



基于 OpenFOAM 的弧形防浪墙受力特性的 数值模拟研究*

于 珍¹, 李雪艳¹, 程 志¹, 孙家文², 孟钰婕¹, 隋钰程¹
(1. 鲁东大学海岸研究所 & 山东省海上航天装备技术创新中心, 山东 烟台 264025;
2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116085)

摘要: 弧形防浪墙具有优良的返浪效果, 工程应用较多。本文以弧形防浪墙为例, 基于 OpenFOAM 开源程序, 应用雷诺平均 Navier-Stokes 方程描述流体运动, 建立了波浪与结构物作用的二维数值模型。通过试验验证所建立的数值模型, 探讨不同形式弧形防浪墙所受波浪压强分布特点的异同、弧形防浪墙圆弧半径对所受波浪力的影响。结果表明: 在不同波浪要素条件下, 弧形防浪墙迎浪面所受波浪压强随测点高程的增大而减小, 同一测点上所受波浪压强随弧形防浪墙圆弧半径的增大而减小。防浪墙迎浪面受到的波浪力随着波高的增大而增大, 随波长的增大先增大、再减小、再增大, 且在波长最大时波浪力达到最大值。在相同波长下, 波浪力随圆弧半径增大而减小。

关键词: 弧形防浪墙; 波浪压强; 波浪力; OpenFOAM

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0029-08

Numerical simulation of force on arc crown wall based on OpenFOAM

YU Zhen¹, LI Xue-yan¹, CHENG Zhi¹, SUN Jian-wen², MENG Yu-jie¹, SUI Yu-cheng¹

(1. Coastal Institute of Ludong University & Shandong Marine Aerospace Equipment Technology Innovation Center, Yantai 264025, China;
2. National Marine Environment Monitoring Center, Dalian 116085, China)

Abstract: Arc crown wall has excellent wave return effect and many engineering applications. Taking the arc crown wall as an example, based on the OpenFOAM open source program, we develop a two-dimensional numerical model for the action of waves and structures using the Renault average Navier-Stokes equation to describe the fluid motion. The numerical model is verified by the test results, and the similarities and differences of wave pressure distribution characteristics of different types of arc crown wall and the influence of arc radius of arc crown wall on wave force are discussed. The results show that under the conditions of different wave elements, the wave pressure on the wave face of the arc crown wall decreases with the increase of the elevation of the measuring point, the wave pressure on the same pressure measuring point decreases with the increase of the arc radius of the arc crown wall, the wave force on the wave face of the arc crown wall increases with the increase of the wave height, first increases, then decreases and then increases with the increase of the wavelength, and the wave force reaches the maximum at the maximum wavelength. At the same wavelength, the wave force decreases with the increase of arc radius.

Keywords: arc crown wall; wave pressure; wave force; OpenFOAM

收稿日期: 2022-03-04

***基金项目:** 国家重点研发计划项目(2021YFB2601100); NSFC-山东联合基金项目(U1806227); 山东省海上航天装备技术创新中心(鲁东大学)开放课题基金项目(MAETIC2021B)

作者简介: 于珍(1997—), 女, 硕士研究生, 从事波浪与海洋结构物相互作用研究。

通信作者: 李雪艳(1980—), 女, 博士, 副教授, 从事波浪与结构物作用研究。E-mail: yanzi03@126.com

随着我国大力发展海洋强国战略，对海上防护结构的形式、功能等都提出了新的要求。直立式防浪墙在高潮位时容易发生越浪，影响后方掩护水域的平稳度。弧形防浪墙则具有优良的返浪效果，在与直立堤相同堤高情况下，能够有效防止越浪的发生，在降低工程施工成本的同时能够增强景观效果，受到学者们的广泛关注与研究^[1-3]。

Owen 等^[4]最先开始研究弧形防浪墙，分析了越浪量的主要影响因素。随后，Juhl^[5]对弧形防浪墙所受最大波浪冲击的荷载系数和最大越浪量系数进行研究。学者们在此基础上，进一步探讨研究各种不同构造形式弧形防浪墙的最大越浪量、所受波浪压强、波浪力。物理模型试验方面，王颖等^[6-7]通过物理模型试验，讨论了圆弧半径以及底面高程对弧形防浪墙所受波浪力的影响。由于物理模型和相关试验技术对设备的成本要求较高，且试验周期长，因此学者们进行了大量数值模拟的计算研究。于龙基等^[8]通过二次开发 Fluent 软件，分别计算了直立式和弧形防浪墙所受波浪压力，发现最大波浪压力发生在圆弧部分。Li 等^[9]利用 VOF 方法，建立推导出 BFC 计算流体力学模型，对弧形防浪墙结构工程中的波浪及其受力特性等进行了一系列详细而直观的理论计算试验研究。

