



波浪与水囊潜堤相互作用的数值模拟^{*}

王 臣¹, 杨志坚², 赵西增², 邱 俞³

(1. 舟山市港航工程规划设计院有限公司, 浙江 舟山 316000;

2. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山, 316021;

3. 舟山市普陀交通工程有限公司, 浙江 舟山 316100)

摘要: 基于黏性流体力学理论构建波浪与水囊潜堤相互作用的计算流体力学数值模型。利用高阶差分方法求解纳维-斯托克斯方程, 采用有限元方法求解结构动力学方程, 采用虚拟单元浸入边界法实现流体和固体求解器的高精度耦合求解。通过流体体积方法实现界面重构, 与试验结果比较验证模型的有效性。对规则波与不同充盈水囊潜堤相互作用进行数值模拟, 寻找合适的充盈度、探求其消波机制。结果表明: 1) 开发的数值模型可有效模拟波浪与水囊潜堤相互作用过程中的波浪变形和结构响应; 2) 非充盈柔性水囊潜堤的大幅度振动更易促使结构附近涡旋的演化与脱落, 并伴随着能量的耗散。

关键词: 潜堤; 水囊防波堤; 数值模拟; 浸入边界法; VOF(流体体积函数)方法

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0023-07

Numerical simulation of wave interaction with submerged fluid-filled membrane breakwater

WANG Chen¹, YANG Zhi-jian², ZHAO Xi-zeng², QIU Yu³

(1. Zhoushan Port and Waterway Engineering Planning and Design Institute Co., Ltd., Zhoushan 316000, China;

2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China;

3. Zhoushan Putuo Traffic Engineering Co., Ltd., Zhoushan 316100, China)

Abstract: A viscous flow-based computational fluids dynamics model is proposed for the treatment of the water wave and a submerged membrane breakwater interaction. The Navier-Stokes equation is solved using the high-order difference method, and the finite element method is used for the structural dynamics equations. A modified ghost-cell immersion boundary method is used to achieve high-precision coupled solution of fluid and solid solvers. The interface reconstruction is realized by the fluid volume method, and the validity of the model is verified by comparison with the experimental results. Numerical simulation of the interaction between regular wave and a submerged fluid-filled membrane breakwater with different filling degree is carried out to find the appropriate filling degree and explore the wave elimination mechanism. The results show that: 1) The numerical model developed can effectively simulate the wave deformation and structural response during the wave passing by the submerged fluid-filled membrane breakwater. 2) The large vibration of the inadequate submerged fluid-filled membrane breakwater is more likely to promote the evolution and shedding of vortices near the structure, and is accompanied by the dissipation of energy.

Keywords: submerged breakwater; water-filled membrane; numerical simulation; immersed boundary method; VOF (volume of fluid) method

收稿日期: 2021-04-09

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51979245)

作者简介: 王臣(1979—), 男, 高级工程师, 从事新型防波堤的设计研究。

防波堤是港口、海岸最常见的防护工程，具有防御波浪入侵、围护港池平稳和减少海岸侵蚀等功能。传统防波堤存在建造成本随水深大幅增加、安装和维护费用较高、影响近岸自然景观等问题，为此，新型防波堤的研究和设计应运而生，其中以橡胶袋装水类的潜堤为代表的新型柔性防波堤具有快速布置、建造成本低、后期维护方便和不影响水体交换等优点，引起了广泛的关注^[1]。

波浪与水囊结构相互作用是一个复杂的、涉及多相耦合的过程，存在结构的非线性变形和波浪破碎和漩涡脱落现象，因此波浪与水囊结构相互作用的理论推导研究不多见，主要集中在物理模型试验和基于势流理论的数值模拟方面。Cho 等^[2]在二维线性水弹性理论中，采用多域边界元方法得到了数值解，发现水下水平柔性薄膜防波堤对后方的掩护性能通常优于相应的刚性结构。Lee 等^[3]基于线性波理论和结构小幅度响应的前提下，利用最小二乘法建立了波浪与多排水垂直薄膜防波堤相互作用的水弹性分析模型，发现增大膜的张力会降低波浪的透射率。Broderick 等^[4]将水囊结构视为一个内部压力为常数、集中质量的系统，利用边界元理论耦合有限元的方法来模拟非线性波与充液膜相互作用问题。Phadke 等^[5]从圆柱壳理论出发，建立了一个分区边界元与有限元的耦合模型，研究了波浪与水囊潜堤相互作用的水动力特性。Phadke 等^[6-7]关注了波浪与水囊潜堤相互作用中的线性结构响应和共振现象，并考虑了膜结构的几何非线性变形，发现即使是相对较小的变形，几何非线性也很重要，膜几何非线性增加了系统的刚度，并在某些频率下引起迟滞响应。Das 等^[8]将分区边界元和有限元耦合模型扩展到三维，并与二维数值结果和 Ohyama 等^[9]的试验结果相对比，发现膜系统的共振现象抵消了入射波、降低了波的透射率，合适的膜内压力可以降低入射波频率范围内的透射波高。Li 等^[10]采用多极展开法和变量分

