

# 新型复合软尾防波堤的 OpenFOAM 数值研究<sup>1</sup>

张崇伟<sup>2,\*</sup>, 庄乾泽<sup>2</sup>, HUANG Luofeng<sup>3</sup>, 宁德志<sup>2</sup>

(2 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

(3 Dept. of Mechanical Engineering, University College London, London WC1E 7JE)

**摘要:** 本文将透空防波堤与弹性薄板结构相结合, 提出一种新型复合软尾防波堤, 在透空防波堤防浪性能的基础上, 利用软尾结构实现对长波透射的抑制。基于开源软件 OpenFOAM 建立数值波浪水池, 利用双向流固耦合技术, 实现波浪与防波堤软尾结构相互作用的实时模拟。改变软尾结构的长度和刚度, 研究了不同波长条件下软尾防波堤的防浪性能与所受水动力情况。研究发现, 在本文所考虑参数范围内, 软尾结构可以有效减小波浪透射效应, 软尾刚度对透射性能影响较小; 软尾长度会影响防波堤箱体所受垂向动压力与水平波浪力的波动特性, 软尾结构的刚度则对防波堤箱体所受波浪力的影响较小。

**关键词:** 透空防波堤; 波浪透射; OpenFOAM; 流固耦合

## 1 引言

随着港口建设和海上资源开发逐步进入水深浪大的海域, 深水防浪结构的研发越发重要, 传统重力式防波堤受建造成本和水体交换等因素的制约, 难以适用于深水海域的防浪和环保需求。透空式防波堤<sup>[1]</sup>、浮式防波堤<sup>[2]</sup>和柔性防波堤<sup>[3]</sup>等新型防波堤形式, 逐渐受到人们重视。其中, 透空式防波堤可以在不大幅牺牲结构挡浪能力的前提下, 大幅降低建造成本且允许内外水体交换, 具有较高的环保性和经济性。

为提高透空式防波堤的消浪性能, 人们已开展了大量前期研究。例如, Brossard 等<sup>[4]</sup>在固定半浸没沉箱式防波堤的迎浪侧增加了吸收沉箱, 发现该设计可以有效提高结构反射波浪的能力, 并且与增加吸收沉箱的长度相比, 增加其浸没深度更有利于提高结构的防浪效果; Karthik Ramnarayan 等<sup>[5]</sup>研究了具有三种正面轮廓的桩承式防波堤模型, 通过规则波环境测试发现圆形与抛物线形相结合的防波堤形状更利于波能耗散; Koutandos 和 Prinos<sup>[6]</sup>在半浸没箱式防波堤前增加平板结构, 发现可以提高结构对入射波的衰减。

然而, 透空式防波堤对长周期波浪透射的抵御能力较差, 在不大幅增加防波堤尺寸和体积的前提下, 如何有效抑制长波的透射, 是透空式防波堤水动力研究的关键科学问题。Shugan 等<sup>[7]</sup>结合浅水模型和水弹性理论研究了弹性薄板的波浪透射特性, 发现板长大于波长时, 柔性薄板具有良好的消波效果, 但实际工程中弹性薄板在波浪环境下的安装和系泊存在很大困难。受此启发, 本文将透空防波堤与弹性薄板结构相结合, 提出一种新型复合软尾防波堤, 在透空防波堤防浪性能的基础上, 利用弹性薄板结构实现对长波透射的抑制。

本文基于开源计算流体力学软件 OpenFOAM, 建立数值波浪水池, 采用迭代算法实现弹性软尾与波浪波浪作用的双向耦合, 研究改变不同波长的波浪作用下, 软尾弹性模量与长度对箱型透空防波堤的波浪透射性能与所受波浪力的影响。

## 2 数学模型

本文将计算域分为流体域和固体域两部分。由于本文各工况的波浪雷诺数均小于临界雷诺数  $Re_{cr}=3000$ <sup>[8]</sup>, 且由各工况 KC 数可知, 粘性力较惯性力对防波堤的影响较小, 因此, 本文流体域采用二维不可压缩层流模型。流体域控制方程为 Navier-Stokes 方程组:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \nu \rho \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

<sup>1</sup>资助项目: 国家自然科学基金(51709038 和 51739010)、中国博士后科学基金(2019T120209)