本文基于 OpenFOAM 开源程序^[10-12]，建立波浪与弧形防浪墙相互作用的二维数值模型，与前人试验相对比，着重讨论不同结构形式对波浪压强的分布特性和所受波浪力的影响，以期工程实际提供一定参考。

1 数值模型

1.1 模型介绍

本文基于开源程序 OpenFOAM，应用雷诺平均(Navier-Stokes)方程作为控制方程，建立波浪与弧形防浪墙作用的二维数值模型。 x 轴正方向为波的传播方向， y 轴正方向定义为向上。控制方程为：

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

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) - \nabla \cdot (\mu \nabla U + \rho \tau) = C \kappa \nabla - g X \nabla \rho - \nabla P_{\rho gh} + S^* \tag{2}$$

式中： U 为液体重力表面平均运动速度； t 为时间； μ 为动力黏度； $\rho \tau$ 为雷诺应力项； τ 为液体重力的雷诺应力张量； $C \kappa \nabla$ 为液体表面张力项， C 为液体重力表面平均的张力系数($C = 0.07 \text{ kg} / \text{S}^2$)， κ 为液体的自由滑动表面曲率的曲率； g 为液体重力加速度； X 为液体重力的位置向量； S^* 为阻尼波耗散项； $P_{\rho gh}$ 为压力项，当压力点在自由面上时， $P_{\rho gh}$ 表示动水压力，其表达式为：

$$P_{\rho gh} = P - \rho gh \tag{3}$$

式中： P 为某一时刻结构物上某一点所受到的总压强； ρgh 为该压力点所受静水压强，其中 h 为该点到基准水面的距离。若压力点位于基准水面以上，则静水压强为0。

模型包含4种边界条件：

1)水槽造波边界条件。采用推板造波方法产生稳定连续的规则波浪，推板运动的边界是沿造波方向作水平连续的简谐运动，波程高度与推板冲程长度之间的几何关系为：

$$H_s = \frac{H}{S} = \frac{4 \sinh^2(kd)}{2kd + \sinh(2kd)} \tag{4}$$

式中： H_s 为传递函数； H 为规则波波高； S 为造波冲程； k 为波数， $k = \frac{2\pi}{L}$ ； L 为波长； d 为水深。

2)水槽末端的消波边界条件。根据阻尼的消波理论，在动量方程中添加一个消波方程的源项，采取线性消波方程的近似方法使得水槽末端波速趋于衰减。

3)自由表面条件。尝试应用流体体积函数法(VOF)追踪数值水槽内流体颗粒的自由表面，由于经过网格剖分的计算域是固定的，控制数值程序时可以定义一个标量函数 α 来表示流体体积分，混合流体密度 ρ 和动力黏度 μ 的关系为：

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a \\ \mu = \alpha \mu_w + (1 - \alpha) \mu_a \end{cases} \tag{5}$$

式中： ρ_w 和 ρ_a 分别为水和空气的密度，取 $\rho_w =$

1 t/m^3 、 $\rho_a=1.205\text{ kg/m}^3$; μ_w 和 μ_a 分别为水和空气的动力黏度, 取 $\mu_w=1.01\text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_a=17.9\text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

4) 固壁边界条件。数值水槽的侧壁、底面或结构物的壁面都处于不滑动边界状态, 速度和压力需满足下列方程:

$$U|_{\text{wall}}=0 \tag{6}$$

$$\left.\frac{\partial p}{\partial n}\right|_{\text{wall}}=0 \tag{7}$$

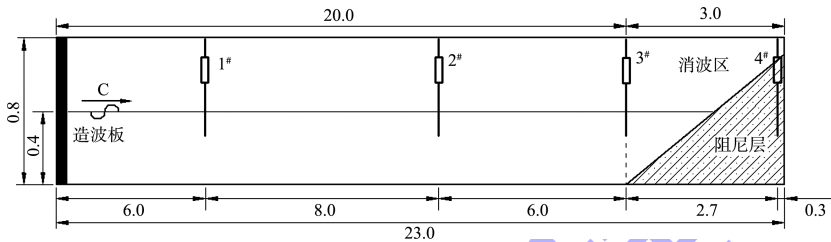
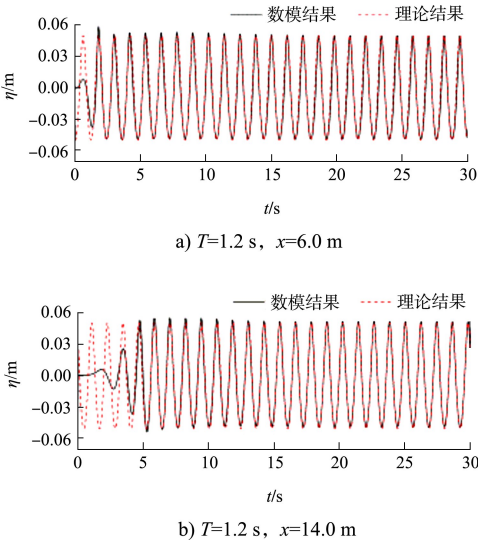
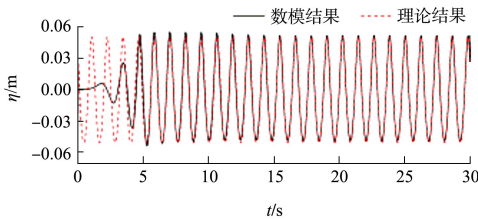


