



长周期波浪下双浮箱浮式防波堤消浪性能*

王曦巍¹, 李 军¹, 陈嘉禹², 季超群², 张金凤^{2,3}

(1. 中交(天津)疏浚工程有限公司, 天津 300450;

2. 天津大学, 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;

3. 中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室(天津大学), 天津 300350)

摘要:长周期波作用下浮式防波堤消浪性能的研究对于浮式防波堤的工程应用起着重要作用。基于开源软件 OpenFOAM, 采用 RANS 方程和 SST $k-\omega$ 紊流模型模拟流场, 通过重叠网格方法实现波浪-浮式防波堤相互作用的模拟。移植并应用 MOODY 程序库, 构建二维流固耦合双浮箱数值波浪水槽模型。通过已有物理模型进行验证, 证明模型的可靠性。进而开展单双浮箱消浪性能对比研究, 分别研究波高、浮箱个数、浮箱间距和锚链刚度对浮箱消浪性能的影响。得出结论: 1) 波高增加时浮箱消浪性能提高; 2) 为提高消浪性能, 应尽可能采用双浮箱(或者多浮箱)缩短浮箱间距; 3) 增加锚链刚度也可以提高浮箱的消浪性能。

关键词: 浮式防波堤; OpenFOAM 数值模拟; 数值波浪水槽; 流固耦合; 透射系数

中图分类号: U 656

文献标志码:

文章编号: 1002-4972(2021)08-0008-05

Wave dissipation performance of double pontoon floating breakwater under long-period wave

WANG Xi-wei¹, LI Jun¹, CHEN Jia-yu², JI Chao-qun², ZHANG Jin-feng^{2,3}

(1. Tianjin International Marine Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China; 2. State Key Laboratory of

Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Key Laboratory of Earthquake

Engineering Simulation and Seismic Resilience of China Earthquake Administration, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Research on the wave dissipation performance of floating breakwater under long-period wave plays an important role in the engineering application of floating breakwater. Based on the open-source OpenFOAM, the RANS equation and SST $k-\omega$ turbulence model are used to simulate the flow field, and the overset method is used to simulate the interaction between wave and a floating breakwater. By transplanting and applying the MOODY library, a two-dimensional fluid-solid coupling double-pontoon numerical wave flume model is constructed. Through the verification of the existing physical model, the reliability of the model is proved. Then the comparative study on the wave dissipation performance of single-pontoon and double-pontoon is carried out, so the influence of wave height, number of floating breakwaters, the distance of floating breakwaters, and anchor chain stiffness on the wave dissipation performance of floating pontoon is studied respectively. It is concluded that: 1) When the wave height increases, the wave dissipation performance of the floating pontoon will be improved. 2) To improve the wave dissipation performance, double-pontoon(or multiple pontoons) should be used as much as possible to shorten the spacing of the floating pontoons. 3) Increasing the stiffness of the anchor chain can also improve the wave-eliminating performance of the floating pontoons.

Keywords: floating breakwater; OpenFOAM numerical simulation; numerical wave tank; fluid-structure coupling; transmission coefficient

收稿日期: 2020-11-23

***基金项目:** 国家自然科学基金联合基金重点项目(U1906231); 天津市自然科学基金重点项目(18JCZDJC40200)

作者简介: 王曦巍(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事疏浚工程技术工艺研究工作。

传统防波堤一般分为直立堤和斜坡堤两类, 是隔离港池区域和外海地区、保护港口免受波浪破坏的重要港工建筑物。近年来, 新型浮式防波堤因其安装方便、允许水体交换、大幅降低建造成本的优点, 在港工领域被越来越广泛运用。毛里塔尼亚西海岸长期受到波长为 7~18 s 长周期涌浪的侵袭, 杨宪章^[1]在毛里塔尼亚友谊港进行原位观测和室内模型试验, 其原位观测发现, 波浪周期较长时, 即使波高仅有 0.3~0.4 m 也会使得万吨货轮产生巨大动摇。由于岸线较长, 考虑到成本问题难以进行大规模的传统防波堤的建造, 因此为解决毛里塔尼亚综合港的波浪侵扰问题, 选择新型浮式防波堤。