离法得到了波浪与半圆形水囊潜堤相互作用的理论解，研究水囊潜堤的形状和初始内压对水囊潜堤消波能力的影响，发现设计合理的水囊潜堤可作为一种有效的防波堤。Liu 等^[11]基于混合欧拉-拉格朗日方法建立了水囊潜堤与非线性波的相互作用耦合模型。

综上可知，相关研究主要基于势流理论，由于忽略了流体黏性的影响，对波浪破碎和漩涡脱落现象都未涉及，同时无法精确模拟强非线性波浪运动和结构的大幅运动响应，水囊潜堤消波特性的机理尚未清晰。本文将基于高阶有限差分法求解黏性流方程，采用有限元方法求解结构动力学方程，采用浸入边界法实现流体和固体求解器的耦合求解，构建黏性流数值波浪水槽，开展波浪与水囊潜堤相互作用的数值模拟研究。

1 数值模型

1.1 流场求解器

考虑流体为二维不可压缩的黏性流体，其控制方程由连续性方程和动量方程组成，具体形式如下：

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

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \tag{2}$$

式中： \mathbf{u} 为速度矢量； p 为压强； ρ 为流体密度； μ 为动力黏性系数； \mathbf{F} 为质量力。

本模型求解控制方程采用分步算法：1) 采用紧致插值曲线求解对流项，得到中间速度 \mathbf{u}^* ；2) 采用中心差分法求解非对流项 I 得到第 2 个中间速度 \mathbf{u}^{**} ；3) 最后利用 SOR (Successive Over-Relation) 算法进行压力-速度耦合，求解非对流项 II，得到速度解 \mathbf{u} 和压强解 p ，具体求解流程可参考文献 [12-13]。

1.2 结构求解器

结构运动是以位移为基本未知量的有限元法，待求解对象经过有限元离散、单元分析、系统组装和引入边界条件后，可得到结构运动控制方

程^[14], 表达式为:

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{S}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{S}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{S}=\boldsymbol{F}(t)$$

(3)

式中: \boldsymbol{M} 、 \boldsymbol{C} 和 \boldsymbol{K} 分别为质量矩阵(反映结构的质量分布特性)、阻尼矩阵(反映结构体在弹性状态下的耗能特性)和刚度矩阵(反映了结构的刚度分布特性); $\boldsymbol{F}(t)$ 为结构所受外部作用力; \boldsymbol{S} 为结构离散后单元节点位移, $\dot{\boldsymbol{S}}$ 和 $\ddot{\boldsymbol{S}}$ 则分别为节点的速度及加速度, 推导过程可参考文献[15]。

1.3 流固耦合

流固耦合采用改进的虚拟单元浸入边界法, 通过高阶插值赋予虚拟单元流体属性, 进而在流固边界设置不可穿透与无滑移条件, 实现流体和固体高精度耦合求解。改进的虚拟单元法插值方案见图 1, 该方法详细的推导和验证见文献[16-17]。

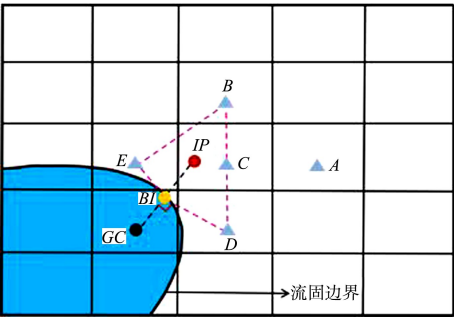


图 1 改进的虚拟单元法插值方案

本文流固耦合求解器由流场求解器(FDM)和固体结构求解器(FEM)组成, 其求解流程见图 2, 下标 n 表示当前时间步, \boldsymbol{S}^n 表示节点位移, $\dot{\boldsymbol{S}}^n$ 表示节点速度。在本文的流固耦合求解模型中, 结构物上的外力通过流场求解器获得的流场速度 u^n 和流场压力 p^n 获得, 进而求解结构物的动力响应。得到下一时刻的有限元节点的位移 \boldsymbol{S}^{n+1} 与速度 $\dot{\boldsymbol{S}}^{n+1}$ 。新的位移和速度, 通过虚拟单元插值, 更新下一时刻的固体边界条件。循环这个过程, 直至完成所有时间步的计算。