图 1 空水槽数值模型 (单位: m)

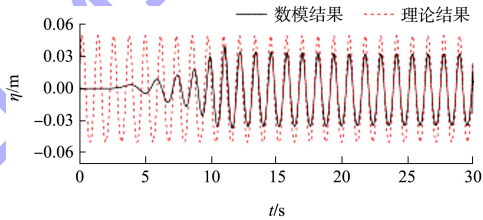
将浪高仪监测到的波面值 η 与二阶 Stokes 波的理论值进行对比(图 2)。分析表明, 1#、2#浪高仪实测的波面与高程参数值均能获得与其理论误差完全一致的精度, 且持续性良好, 在所测的数值水槽区域, 形成了一种较为连续、平稳、可靠的规则波。3#浪高仪位于阻尼消波区起始端, 区域波面高程数值明显小于理论值。4#浪高仪位于水槽末端, 该阻尼消波区能够完全起到消除水槽末端槽壁声波反射的作用, 波浪能量几乎全部被消耗。



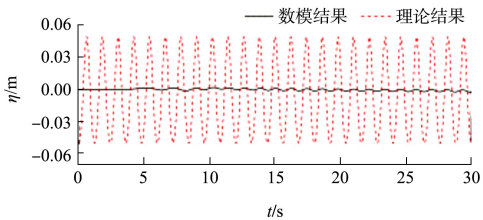
a) $T=1.2\text{ s}$, $x=6.0\text{ m}$



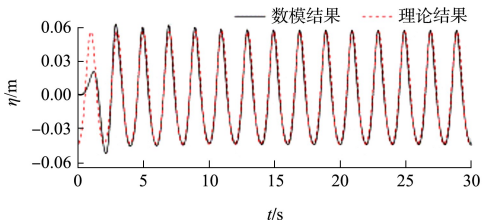
b) $T=1.2\text{ s}$, $x=14.0\text{ m}$



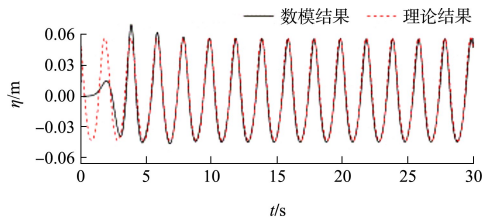
c) $T=1.2\text{ s}$, $x=20.0\text{ m}$



d) $T=1.2\text{ s}$, $x=22.7\text{ m}$



e) $T=2.0\text{ s}$, $x=6.0\text{ m}$



f) $T=2.0\text{ s}$, $x=14.0\text{ m}$

1.2 模型建立

利用上述方法建立长 23.0 m、高 0.8 m 的空水槽数值模型(图 1)。在数值水槽内距离造波开始位置 $x=6.0$ 、14.0、20.0、22.7 m 处分别设置 1#~4#浪高仪实时自动跟踪监测规则波高, 利用数值模型对水深 $d=0.45\text{ m}$ 、波高 $H=0.12\text{ m}$ 、周期 $T=1.2$ 、2.0 s 的规则波的产生与传播进行数值模拟。

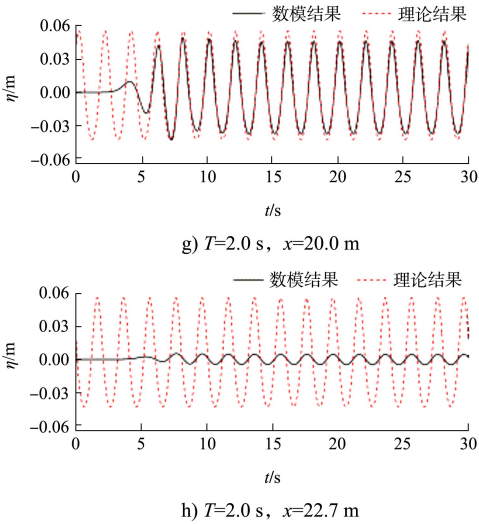


图 2 波面历时曲线计算结果与二阶 Stokes 波理论结果比较

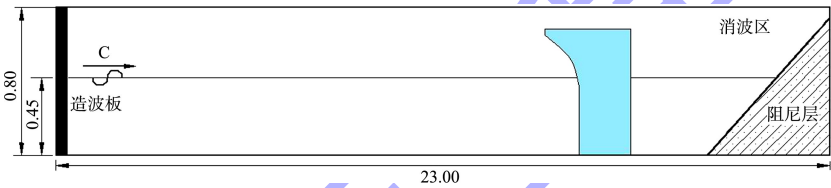


图 3 数值试验模型布置 (单位: m)