国内外对物理模型水槽和数值模型水槽的浮式防波堤消浪性能有不少研究。Koraim^[2]建立规则波物理模型研究浮箱消浪性能, 得出透射系数随浮箱相对宽度变化的基本规律。向美焘^[3]分析了方箱式防波堤消浪过程原理及透射系数与波长、浮箱倒角等参数的关系。但是长周期波与一般的短周期涌浪和风浪不同, 波高不高, 但波长很长、波速较快, 具有极强的穿越浮式防波堤类的透浪防波堤的能力, 因而浮式防波堤在减少长周期波危害方面往往容易失效^[4-6]。

为解决浮式防波堤面对长周期波的失效问题, 针对毛里塔尼亚综合港的实际需要, 通过数值模型水槽, 模拟当地工况, 主要针对水深小、周期长的涌浪, 分析浮式防波堤的透射系数、运动响应和锚链张力。为找寻能最大限度降低波浪透射系数的浮式防波堤结构尺寸, 对主要影响参数进行控制变量研究, 为综合港的防浪需求提供有效数据。

1 数值模型

对于不可压缩黏性流体, Navier-Stokes 方程为流体的控制方程。本文选择雷诺时均 NS 方程为 RANS 方程(Reynolds-average Navier-Stokes equation), 作为流体数学模型的基本控制方程以便于紊流求解。RANS 方程的连续性方程和动量方程如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu + C\kappa \nabla \alpha - \nabla p_{rgh} - gh \nabla \rho \tag{2}$$

式中: \mathbf{U} 为流体的速度; t 为时间; ρ 为流体密度; μ 为流体动力学黏滞系数; C 为表面张力系数; κ 为界面处的曲率; α 为 VOF 方法中定义的体积分数; p_{rgh} 为流体的修正压强。

$$p_{rgh} = p - \rho gh \tag{3}$$

式中: g 为重力加速度; p 为总压强; h 为全局坐标系下的水深方向坐标值。

使用由 Hirt 等^[7]提出的自由表面追踪法 VOF (Volume of Fluid), 通过求解一个基于网格单元中流体的体积与网格单元本身体积的比值分数来确定自由表面的位置^[8-9]。

程序求解相分数主要通过几何重构法^[10-11]和代数法^[12-13], 此次试验采用 MULES 方法来求解相分数进而确定自由表面位置。

用来闭合 RANS 方程组的是由 Mente 提出的 $k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型, 对原有模型分别乘以一个混合函数之后相加, 得到 SST $k-\omega$ 两方程紊流模型。

用有限体积法 (FVM) 进行控制方程离散, 包括时间离散和空间离散。空间离散包括对流项、扩散项、梯度项和源项的离散。在离散之后代入式(2)中进行时间项的差分离散。

采用 PIMPLE 算法求解压力泊松方程。PIMPLE 的基本思想是时间步长内用 SIMPLE 稳态算法^[14]求解, 时间步长的步进用 PISO 算法^[15]来完成, 最终实现两种算法的结合。

使用流场精度和效率均较高的重叠网格方法。刚体运动求解, 首先要确定和求解各项自由度。本次试验考虑到计算量, 选用简化的二维数值波浪水槽, 所以参与分析的只有垂荡、纵荡和纵摇 3 个自由度。

浮箱运动方程基于牛顿第二定律。
缆绳求解使用 Palm^[16]开发的 MOODY 模块来进行。
造波和消波的求解器和边界条件选用 olaFlow, 造波方法选择速度入口造波。

2 模型验证

模型验证试验的设置参照文献[17]的单方箱锚链式浮防波堤水动力学特性试验。试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室长、宽、高

别为 23、0.8、0.8 m 的水槽中进行。实际试验中模型宽度仅为 0.44 m，是因为使用玻璃隔板将整个模型限制在宽度为 0.45 m 的区域内以防止运动受到宽度方向上壁面的影响。具体布置形式见图 1。