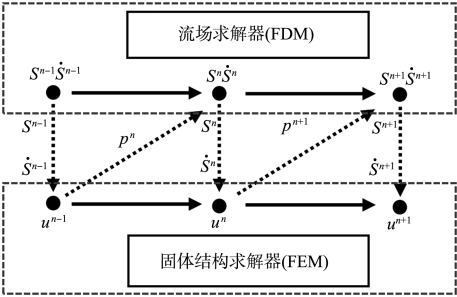


图 2 流固耦合求解流程

2 数值设置及验证

2.1 数值设置

波浪与水囊潜堤相互作用的试验在浙江大学紫金港校区的断面波浪数值水槽中进行, 参照试验布置, 数值波浪水槽设置见图 3, 其水囊潜堤结构模型位置、波面监测点的设置均与试验设置相似。数值水槽总长 34 m, 采用源造波法产生波浪, 源点设置在 $x=0$ m 处。在水槽左侧 $x=-8$ m 至 $x=0$ m 处和右侧 $x=18$ m 至 $x=26$ m 处为海绵层消波区, 可防止边界处的波浪反射; $x=0$ m 处为源项造波点, 可产生向左右两个方向传播的规则波, 水囊潜堤模型中心位于 $x=9$ m 处。水囊潜堤使用氯丁橡胶薄膜, 厚度为 1 mm, 弹性模量为 3 MPa, 密度为 1.24 g/cm³, 泊松比为 0.47。试验中采用高速相机和浪高仪, 分别布置了 4 个浪高仪, 具体位置如图 3 中 G1~G4 所示, 分别观测水囊结构的变形及波浪经过潜堤的变形问题。

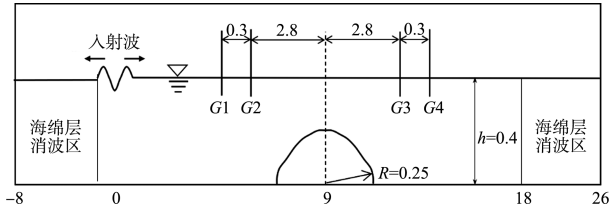


图 3 水囊潜堤的数值波浪水槽 (单位: m)

2.2 数值验证

图 4 表示水深 0.4 m、波浪频率 $f=0.7$ Hz 时预测得到的结构响应及波面与试验结果的定性比较验证, 分别考虑了刚体、完全充盈和未完全充

盈 3 种状态。可发现刚性水囊潜堤的数值计算结果在波面形态与试验吻合。充盈的柔性水囊潜堤的数值计算结果在波面形态和结构响应上，几乎完全与试验吻合。充盈度 85% 的柔性水囊潜堤数值计算结果在结构响应形状和幅度整体上与试验结果相比基本一致。