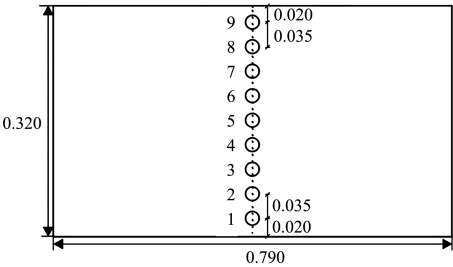


图 4 防浪墙迎浪面测点压力传感器布置 (单位: m)

2 结果分析与讨论

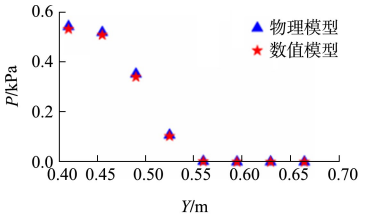
2.1 迎浪面波压力分布

图 5 分别为不同周期、不同波高情况下，弧形防浪墙迎浪面上各受测点的波浪压强的计算值与李雪艳等^[13]得出的试验值的对比。横坐标为各测点到水槽底面的高度 Y ，纵坐标为最大波压强 P 。由图可知，该数值模型的计算结果与其试验值吻合较好。在不同波浪要素条件下，波浪压强随着测点高度的增大而减小，在静水位 (水深 $d=0.45\text{ m}$) 附近最大。在试验范围内，不同圆弧半径的弧形防浪墙上的波浪压强均小于 0.9 kPa 。随测

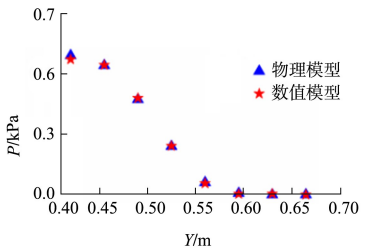
在验证数值水槽模拟波浪有效性后，构建了波浪与弧形防浪墙相互作用的数值模型 (图 3)。二维数值水槽长 23.0 m ，高 0.8 m ，计算水深 $d=0.45\text{ m}$ ，规则波波高 $H=0.06、0.08、0.10、0.12\text{ m}$ ，周期 $T=1.2、1.5、1.8、2.0\text{ s}$ ，弧形防浪墙放置于水槽中后部。

物理试验中将 9 个压力传感器安装于弧形防浪墙迎浪面中心线处，在不同半径圆弧上布置相同的测点，图 4 为 $R=0.67\text{ m}$ 时迎浪面中心线的测点布置。定义底部为坐标原点，3 个不同半径防浪墙 1~9 号压力测点竖向坐标分别为 $0.420、0.455、0.490、0.525、0.560、0.595、0.630、0.665、0.700\text{ m}$ 。

点高程的增大，波浪压力逐渐减小为 0。这是由于随着水体沿着弧形防浪墙向上运动，势能增大、动能减小，运动速度随之减小，减弱了对弧形防浪墙的作用，因此作用在弧形防浪墙上的波浪压力也随之减小。