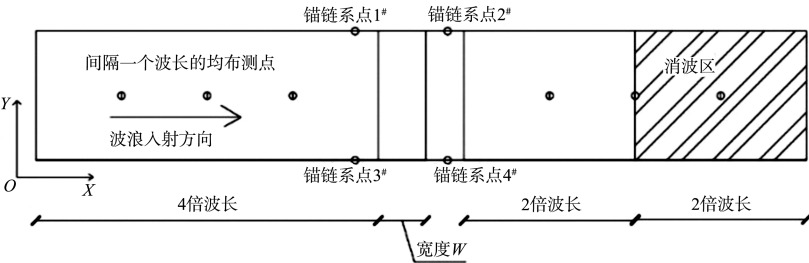


图 1 浮箱布置

因此本模型宽度选取为 0.44 m，采取二维形式，建立网格时在 Y 方向上设定为 1 个网格，并将前后面的边界条件设置为 empty 就能够等同于二维计算时宽度方向足够长的情况。

文献 [17] 的物理模型试验中波浪参数设置了两组波高：0.07、0.10 m，分别对应了 8 组和 6 组的周期变化，共 14 组试验，本文选取了 4 组

相同波高不同周期的试验进行验证。参照模型试验，将计算结果无因次化处理，换算为响应振幅系数 RAO(response amplitude operator)，即运动幅值与入射波高之比。

根据表 1 响应振幅系数值误差分析结果可得，试验值与模拟值的误差均在 4% 以内，响应振幅系数随相对宽度变化趋势吻合良好。

表 1 响应振幅系数值误差分析

分组	RAO(纵荡)			RAO(垂荡)			RAO(纵摇)		
	模拟值	试验值	相对误差/%	模拟值	试验值	相对误差/%	模拟值	试验值	相对误差/%
I	1.14	1.15	0.90	0.91	0.92	1.10	3.46	3.44	0.60
II	1.44	1.47	2.00	1.01	1.04	2.90	3.09	2.98	3.70
III	1.63	1.66	1.80	1.14	1.18	3.40	3.37	3.26	3.40
IV	1.70	1.71	0.60	1.22	1.24	1.60	3.79	3.71	2.20

图 2 中横坐标为浮箱宽度与入射波长的比值，即浮箱的相对宽度，可以看出本次模型验证试验与物理试验趋势相同，吻合程度较好，误差较小，小于 6%。

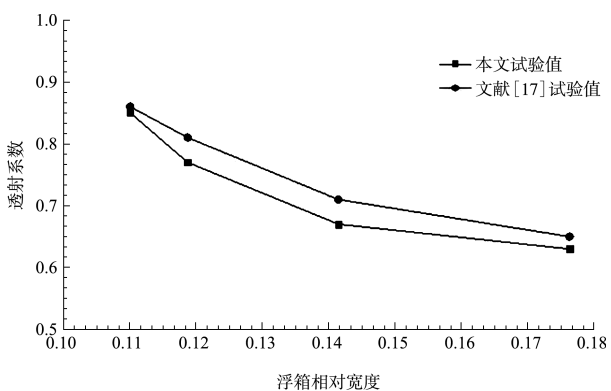


图 2 透射系数与浮箱相对宽度的关系

3 双浮箱浮式防波堤数值模拟分析

3.1 参数设置

3.1.1 浮箱参数设置

实际工程中，可能将集装箱改造成成为临时的浮箱用于消浪，选取标准集装箱的尺寸为 12.192 m（长）×2.438 m（宽）×2.896 m（高）。浮箱的消浪性能与其相对宽度正相关^[18]，因此浮箱数值模拟采用两个集装箱侧面拼接，模型浮箱宽度为一个集装箱宽度的 2 倍，便于计算取整为 4.8 m。锚链刚度为锚链弹性模量 E 与锚链截面面积 A 的乘积。

计算工况及模型参数为：模型高度 H、宽度 W、长度 L 分别为 2.88、4.80、0.44 m，模型质量 m 为 4561.92 kg，质心位置（距离底面）h 为

0.24 m, 模型吃水 d 为 2.16 m, 模型质量惯性矩 I 为 $18.42(\text{t} \cdot \text{m}^2)$, 锚链孔处夹角 α 为 60° , 锚链长度 l 为 5.09 m, 锚链刚度 EA 为 20.44 kN 或 204.40 kN(作为对照组), E 为锚链的杨氏模量, A 为锚链的截面积, 浮箱锚固点离地面锚固点水平距离 r 为 3.88 m。具体模型参数见图 3。其中, 浮箱长度方向为垂直纸面方向(Y 方向), 惯性矩 I 为浮箱对沿 Y 方向经过质心的惯性矩。双浮体受波浪作用运动见图 4。