第一/通讯作者简介: 张崇伟\*(1987-), 男, 博士, 副教授, 主要从事海洋工程水动力方面的研究。E-mail: chongweizhang@dlut.edu.cn

其中,  $\mathbf{v}$  是流体质点速度,  $P$  是流体压力,  $\rho$  是流体密度,  $g$  为重力加速度,  $\nu$  是流体运动粘性系数。在固体域中计算软尾的结构变形。基于小变形假设, 采用线性动量守恒定律描述软尾结构的弹性变形, 建立拉格朗日形式的数学模型:

$$\rho_0 \int_{V_0} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) dV - \oint_{S_0} \mathbf{n} \cdot (2\mu + \lambda) \nabla \mathbf{u} dS = \oint_{S_0} \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} dS + \rho_0 \int_{V_0} \mathbf{g} dV \quad (3)$$

其中, 下标 0 表示固体未发生变形时的物理量,  $\mathbf{u}$  是位移矢量,  $\mu$  和  $\lambda$  是拉梅常数,  $\mathbf{q}$  是由非线性项与位移分量项的耦合项组成的张量。

采用 VOF 方法捕捉气液两相流交界面<sup>[9]</sup>, 定义网格内液相体积分数  $\alpha$ , 网格内流体的速度、密度、动力粘性系数由液相和气相两部分物理量加权表示, 权重为  $\alpha$ 。借助开源波浪工具箱 waves2Foam 在速度入口处造波, 并在数值波浪水槽两端设置了松弛区以避免波浪在水池两端发生二次反射。在松弛区内借助空间加权因子  $\omega_R$ , 保证出入射波形与目标波形一致, 松弛区之外的波形则完全是由数值求解得到。

透空式防波堤箱体设为刚体。软尾与波浪的相互作用则通过双向隐式流固耦合算法实现<sup>[11,10]</sup>, 求解流程如图 1 所示。利用前一时间步得到的固体位移, 求解网格运动方程并更新流体域网格; 计算流体域压力场和速度场, 得到流体作用于固体表面的载荷分布; 然后求解固体运动方程, 得到新的固体位移。如果两次固体位移之差小于设定值, 则认定该时间步计算收敛, 并进入下一时间步, 开始新一轮迭代求解; 如果计算不收敛, 则将新的固体位移作为初始值继续迭代求解, 直至收敛。