a) $d=0.45\text{ m}$, $R=0.45\text{ m}$, $T=1.2\text{ s}$, $H=0.08\text{ m}$



b) $d=0.45\text{ m}$, $R=0.45\text{ m}$, $T=1.2\text{ s}$, $H=0.10\text{ m}$

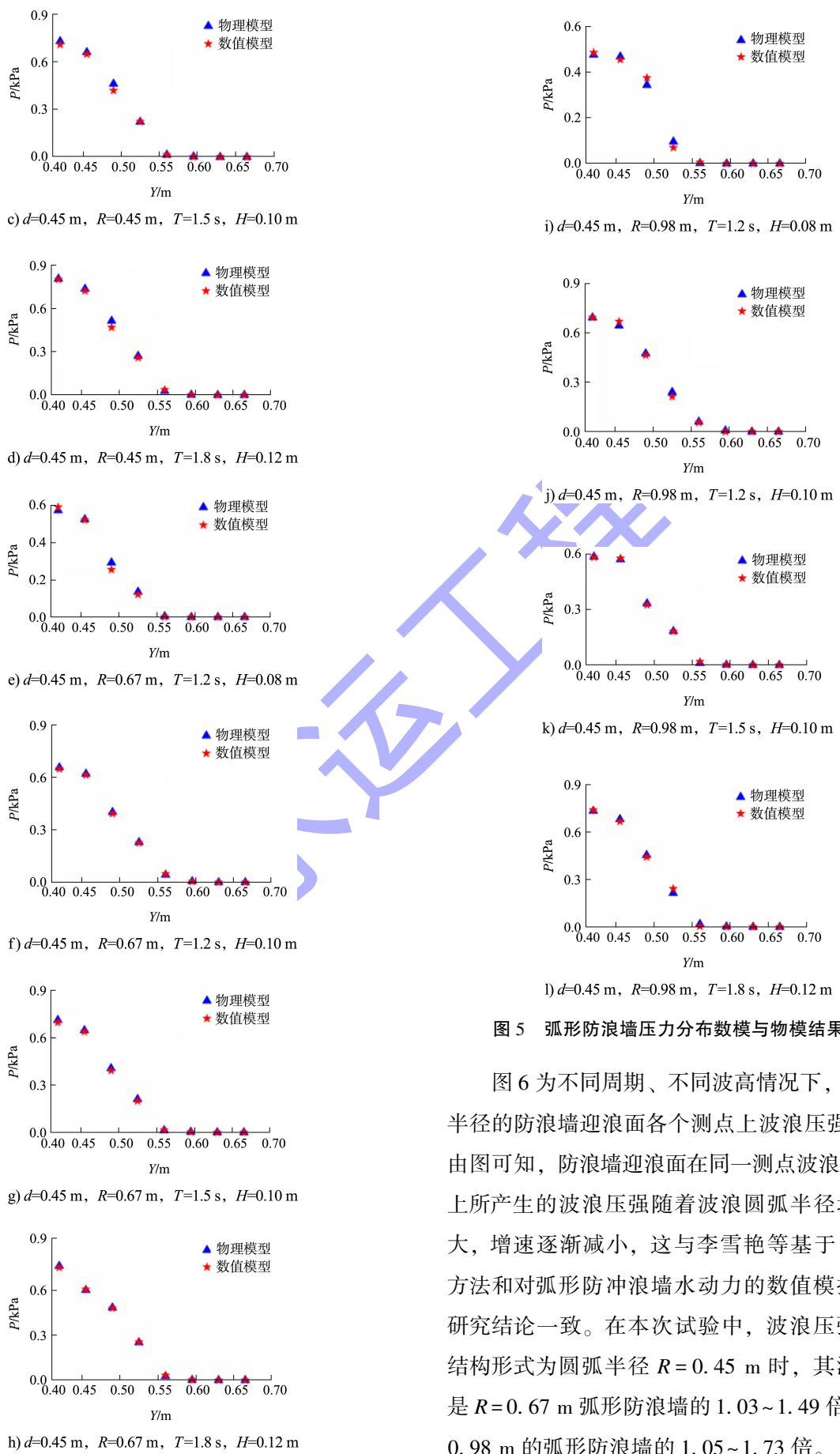


图 5 弧形防浪墙压力分布数模与物模结果对比

图 6 为不同周期、不同波高情况下, 3 种圆弧半径的防浪墙迎浪面各个测点上波浪压强的分布。由图可知, 防浪墙迎浪面在同一测点波浪圆弧方向上所产生的波浪压强随着波浪圆弧半径增大而增大, 增速逐渐减小, 这与李雪艳等基于 BFC-VOF 方法和对弧形防冲浪墙水动力的数值模拟获得的研究结论一致。在本次试验中, 波浪压强最大的结构形式为圆弧半径 $R=0.45\text{ m}$ 时, 其波浪压强是 $R=0.67\text{ m}$ 弧形防浪墙的 1.03~1.49 倍, 是 $R=0.98\text{ m}$ 的弧形防浪墙的 1.05~1.73 倍。