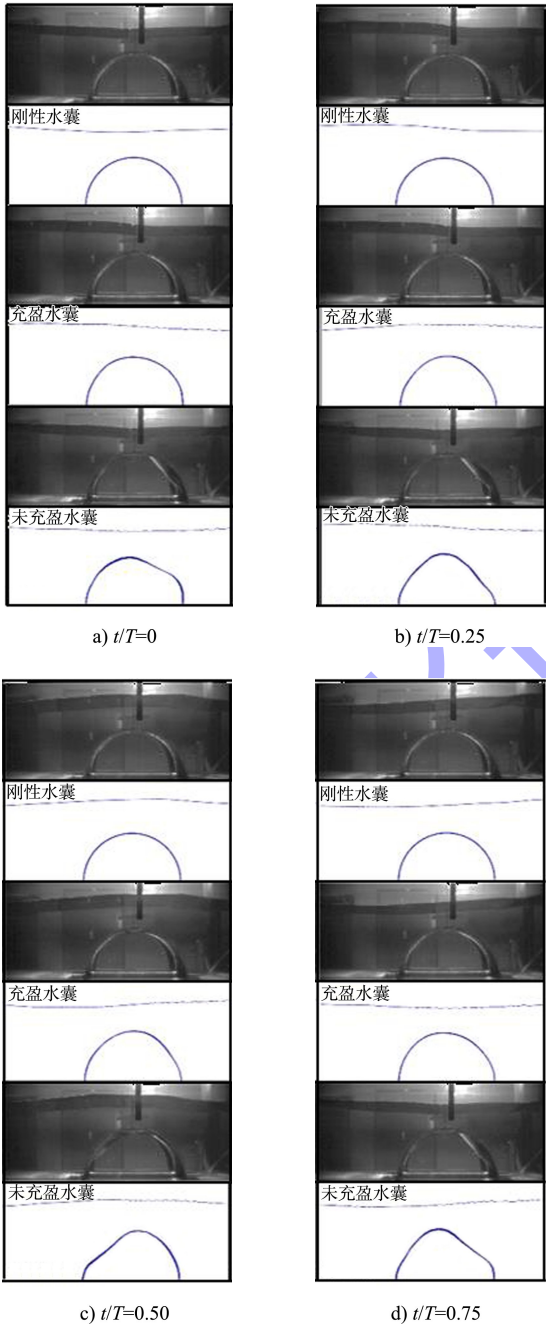


图 4 水深 0.4 m 波浪频率 $f=0.7$ Hz 试验与数模对比的结构响应

图 5 给出了试验中的波浪透射系数与数值计算结果的对比。对于波浪与不同类型的水囊潜堤

相互作用后的透射系数，数模计算结果和试验结果略有差异，特别是未充盈的柔性水囊潜堤，但趋势上吻合良好。这是由于波浪与未充盈的柔性水囊潜堤相互作用产生的强非线性耦合作用所致。通过对比水深 0.4 m 和水深 0.335 m 的透浪系数，发现水深 0.335 m 的数值对比结果的差异更大。这主要是由于水深 0.335 m 时产生了波浪破碎现象，且未充盈的柔性水囊潜堤的复杂的结构运动响应，强非线性的耦合作用进一步增强。

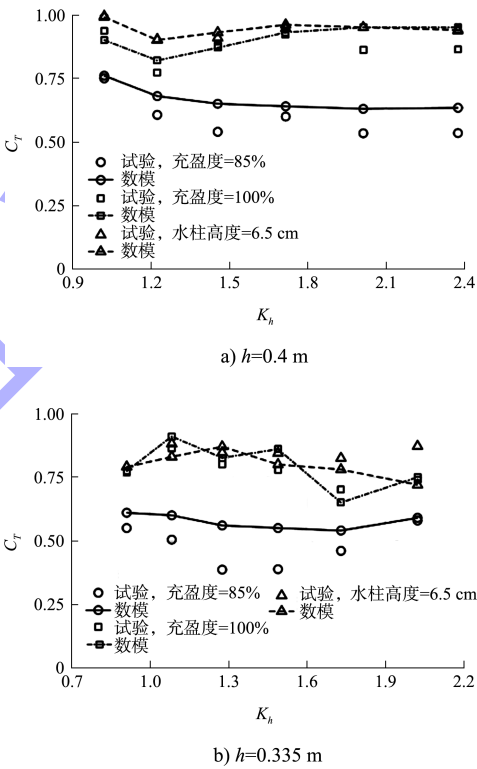


图 5 试验与数模对比的透射系数 C_T 随无量次水深 k_h 的变化

3 结果分析

3.1 充盈度变化对水囊潜堤消波性能的影响

图 6 为水深 0.4 m、波浪频率 0.7 Hz 不同充盈度下柔性水囊潜堤的结构变形。由图 6 可知，随着充盈度的减小，充盈的柔性水囊潜堤转变为未充盈的柔性水囊潜堤，柔性水囊潜堤的结构响应增大，充盈度 85%、80% 出现了大幅度的结构响应；当充盈度降低到 75% 时，未充盈的柔性水囊潜堤结构响应减小，不再出现大幅度的摆动，只在顶部左右摇摆；当充盈度降低到 70% 时，未

充盈的柔性水囊潜堤塌陷成充盈的柔性水囊潜堤, 柔性水囊潜堤的结构响应与充盈度 100% 的水囊相似, 此时冠层高度 (静水面到结构物顶点的竖向距离) 增大, 这表明在一定范围内减小充盈度可增大柔性水囊潜堤的结构响应, 未充盈的