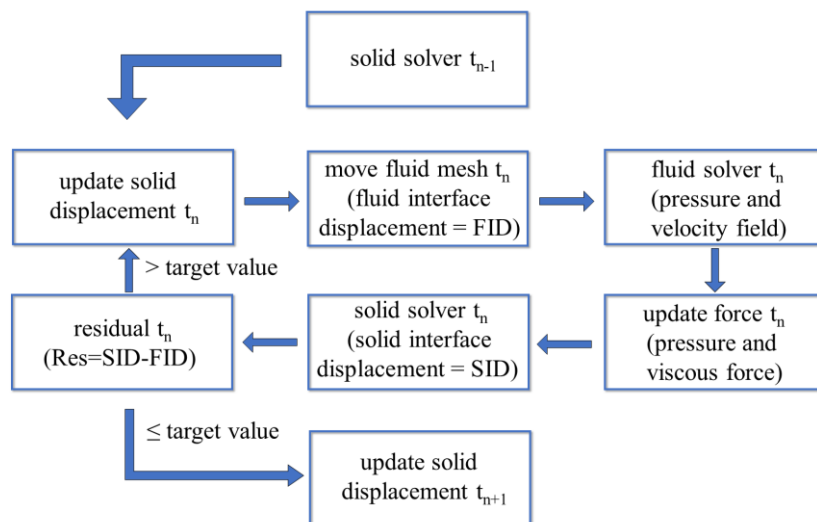


图 1 双向流固耦合运算流程

### 3 模型设置

参照 Brossard 等<sup>[4]</sup>实验模型设置数值波浪水槽几何参数。计算域设置如图 2 所示。在水槽左下角设直角坐标系  $Oxy$ , 使  $x$  轴正方向水平向右,  $y$  轴正方向垂直向上。水槽长度  $M$  为 9.45m, 高度  $H$  为 0.5m, 水深  $h$  为 0.25m。波浪生成区和波浪吸收区的长度  $Z_l$  和  $Z_r$  均为 1.8m, 以保证各工况下造波区和消波区的长度均大于 1 个波长。透空式防波堤的箱型结构沿波浪传播方向的长度  $D_h$  为 0.45m, 吃水  $D_d$  为 0.08m, 高度  $D_v$  为 0.2m。软尾结构的长度为  $d$ , 厚度等于波高 0.03m。水槽的左侧边界是速度入口, 顶部边界是大气边界, 底部边界和透空式防波堤箱体表面为固定壁面。软尾结构左侧面与刚性防波堤相连, 是固壁边界, 其余三个表面均为自由变形边界。

首先对没有防波堤结构的波浪水槽进行网格收敛性验证。在波高和波长方向各采用三种网格密度, 即在一个波高范围内分别布置 6、10 和 14 个网格, 以及在一个波长范围内布置 50、100 和 150 个网格。波浪模拟结果如图 3 和图 4 所示, 图中的理论解由二阶 Stokes 波浪理论得到。综合考虑计算成本和计算精度, 本文在波高和波长方向分别布置 10 个和 100 个网格。增加防波堤结构后, 模型网格布置如图 5 所示。固体域的网格收敛性验证参见 Huang 等<sup>[11]</sup>。