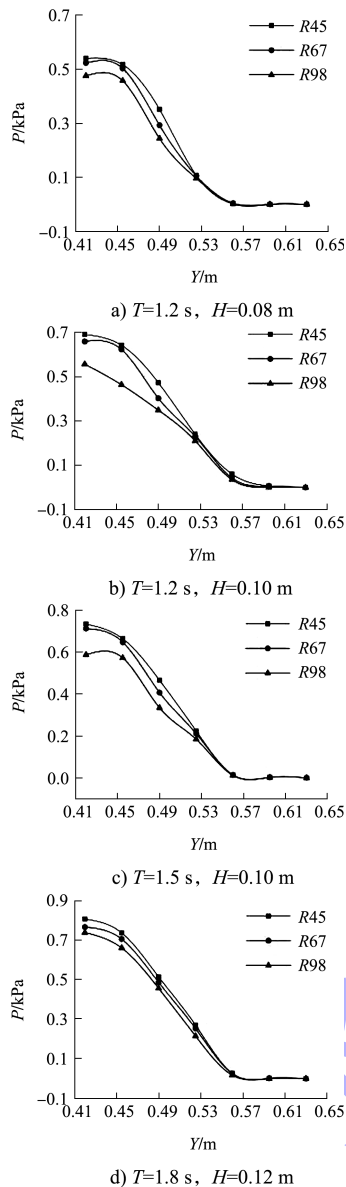


图 6 不同结构弧形防浪墙波浪压力对比

2.2 波浪总力

图 7 为弧形防浪墙的波浪力方向，图中圆弧半径 $R=0.45\text{ m}$ 。利用 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[14] 所述波浪力的计算方法，得到弧形防浪墙迎浪面受到的最大水平波浪力和垂直波浪力。

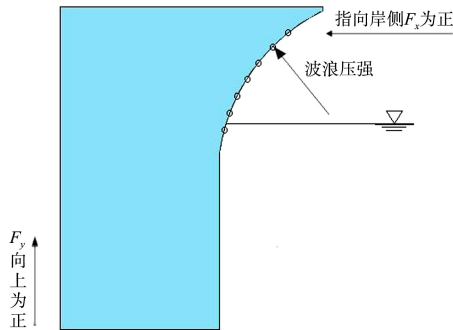
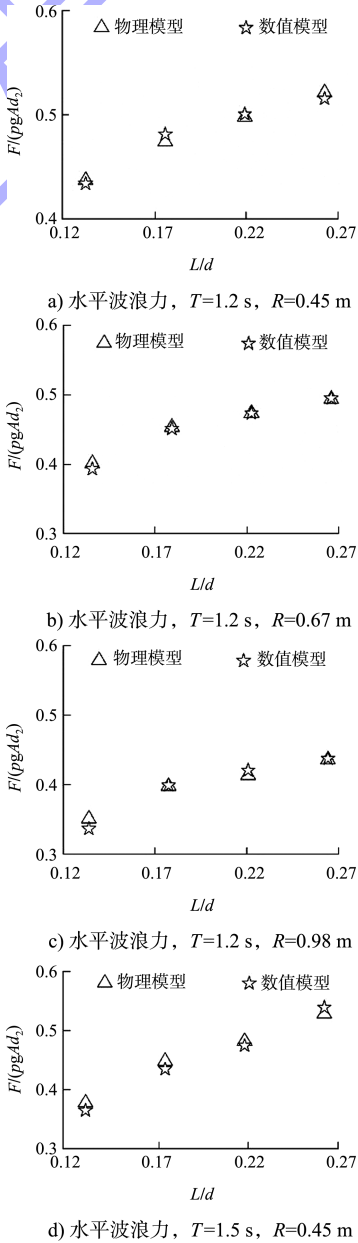


图 7 波浪力方向

图 8 为水深 $h=0.45\text{ m}$ 、周期 $T=1.2、1.5\text{ s}$ ，以及不同相对波高 H/d 下不同圆弧半径的数值模型和物理模型弧形防浪墙的水平波浪力、垂直波浪力数值的对比，图 9a)~f) 为数值模型和物理模型弧形防浪墙结构的水平波浪力对比，图 9g)~l) 为数值模型和物理模型弧形防浪墙结构的垂直波浪力对比。其中横坐标定义为相对波高 H/d ，即波高 H 与水深 d 的比值；纵坐标为防浪墙无量纲化的波浪力 $F/(\rho g A d_2)$ ，其中 ρ 为水体密度， g 为重力加速度， A 为波幅， d_2 为弧形防浪墙高度。由图可知，数模与物模结果吻合较好，弧形防浪墙迎浪面上的波浪力均随相对波高的增大而增大，与基于 BFC-VOF 方法对弧形防浪墙水动力数值模拟的结果一致。