柔性水囊潜堤的结构响应大于充盈的柔性水囊潜堤, 但充盈度减小过多会导致未充盈的柔性水囊潜堤塌陷成充盈的柔性水囊潜堤, 反而降低了水囊潜堤的结构高度。

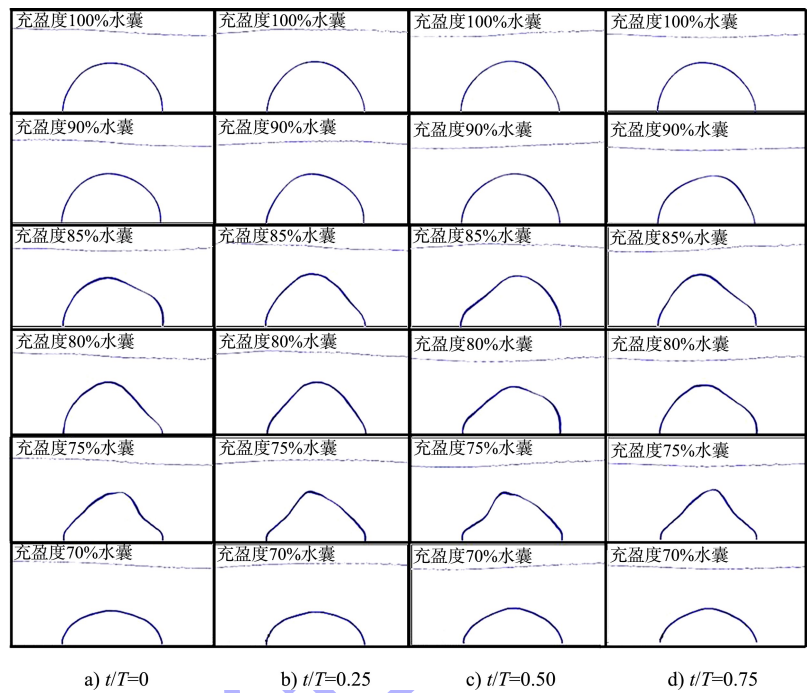


图 6 水深 0.4 m 不同充盈度下柔性水囊潜堤的结构响应

图 7 为不同充盈度下水囊潜堤的波浪透射系数, 可发现充盈的柔性水囊潜堤的透射系数最大, 消波性能最差; 充盈度 85%、80% 的柔性水囊潜堤透射系数相接近且最小, 消波性能最好; 充盈度 75% 的柔性水囊潜堤的透射系数高于充盈度 80% 的柔性水囊潜堤, 消波性能变差, 这是由于充盈度 75% 的柔性水囊潜堤结构响应减小, 不再出现大幅度的摆动, 只在顶部左右摇摆, 而水囊潜堤的结构响应与其消波性能相关, 因此其透射性能降低。充盈度 70% 的柔性水囊潜堤的透射系数与充盈度 100% 的水囊潜堤相接近, 这是由于充盈度 70% 的柔性水囊潜堤塌陷成充盈的柔性水囊潜堤的缘故, 冠层高度增加, 进一步降低了充盈的柔性水囊潜堤的消波性能。

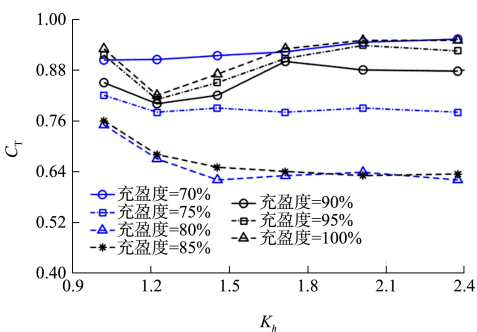


图 7 不同充盈度下水囊潜堤的透射系数

3.2 水囊潜堤消波机理

图 8 为波浪经过不同整体刚度水囊潜堤过程中的涡量场。由图 8 可知, 刚性水囊潜堤只在结构物附近产生少量涡量, 看不到尾涡的演化, 这些涡量是由于结构物的阻碍作用和浅水效应所致。相较于刚性水囊潜堤, 对于充盈的 (充盈度 100%