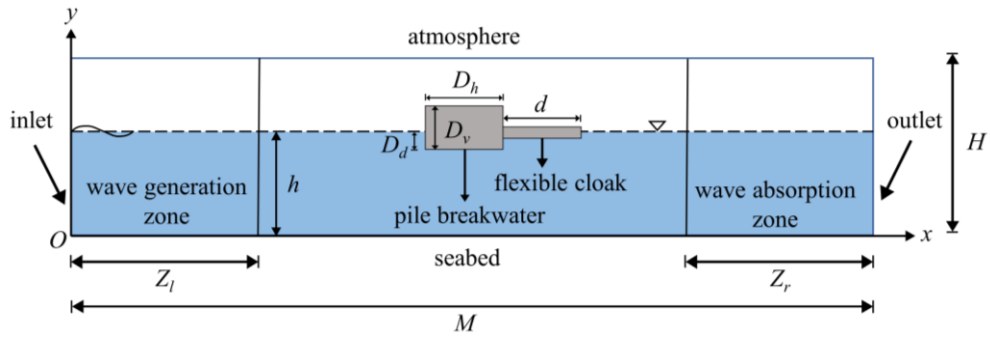


图2 数值波浪水池计算域示意图

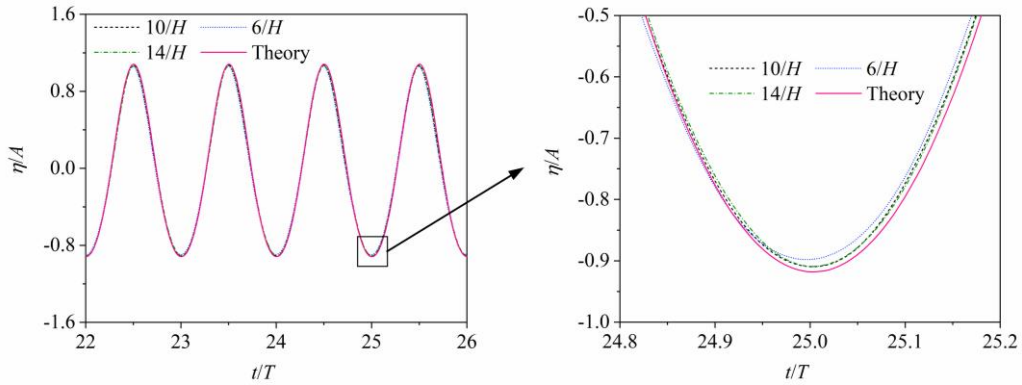


图3 波高方向的网格收敛性验证

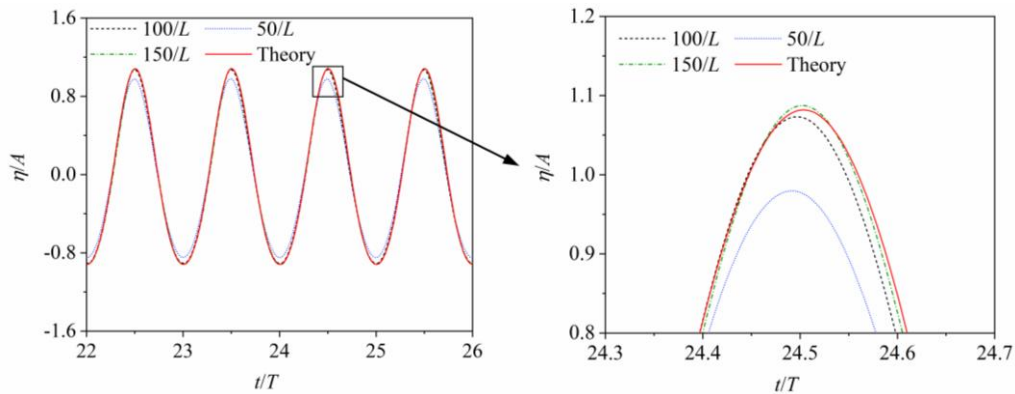


图4 波长方向的网格收敛性验证

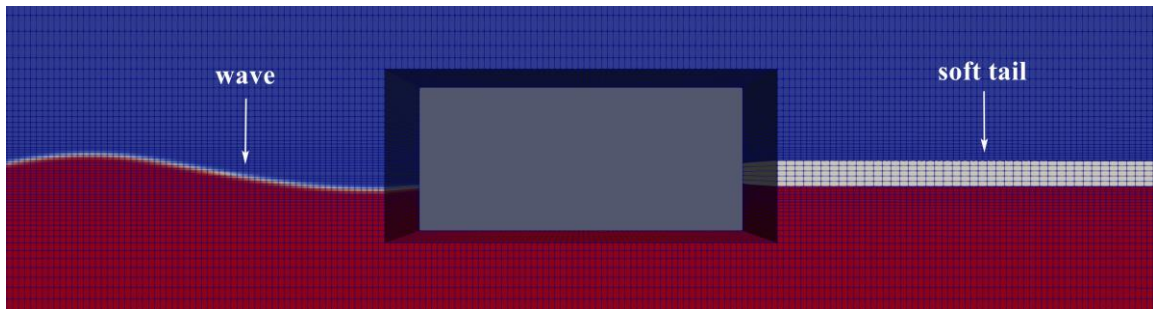


图5 结构周围网格设置示意图

## 4 结果分析

本节重点分析软尾刚度和长度对防波堤消浪性能和所受水动力载荷的影响，如表1所示设置16种典型工况。表中， $E$ 为软尾的弹性模量，实际应用中可通过改变软尾的材料或模块之间连接器的刚度来调节，本文选取1GPa和500MPa两种参数进行研究。软尾密度设为 $500\text{kg/m}^3$ 。以防波堤的箱体长度 $D_h$ 为基准，设计入射波长 $\lambda$ 和软尾长度 $d$ 。考虑波长 $\lambda=1.5D_h$ 、 $2D_h$ 、 $2.5D_h$ 和 $3D_h$ 的四种入射波，以及长度 $d=D_h$ 和 $1.5D_h$ 的软尾结构。设置无软尾结构的工况13~16进行对比验证。

表 1 工况参数表

Case	$\lambda/D_h$	$d/D_h$	$E/\text{GPa}$
1-4	1.5, 2, 2.5, 3	1	0.5
5-8	1.5, 2, 2.5, 3	1.5	0.5
9-12	1.5, 2, 2.5, 3	1	1
13-16	1.5, 2, 2.5, 3	/	/

#### 4.1 软尾结构对防波堤消波性能的影响

图 6 和图 7 分别给出了在两种软尾长度和刚度以及不存在软尾情况时，不同波长的波浪经过防波堤的透射系数  $K_t$ 、反射系数  $K_r$  与能量耗散系数  $K_p$ ，其中  $K_p=1-K_t^2-K_r^2$ 。由图 6 和图 7 可知，相比于没有软尾结构的箱型透空防波堤，软尾结构的存在使波浪的透射系数整体上显著减小，在长波条件下效果更为明显；同时，由于软尾弹性振动对波浪能量的耗散效应，软尾防波堤的波浪反射系数也相应减小；在当前研究的工况中，软尾刚度对防波堤消波性能影响不大，但与短软尾结构相比，长软尾结构的长波反射效果更明显。