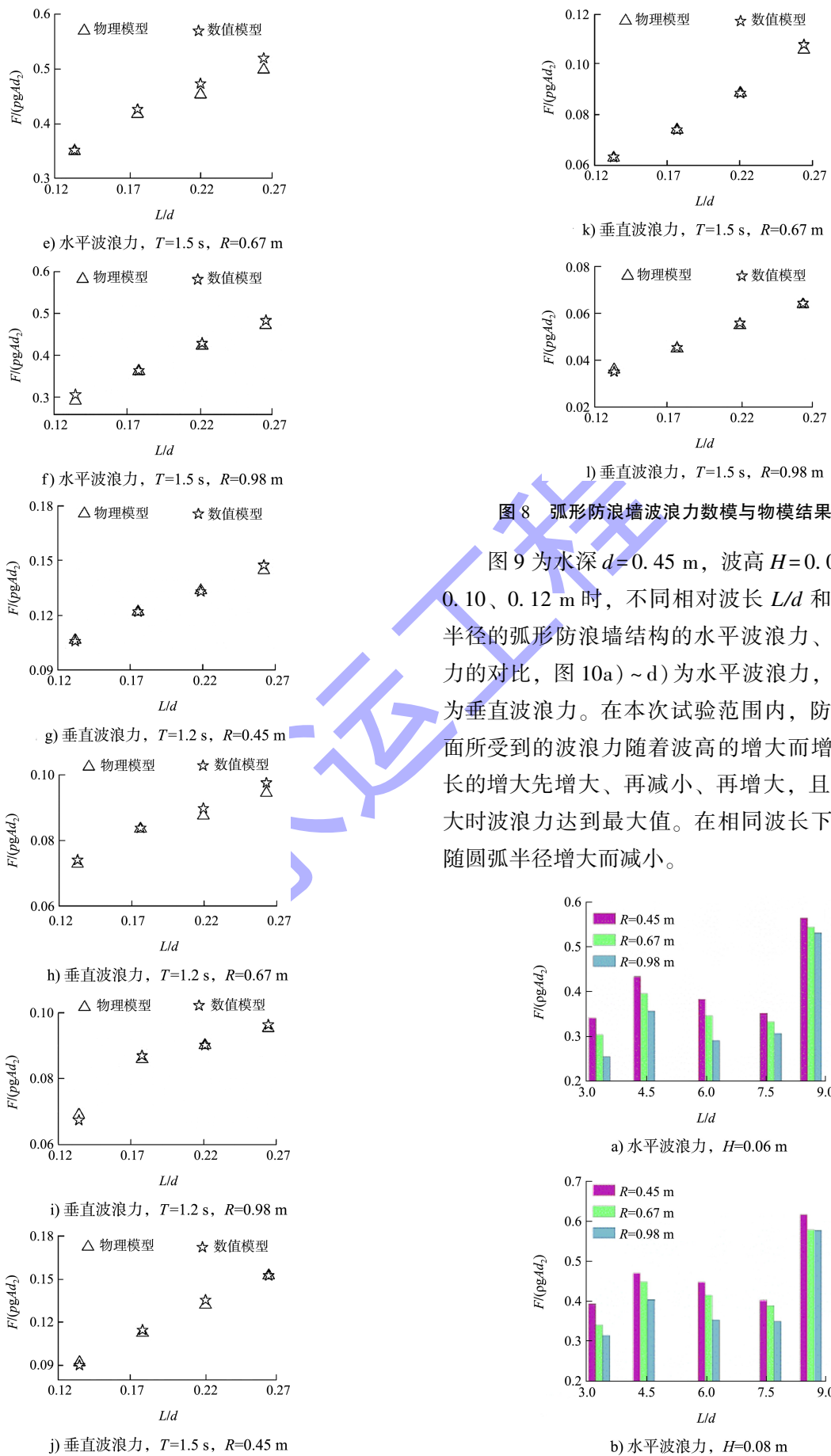
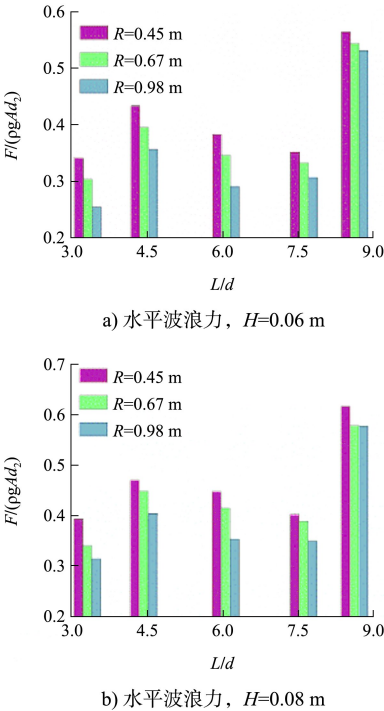
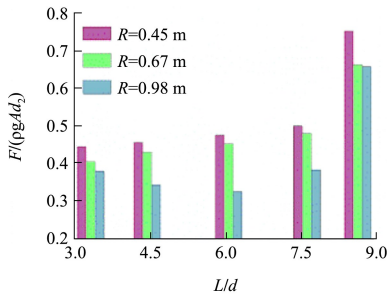