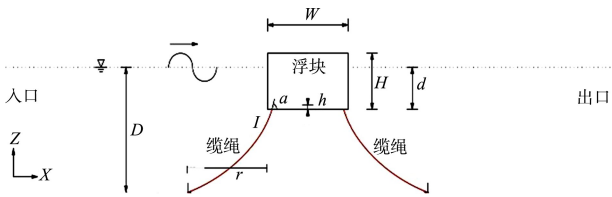


图 3 模型参数

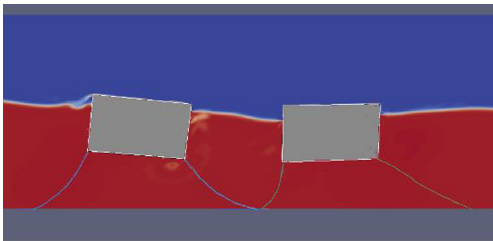


图 4 双浮体受波浪作用运动

3.1.2 波浪参数设置

2019 年 7 月对毛里塔尼亚综合港防波堤附近进行波浪观测, 防波堤外侧水深 5.1 m 处波高集中在 1.0~1.5 m, 周期集中在 7~8 s, 因此选取波浪参数设置: 水深 5.1 m, 浪高 1.4 m, 周期 7.5 s。

3.2 浮箱个数对透射系数、运动响应和锚链张力的影响

当锚链刚度不变时, 浮箱个数的增加也能够明显降低透射系数, 但降低幅度较小。见表 2。因此浮箱个数越多, 锚链刚度越大, 浮箱的消浪性能越好, 如果能将锚链刚度提高一个量级, 则效果明显好于增加一个浮箱。

对于锚链张力, 锚链的刚度越大, 最大锚链张力也越大, 因为大的锚链刚度对于浮箱的束缚能力更强。运动响应方面, 对于纵荡, 锚链张力较大组的纵荡值明显小于张力较小组。对于垂荡,

各组响应值并无明显规律。

表 2 浮箱个数和锚链刚度对透射系数和最大锚链张力的影响

浮箱个数	EA/kN	RAO			透射系数	最大锚链力/kN
		纵荡	垂荡	纵摇		
2	204.40	1.04	0.79	0.22	0.44	14.15
1	204.40	0.99	0.80	0.23	0.51	13.90
2	20.44	2.31	0.74	0.17	0.62	5.95
1	20.44	1.94	0.80	0.19	0.72	4.90

3.3 浮箱距离对透射系数、运动响应和锚链张力的影响

浮箱锚链刚度对于浮箱消浪性能的影响占主导地位, 锚链刚度较大组的消浪性能明显占优。浮箱锚链刚度相同时, 浮箱距离较近组的透射系数更小, 消浪性能更好。见表 3。

表 3 浮箱间距与锚链刚度对透射系数和最大锚链张力的影响

浮箱间距/m	EA/kN	RAO			透射系数	最大锚链张力/kN
		纵荡	垂荡	纵摇		
5.00	204.40	0.98	1.04	0.25	0.38	12.474
10.00	204.40	1.04	0.79	0.22	0.44	14.700
5.00	20.44	2.87	0.76	0.24	0.54	8.291
10.00	20.44	2.31	0.74	0.17	0.73	5.512

同时, 在锚链刚度为 20.44 kN 的条件下, 仅以浮箱距离为自变量, 计算结果见表 4。由此得知, 当浮箱间距逐步缩小时, 透射系数先是略微减小, 后减大幅度明显加大。因此在条件允许的情况下, 在合适范围内减小浮箱之间的距离有利于增强消浪性能。考虑到浮箱之间可能存在相互碰撞导致浮箱损坏, 浮箱间距不宜过小。