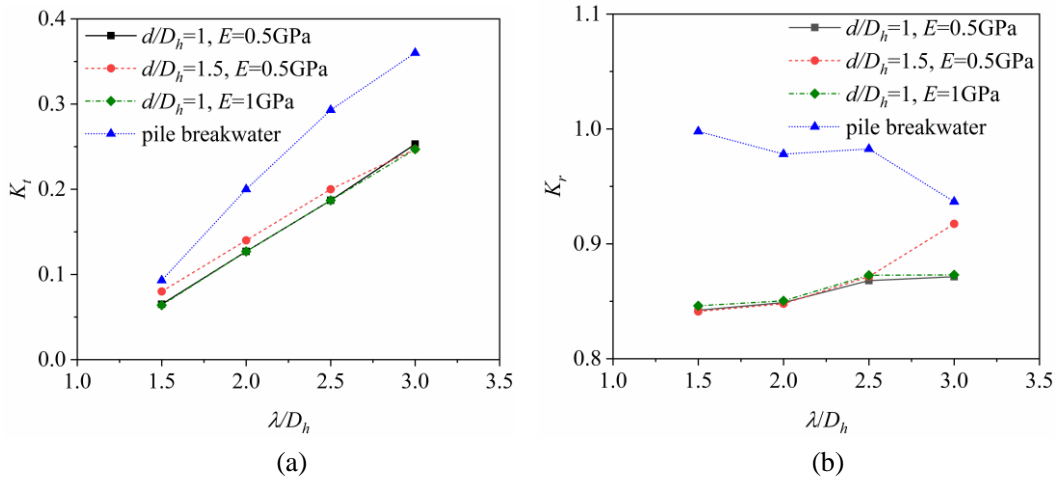


图 6 不同软尾防波堤的波浪透射系数曲线(a)和反射系数曲线(b)

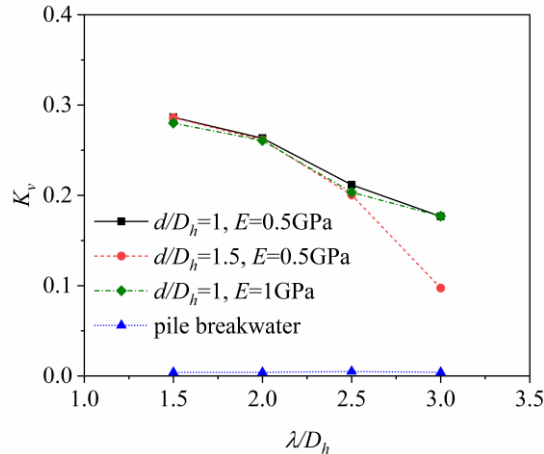


图 7 不同软尾防波堤的波能消耗系数曲线

#### 4.2 软尾结构对防波堤所受水动力的影响

图 8 和图 9 分别给出了在四种波长条件下，不同软尾防波堤箱体结构所受的垂向动压力和水平波浪力历时曲线。图中， $A$  为入射波波幅， $a$  为防波堤箱体长度的一半。研究发现，在本文所考虑参数范围内，防波堤箱体结构所受的垂向动压力较水平波浪力更大。受软尾结构影响，不同波长条件下防波堤箱体所受的两种波浪力历时曲线中均存在高频振荡成分；在短波作用时，软尾长度的增加会增加波浪力的不规则程度；随着波长增加，箱体所受垂向动压力呈现增大趋势，而所受水平波浪力的幅值增长则相对较小；软尾的刚度对防波堤箱体所受波浪力的影响不显著。