和充盈度 70%) 柔性水囊潜堤而言, 由于受迫微幅振动在结构物附近产生的涡量增加, 在结构物的背浪侧能明显看到一个完全发育的正涡, 但是漩涡基本不脱落, 充盈度 70% 的柔性水囊潜堤由于冠层高度增加, 漩涡演化位置相较于充盈度 100% 的柔性水囊潜堤出现上移现象。对于未充盈的柔性水囊潜堤而言, 相较于充盈度 100% 的柔性水囊潜堤, 充盈度 90% 的柔性水囊潜堤的尾涡发生了脱落, 表明其结构响应增强促进了漩涡的脱落; 充盈度 85% 的柔性水囊潜堤出现了大幅度的结构

响应, 产生的涡量最多, 在膜结构顶部能够观察到明显正涡和负涡交替脱落的现象, 并在结构物背浪侧能明显看到一个发育完全的正涡发生脱落; 充盈度 75% 的柔性水囊潜堤只在顶部左右摆动, 没有出现大幅度的运动, 其顶部会出现交替脱落的漩涡, 漩涡强度较小, 这表明涡量的演化与结构物的结构响应程度相关。此外, 由于柔性水囊潜堤受迫振动扰动水体, 在膜结构附近处不断产生涡量, 并传播到水面附近与入射波碰撞, 消散一部分波能。

