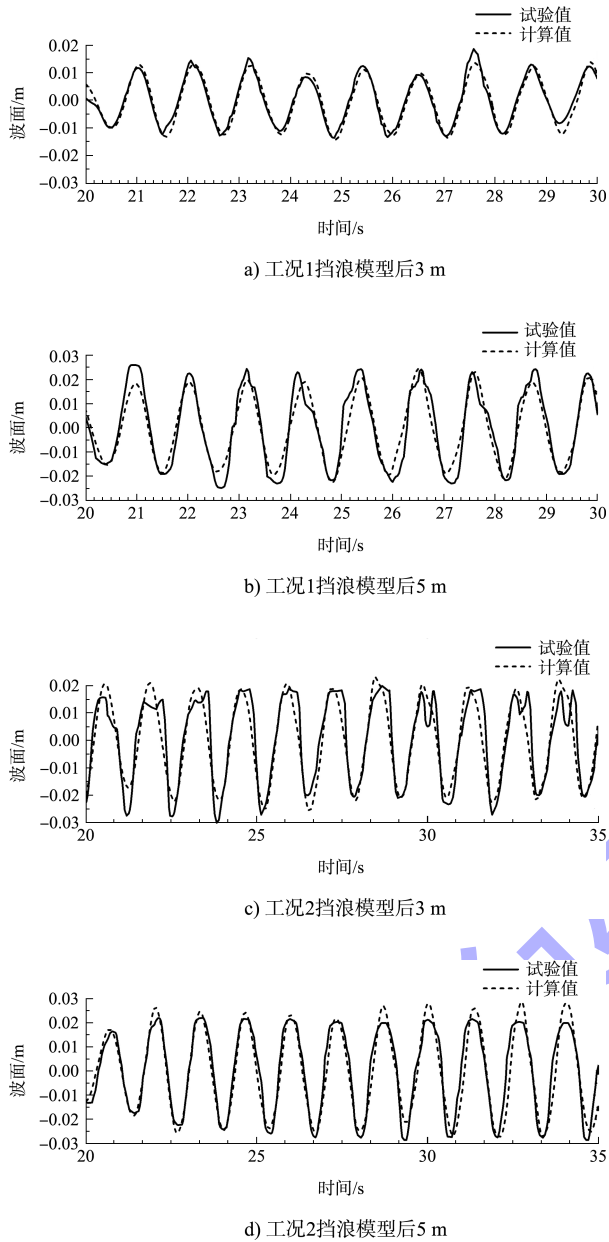


图 7 不同位置波面历时幅值

表 2 模型试验和数值模拟波高结果

工况	D/m	试验值/m	计算值/m
1	3	0.025 1	0.024 9
	5	0.045 3	0.040 0
2	3	0.042 0	0.042 2
	5	0.048 4	0.049 1

由数值模拟和模型试验结果对比可知,在该数值模拟方案下计算幅值随时间的变化规律与试验结果吻合得较好,各位置点计算波峰和波谷值与试验波高仪测量值相近。随着时间的增加,波浪会呈现不同程度的衰减,计算值与试验值也有

所偏差。距离挡浪模型后 3 m 处的计算结果精确,波高值误差在 1% 以内,相较于 5 m 处更符合试验结果。这是由于距离挡浪模型越近,造波处初始化波浪至计算点处的波浪传播时间也越短,受到的扰动也越少所造成的。在波浪模型形成稳定波浪场后,计算稳定后的波高值与各位置计算点历时幅值虽与试验结果有所偏差,但该误差处于可接受的范围内。

3.3 挡浪消波效果分析

浮式防波堤挡浪消波效果主要采用消波效率 ζ 来评价,其计算公式为:

$$\zeta = \left(1 - \frac{H_t}{H_i}\right) \times 100\%$$

(3)