表 4 相同锚链刚度条件下不同浮箱间距对双浮箱透射系数的影响

浮箱间距/m	10.00	9.00	8.00	7.00	6.00	5.00
透射系数	0.73	0.71	0.71	0.66	0.59	0.54

3.4 波高对透射系数、运动响应和锚链张力的影响

设置浮箱间距为 10 m、浮箱锚链 EA 为 204.4 kN, 波高分别为 1.0 和 1.4 m, 浮箱分别为 1 个和 2 个, 共计 4 组算例(表 5)。对于透射系数, 单个浮箱条件下, 波高为 1.4 和 1.0 m 时, 透射系数分别为 0.51 和 0.60; 波高越大, 透射系数越小。波高越大, 透射系数越小, 说明波高越大经过浮式防波堤的作用后衰减效果更加明显。

表 5 同时给出了不同波高条件下的最大锚链张力。从表 5 可得,波高为 1.4 m 时,最大锚链张力明显大于波高为 1 m 的情况,说明波高的大小在某种程度上直接代表了波浪的破坏能力以及对港口建筑物可能施加的外力。浮箱个数多的一组的最大锚链张力更大,是由于双浮箱之间存在波浪反射,后浮箱对波浪的反射反作用到前浮箱,使得前浮箱在特定情况下锚链张力更大。

表 5 不同波高条件下透射系数和最大锚链张力比较							
浮箱 个数	波高/ m	RAO			透射 系数	堤后 波高/m	最大锚链 张力/kN
		纵荡	垂荡	纵摇			
1	1.40	0.99	0.80	0.23	0.51	0.71	13.90
2	1.40	1.04	0.79	0.22	0.44	0.62	14.15
1	1.00	1.38	0.90	0.28	0.60	0.6	11.30
2	1.00	1.46	0.96	0.25	0.45	0.45	11.90

4 结 论

- 1)基于数值波浪水槽,设置单双浮箱算例工况进行模拟。模拟结果表明,为提高消浪性能应尽可能采用双浮箱(或者多浮箱)、缩短浮箱间距,但浮箱间距不宜过近以免浮箱相互碰撞。
- 2)波高越大,浮箱浮式防波堤的透射系数越小,消浪性能越好。
- 3)经济允许下使用刚度更大的锚链能明显提高消浪性能,尤其当波高过大时刚度更大的锚链能明显提高安全性。

参考文献:

[1] 杨宪章.长周期波的特性及对系泊船舶动态特性的影响[J].港口工程,1989(6):37-43.

[2] KORAIM A S, RAGEH O S. Effect of under connected plates on the hydrodynamic efficiency of the floating breakwater[J]. China ocean engineering, 2014, 28(3): 349-362.

[3] 向美焘.矩形方箱浮式防波堤水动力特性数值模拟研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.

[4] 张大为.毛里塔尼亚友谊港介绍[J].天津航海,1997(2):

46-47.

[5] 刘晔.西部非洲强输沙率海岸特征及港口建设[J].港工技术,2019,56(4):25-30.

[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.

[7] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1):201-225.

[8] GOPALA V R, VAN WACHEM B G M. Volume of fluid methods for immiscible-fluid and free-surface flows[J]. Chemical engineering journal, 2007, 141(1):204-221.

[9] HENRIK R. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions[D]. London: University of London, 2003.

[10] ROENBY J, BREDMOSE H, JASAK H. A computational method for sharp interface advection[J]. Royal society open science, 2016, 3(11):160405.

[11] YOUNGS D L. Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion[M]. 1982:274-284.

[12] LAHEY R T. The simulation of multidimensional multiphase flows[J]. Nuclear engineering & design, 2005, 235(10/12):1043-1060.

[13] UBBINK O. Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces[D]. London: University of London, 1997.

[14] PATANKAR S V, SPALDING D B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows[J]. International journal of heat & mass transfer, 1972, 15(10):1787-1806.

[15] ISSA R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting[J]. Journal of computational physics, 1986, 62(1):40-65.

[16] PALM J. Mooring dynamics for wave energy applications[D]. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2017.

[17] 侯勇.单方箱—锚链式浮防波堤水动力特性试验研究[D].大连:大连理工大学,2008.

[18] 刘庆凯,纪巧玲,王钰.悬链式单浮箱防波堤水动力特性试验研究[J].水运工程,2020(1):23-28.

(本文编辑 武亚庆)