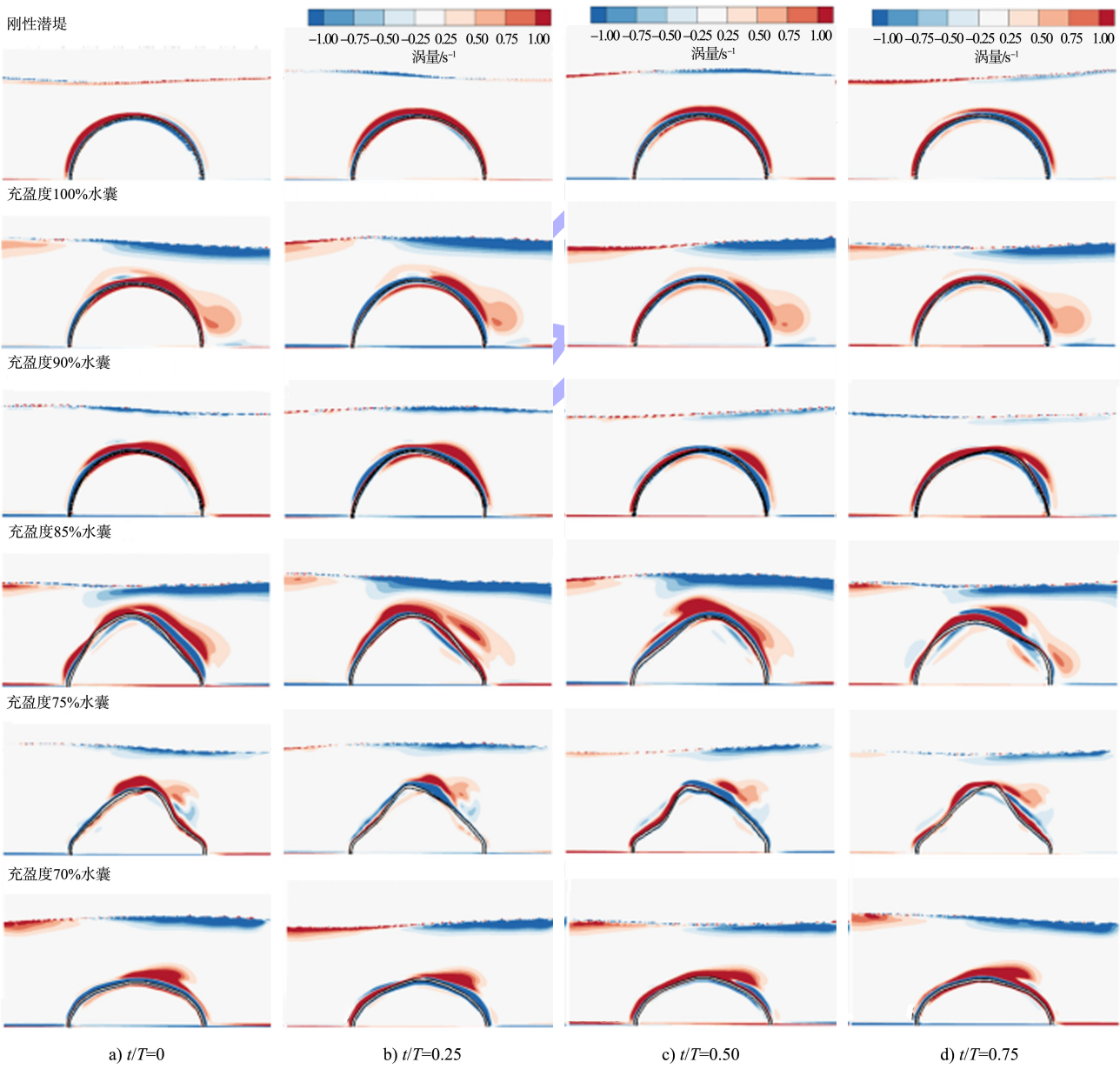


图 8 水深 0.4 m 涡量场的数值计算结果

4 结 论

- 1) 基于有限差分法与有限元法的耦合模型可有效模拟水囊潜堤的消波过程。
- 2) 合适的充盈度范围内, 未充盈的柔性水囊潜堤存在大幅度振动促进了尾涡的演化与脱落, 并且柔性水囊潜堤受迫振动扰动水体, 在膜结构附近处不断产生涡量, 消散了部分波能, 具有更好的消波效果。
- 3) 未完全充盈的潜堤可增大柔性水囊潜堤的结构响应, 未充盈的柔性水囊潜堤的结构响应大于完全充盈的柔性水囊潜堤, 但充盈度减小过多会导致未充盈的柔性水囊潜堤塌陷、降低消波效果。

参考文献:

[1] 陈本毅. 柔性水囊潜堤消波特性实验与数值研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020

[2] CHO I H, KIM M H. Interactions of a horizontal flexible membrane with oblique incident [J]. Journal of fluid mechanics, 1998, 367: 139-161.

[3] LEE W K, LO E Y M. Surface-penetrating flexible membrane wave barriers of finite draft [J]. Ocean engineering, 2002, 29(4): 1781-1804.

[4] BRODERICK L L, LEONARD J W. Nonlinear response of membranes to ocean waves using boundary and finite elements[J]. Ocean engineering, 1995, 22(7): 731-745.

[5] PHADKE A C, CHEUNG K F. The response of bottom-mounted fluid-filled membrane in gravity waves [J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 1999, 125(6): 294-303.

[6] PHADKE A C, CHEUNG K F. Resonance and response of fluid-filled membrane in gravity waves[J]. Applid ocean research, 2001, 23(1): 15-28.

[7] PHADKE A C, CHEUNG K F. Nonlinear response of fluid-filled membrane in gravity waves[J]. Journal of engineering mechanics,

2003, 129(7): 739-750.

[8] DAS S, CHEUNG K F. Coupled boundary element and finite element model for fluid-filled membrane in gravity waves [J]. Engineering analysis with boundary elements, 2009, 33(6): 802-814.

[9] OHYAMA T, TANAKA M, KIYOKAWA T. Transmission and reflection characteristics of waves over a submerged flexible mound [J]. Coastal engineering in Japan, 1989, 32(1): 53-68.

[10] LI A, LIU Y, LI H. Analysis of water wave interaction with a submerged fluid-filled semi-circular membrane breakwater [J]. Ocean engineering, 2020, 197: 106-118.

[11] LIU C, HUANG Z. A mixed Eulerian-Lagrangian simulation of nonlinear wave interaction with a fluid-filled membrane breakwater [J]. Ocean engineering, 2019, 178: 423-434.

[12] ZHAO X, YE Z, FU Y. A CIP-based numerical simulation of freak wave impact on a floating body [J]. Ocean engineering, 2014, 87: 50-63.

[13] ZHAO X, HU C. Numerical and experimental study on a 2-D floating body under extreme wave conditions [J]. Applied ocean research, 2012, 35: 1-13.

[14] 张亚辉, 林家浩. 结构动力学基础[D]. 大连: 大连理工大学出版社, 2007.

[15] 段松长. 基于 CIP 方法的流固耦合模型及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.

[16] ZHENG K, ZHAO X, YANG Z. Numerical simulation of water entry of a wedge using a modified ghostcell immersed boundary method [J]. Journal of marine science and technology, 2020, 25(2): 589-608.

[17] ZHENG K, ZHAO X. Numerical simulation of water entry of two-dimensional structures with complex geometry using a CIP-based model [J]. Applied ocean research, 2021, 106: 102379.

(本文编辑 武亚庆)

欢迎投稿 欢迎订阅