式中: H_t 为透射波高; H_i 为入射波高。透射波高和入射波高均取浪高仪在波浪振荡稳定后的波高。模型的消波效率越高,其消波能力就越强。上述两种工况下挡浪模型后 3、5 m 处的消波效率见表 3。

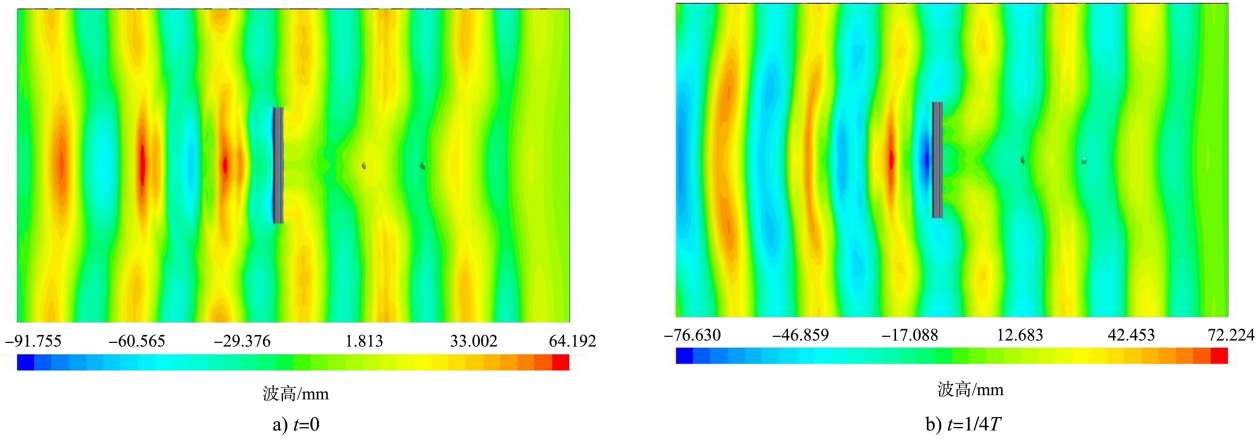
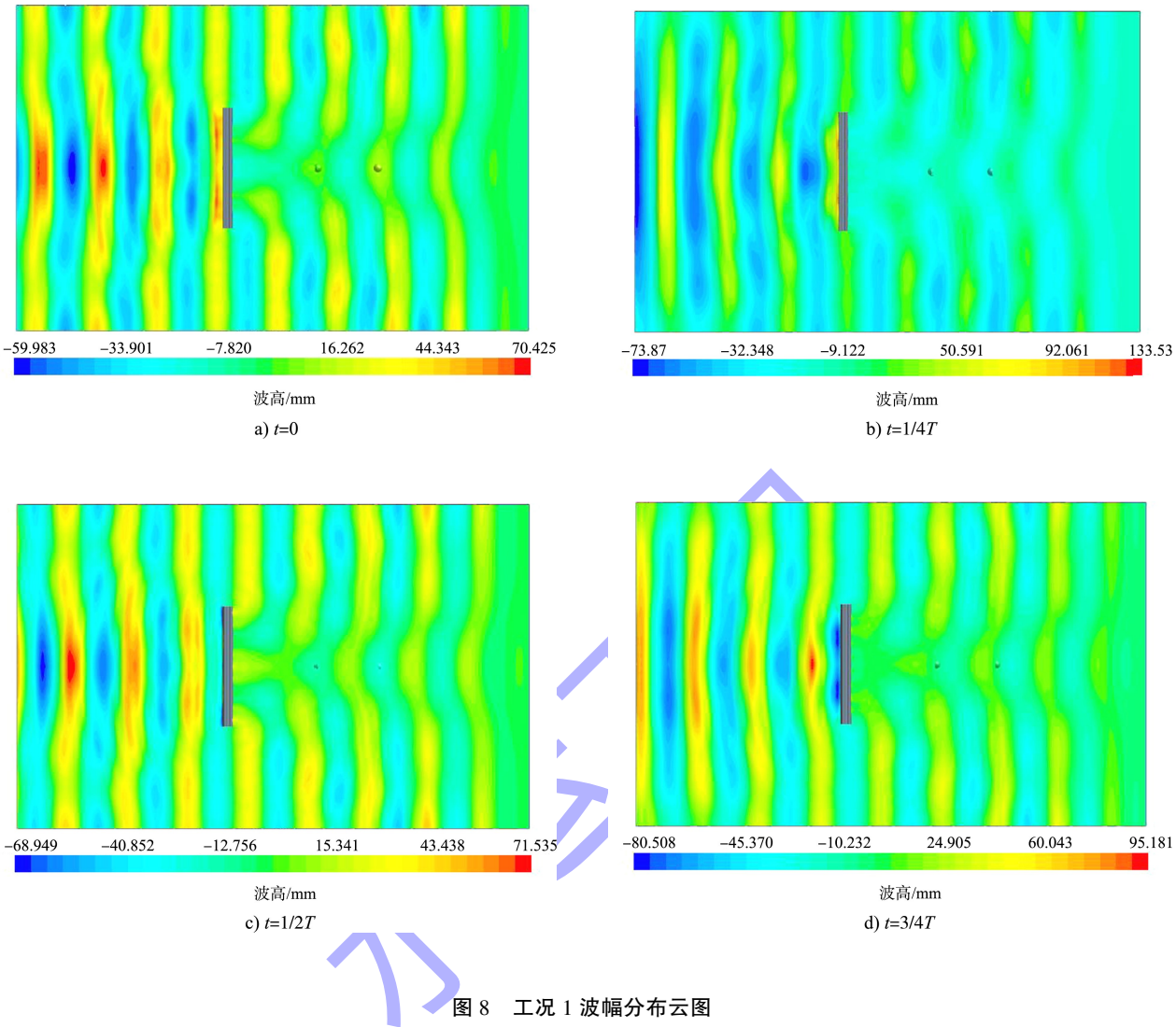
表 3 模型试验和数值模拟的消波效率