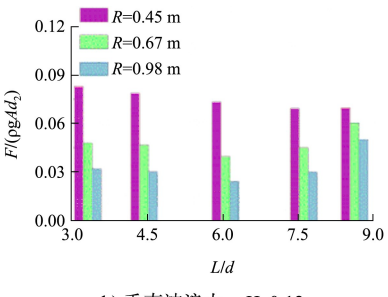
图 8 弧形防浪墙波浪力数模与物模结果对比

图 9 为水深 $d=0.45$ m, 波高 $H=0.06$ 、 0.08 、 0.10 、 0.12 m 时, 不同相对波长 L/d 和不同圆弧半径的弧形防浪墙结构的水平波浪力、垂直波浪力的对比, 图 10a) ~ d) 为水平波浪力, 10e) ~ h) 为垂直波浪力。在本次试验范围内, 防浪墙迎浪面所受到的波浪力随着波高的增大而增大, 随波长的增大先增大、再减小、再增大, 且在波长最大时波浪力达到最大值。在相同波长下, 波浪力随圆弧半径增大而减小。

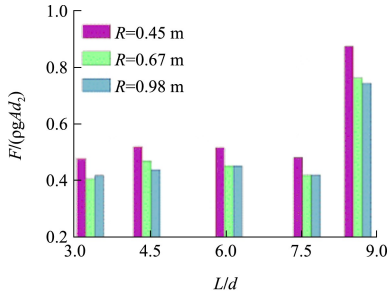




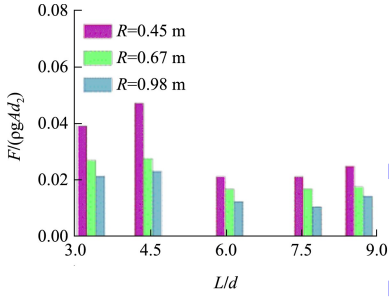
c) 水平波浪力, $H=0.10\text{ m}$



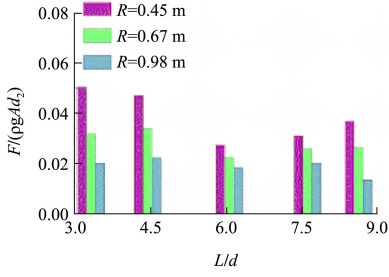
h) 垂直波浪力, $H=0.12\text{ m}$



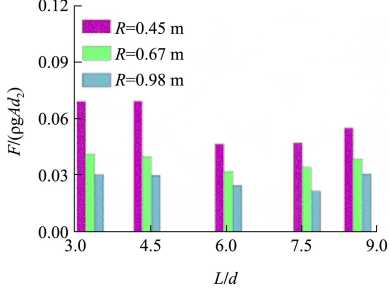
d) 水平波浪力, $H=0.12\text{ m}$



e) 垂直波浪力, $H=0.06\text{ m}$



f) 垂直波浪力, $H=0.08\text{ m}$



g) 垂直波浪力, $H=0.10\text{ m}$

图 9 弧形防浪墙不同结构波浪力对比

3 结 论

1) 本文基于开源软件 OpenFOAM, 建立了波浪对弧形防浪墙作用的二维数值模型, 讨论了不同结构形式弧形防浪墙的受力特性, 并将数值结果与物模结果进行对比, 验证了所建数值模型的可靠性。

2) 在不同波浪要素条件下, 波浪压强随着测点高度的增大而减小, 在静水位附近最大。不同圆弧半径的弧形防浪墙承受的最大波浪压强均小于 0.9 kPa。随测点高程差持续增大, 波浪压力逐渐减小为 0。

3) 防浪墙迎浪面所受的波浪力随着波高的增大而增大, 随波长的增大先增大、再减小、再增大, 且在波长最大时波浪力达到最大值。在相同波长下, 波浪力随圆弧半径增大而减小。

参考文献:

[1] 薛涛喜, 刘永利, 邵光辉. 浅谈弧形防浪墙混凝土外观质量控制[J]. 山东水利, 2019(3): 61-62.

[2] 邢怡君. 弧形防浪墙定型钢模板的施工质量控制[J]. 四川水泥, 2020(1): 247.

[3] 刘建华, 徐斌, 贾晓. 基于正交试验的弧形防浪墙波浪载荷对堤身参数的敏感性分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2016, 30(1): 1-7.

[4] OWEN M W, STEELE A. Effectiveness of recurved wave return walls[R]. Oxford: HR Wallingford, 1991.

[5] JUHL J. Investigations on the effect of structural measures on wave impact forces and overtopping [C] // Proc. 3rd project workshop, MAST I G6-S, Hannover: [s.n.], 1992.

[6] 王颖, 薛雷平, 刘桦. 弧形防浪墙波浪力的试验研究[J]. 水道港口, 2007, 28(2): 81-85. (下转第 55 页)