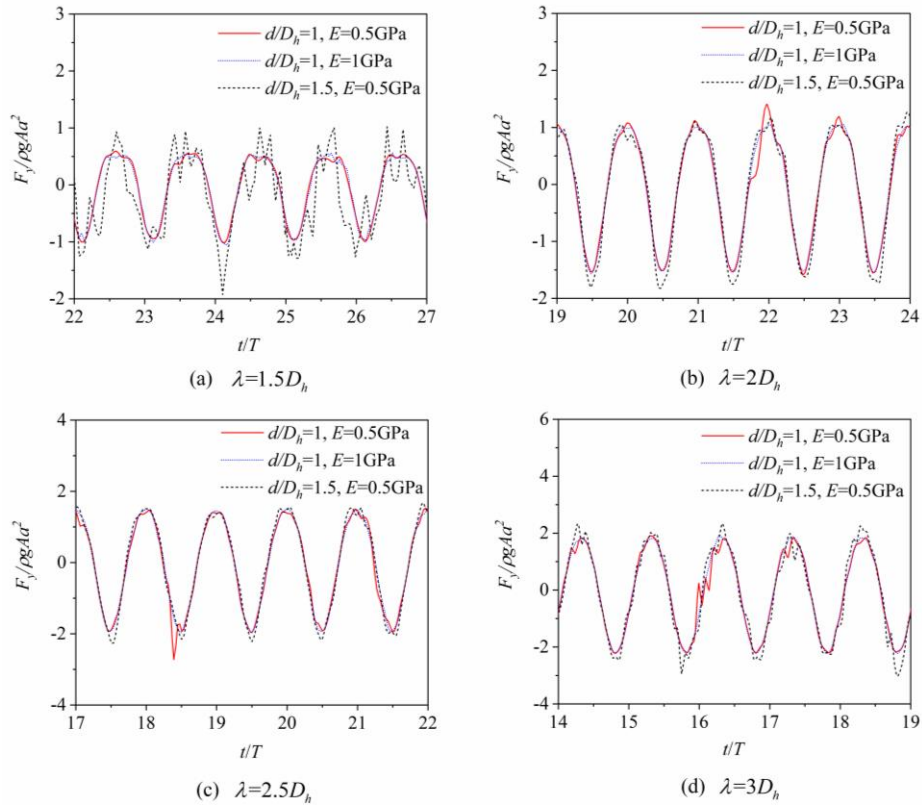


图 8 不同波长条件下软尾防波堤箱体结构的所受垂向动压力历时曲线

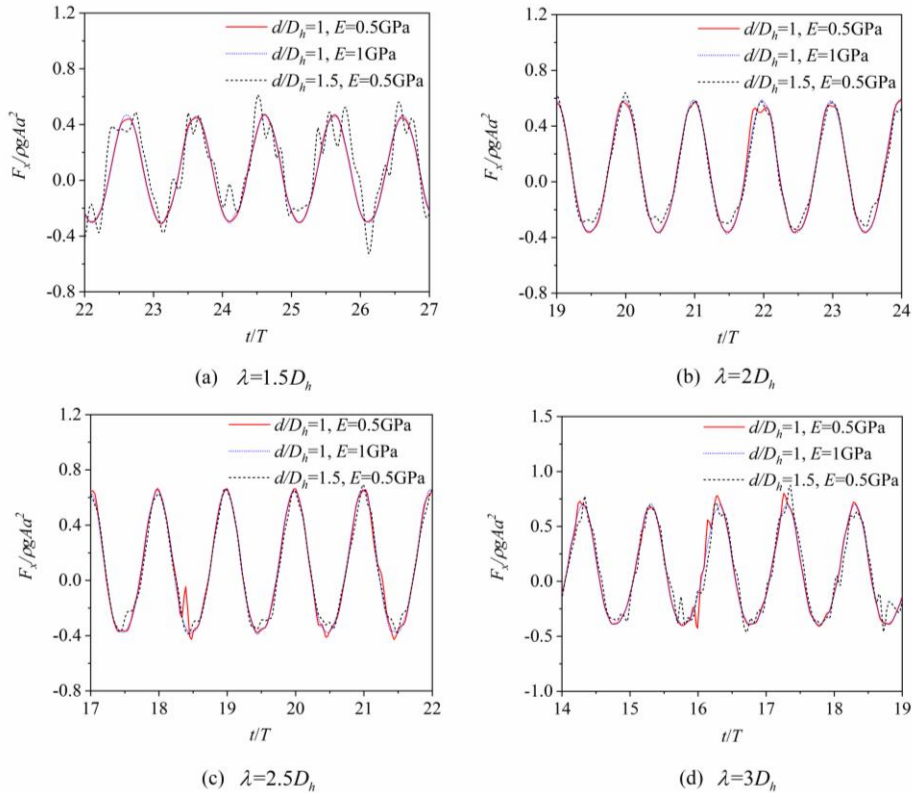


图 9 不同波长条件下软尾防波堤箱体结构所受水平波浪力历时曲线

## 5 结论

本文将透空防波堤与弹性薄板结构相结合，提出一种新型复合软尾防波堤，在透空防波堤防浪性能的基础上，利用弹性薄板结构实现对长波透射的抑制。基于开源软件 OpenFOAM 建立数值波浪