工况	D/m	试验值/%	计算值/%
1	3	66.53	66.80
	5	39.60	46.67
2	3	44.00	43.73
	5	35.47	34.53

表 3 为同一波高不同周期条件下模型的消波效率。在不同周期条件下,挡浪模型后 3 m 处的消波效率均大于挡浪模型后 5 m 处的;当周期为 1.118 s 时挡浪模型后 3 m 处的消波效率均大于 66%,随着波周期的逐渐增加,消波效率出现明显的降低;当波周期为 1.342 s 时,挡浪模型后 3 m 处的消波效率降低为 43% 左右;波周期对试验模型的挡浪效果影响较大。

3.4 流场分布特征

提取上述两种工况下在一个完整周期内波浪作用于挡浪模型的波面图,图中距挡浪模型后方 3 m 和 5 m 处设置了虚拟波高仪以记录波面历时波动情况,波高为 0.075 m 时,两种工况下的波幅见图 8、9。



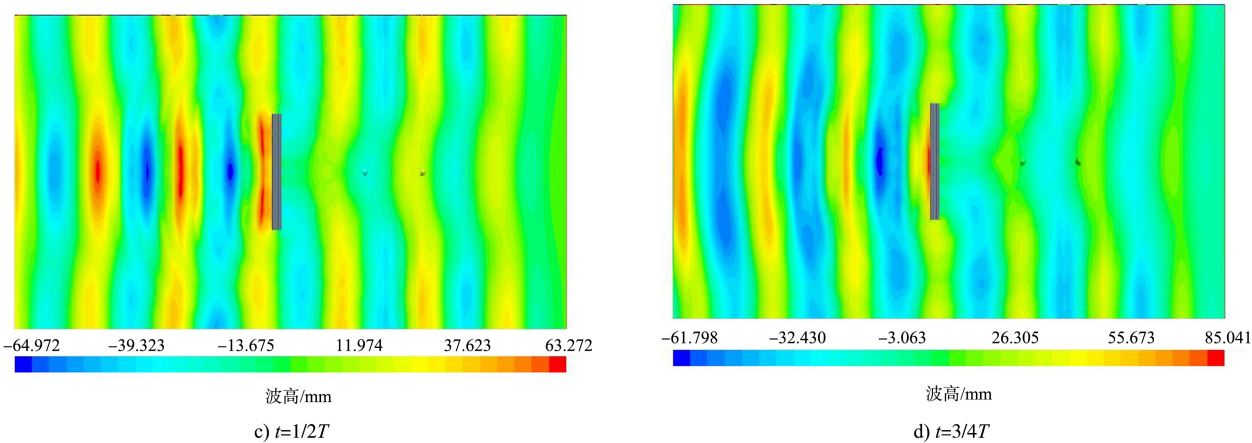


图 9 工况 2 波幅分布云图

由图 8、9 可知, 由于挡浪模型为横向迎浪布置, 挡浪模型前出现了较为明显的液面壅高的现象, 这是由挡浪模型前的反射波与入口边界形成的入射波叠加而形成的。距离入口边界处越近, 波面出现壅高的范围越大。当波浪传递至挡浪模型后方时, 挡浪模型中轴线波幅出现了明显的衰减, 该位置消浪效果最好。随着波浪的继续传播, 波幅逐渐增加, 波形逐渐平稳接近初始化波浪场的状态, 挡浪模型后方整体波高比模型前方要小, 挡浪效果较为明显。同时, 由两图对比可知, 周期越长, 挡浪模型前波浪反射越严重, 波浪穿透力也越强。在周期为 1.118 s 时挡浪模型后方掩护范围长度约为 3 倍波长, 而当周期为 1.342 s 时的模型掩护范围则在 2 个波长范围以内。且随着周期的增加, 挡浪模型在垂直波浪传播方向(y 向)的掩护范围也有所递减, 模型后方的透射波高有所增加。由此可知, 随着周期的增加(波长的增大), 同一波高同一挡浪模型在横向和纵向上的消浪效果均出现不同程度的衰减, 波浪周期对挡浪模型的消浪效果影响较大。

4 结论

1) 距离挡浪模型后 3 m 范围内的计算结果精确, 波高值误差在 1% 以内, 在该数值模拟方案下计算值随时间的变化规律与试验结果吻合得较好。

2) 该数值模拟方案具有可行性和有效性, 数值模拟结果具有较高的参考价值, 可以为后续各临时挡浪设施选型研究提供计算基础。

参考文献:

[1] 王永学, 王国玉. 近岸浮式防波堤结构的研究进展与工程应用[J]. 中国造船, 2009, 43(S1): 314-321.

[2] RAHMAN M A, MIZUTANI N, KAWASAKI K. Numerical modeling of dynamic responses and mooring forces of submerged floating breakwater [J]. Coastal engineering, 2006, 53(10): 799-815.

[3] 刘崇期. 兼具波浪能提取功能的浮式防波堤性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.

[4] TABATABAEI S M R, ZERAATGAR H. Parametric comparison of rectangular and circular pontoons performance as floating breakwater numerically [J]. Polish maritime research, 2018, 25(s1): 94-103.

[5] WILLIAMS A N, LEE H S, HUANG Z. Floating pontoon breakwaters[J]. Ocean engineering, 2000, 27(3): 221-240.

[6] 毛伟清. 浮式防波堤的研究[J]. 中国造船, 1994(4): 49-56.

[7] 郑艳娜, 彭海婷, 陈昌平. 不规则波对方箱浮式防波堤作用的数值模拟[J]. 水运工程, 2015(7): 14-19.

[8] 陈阳. 岛礁地形影响下浮式防波堤运动响应特性及消波效果研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.

[9] 杨科. 含网衣浮式防波堤水动力性能分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.

(本文编辑 武亚庆)