水池, 利用双向流固耦合技术, 实现波浪与防波堤软尾结构相互作用的实时模拟。改变软尾结构的长度和刚度, 研究了不同波长条件下软尾防波堤的防浪性能与所受水动力情况。研究发现: 在本文所考虑参数范围内, 软尾结构可以有效减小波浪透射效应, 软尾刚度对透射性能影响较小; 随着入射波长的增加, 防波堤箱体结构所受的垂向动压力明显增大, 软尾长度会影响防波堤箱体所受垂向动压力与水平波浪力的波动特性, 软尾结构的刚度则对防波堤箱体所受波浪力的影响较小。

## 参考文献

- [1] He F. Hydrodynamic performance of pile-supported OWC-type structures as breakwaters\_ An experimental study[J]. *Ocean Engineering*, 2014: 9.
- [2] Dai J, Wang C M, Utsunomiya T, et al.. Review of recent research and developments on floating breakwaters[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 158: 132–151.
- [3] Michailides C. Modeling of energy extraction and behavior of a Flexible Floating Breakwater[J]. *Applied Ocean Research*, 2012: 18.
- [4] Brossard J, Jarno-Druaux A, Marin F, et al. . Fixed absorbing semi-immersed breakwater[J]. *Coastal Engineering*, 2003, 49(1–2): 25–41.
- [5] Karthik Ramnarayan S, Sannasiraj S A, Sundar V. Hydrodynamic characteristics of curved and vertical front face pile-supported breakwaters in regular waves[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 216: 108105.
- [6] Koutandos E V, Prinos P E. Hydrodynamic characteristics of semi-immersed breakwater with an attached porous plate[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(1): 34–48.
- [7] Shugan I V, Hwang H-H, Yang R-Y, et al.. Elastic plate as floating wave breaker in a beach zone[J]. *Physics of Wave Phenomena*, 2012, 20(3): 199–203.
- [8] Babanin A V. On a wave-induced turbulence and a wave-mixed upper ocean layer[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(20): L20605.
- [9] 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.
- [10] Tuković Ž, Karač A, Cardiff P, et al.. OpenFOAM Finite Volume Solver for Fluid-Solid Interaction[J]. *Transactions of FAMENA*, 2018, 42(3): 1–31.
- [11] Huang L, Ren K, Li M, et al.. Fluid-structure interaction of a large ice sheet in waves[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 182: 102–111.

## NUMERICAL STUDY ON A NOVAL COMPOSITE SOFT-TAIL BREAKWATER BASED ON OPENFOAM

ZHANG Chongwei <sup>2,\*</sup>, ZHUANG Qianze <sup>2</sup>, HUANG Luofeng <sup>3</sup>, NING Dezhi <sup>2</sup>

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

<sup>3</sup> Dept. of Mechanical Engineering, University College London, London WC1E 7JE;

\* Email: chongweizhang@dlut.edu.cn

**Abstract:** This paper combines the permeable breakwater with an elastic thin-plate structure, and proposes a new type of composite soft-tail breakwater. Based on existing wave-protection characteristics of the breakwater, the soft-tail structure further suppresses the transmission of long waves. A numerical wave flume is established based on the open-source software OpenFOAM. A two-way fluid-solid coupling algorithm is developed to consider the interaction between water waves and the soft-tail breakwater in time domain. Soft-tails with different lengths and stiffnesses are considered. The wave performance and hydrodynamic response of the soft-tail breakwater are studied under different wavelength conditions. It is found that within the considered range of parameters, the soft-tail structure can effectively suppress the wave transmission, but its stiffness has little effect on the wave transmission performance. Besides, the length of the soft-tail structure can affect both vertical and horizontal wave force properties on the breakwater, but its stiffness does not have evident effects.

**Key words:** pile breakwater, wave transmission, OpenFOAM, fluid solid interaction