

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19380

六边形开口方形人工鱼礁阻力系数数值模拟与模型试验比较研究

张硕^{1,2}, 张世东¹, 胡夫祥³, 初文华^{1,2}, 黄成裕¹, 刘斐凡¹, 张秋驰¹

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海海洋大学, 上海 201306;

3. 东京海洋大学, 东京 108-8477

摘要: 为了对 4 种不同开口大小的六边形开口方形人工鱼礁在 4 种迎流角度下数值模拟和水槽模型试验的阻力系数进行对比验证, 分别利用水槽模型和数值模拟试验方法对 4 种不同开口比($\gamma_b=0.0625, 0.14, 0.25, 0.39$)六边形开口方形人工鱼礁在 4 种迎流角度($\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)状态下的阻力进行测定, 并计算两种方法的阻力系数。结果表明: (1)在数值模拟和水槽模型试验中, 人工鱼礁模型阻力均随着开口比的增大而减小; 礁体迎流角度的变化可改变礁体阻力, 且在 4 种迎流角度下, 人工鱼礁阻力在 $\theta=30^\circ$ 时最大。(2)人工鱼礁数值模拟与水槽模型试验中, 当 θ 为 $15^\circ, 30^\circ$ 和 45° 时, 阻力系数均随着开口比的增加而增加, 具有明显的线性关系, 且阻力系数在迎流角度 $\theta=30^\circ$ 时最大。(3)数值模拟与模型试验阻力的相对误差在 0.12%~17.18%, 平均误差 7.43%; 礁体阻力系数的相对误差在 0.03%~14.64%, 平均误差 5.26%。阻力及阻力系数误差均在 20% 以下。水槽模型试验与数值模拟阻力和阻力系数相关系数 R 分别为 0.99 和 0.80, $P<0.001$, 具有极强的相关性。因此, 利用数值模拟精细化研究人工鱼礁水动力性能是可行的。

关键词: 人工鱼礁; 开口比; 迎流角度; 水槽试验; 数值模拟

中图分类号: S95

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)11-1350-10

人工鱼礁作为一种海洋生物栖息地修复的重要设施, 其在生境修复、生物资源养护、生物多样性保护等方面均发挥了积极作用^[1-5]。但由于在不同海域环境要素的长期作用下, 尤其是受台风、热带风暴等气候影响, 人工鱼礁会发生滑坡、倾覆、损坏以及淤积掩埋等安全隐患, 这将直接影响人工鱼礁生态功能的发挥。因此, 如何提高人工鱼礁稳定性成为人工鱼礁建设的主要技术难题之一。通过人工鱼礁的水动力性能研究, 建立人工鱼礁礁体结构参数与主要作用力之间关系, 为优化人工鱼礁的设计, 有效提高其稳定性提供重要的技术支持。因此近年来, 有关人工鱼礁水动力性能方面的研究也成为研究人员开展人工鱼

礁基础理论研究的重点关注内容^[3-5]。

人工鱼礁水动力性能的研究方法主要有水槽模型试验、风洞模型试验和数值模拟等方法^[5-10]。水槽和风洞模型试验成本高、结果真实可靠, 但缺点是不能全面、直观地反映礁体的水动力性能; 数值模拟具有省时省力、成本低、可计算复杂问题、实验研究范围广等众多优点, 但缺点难以确保数值仿真的准确性, 需要物理模型试验进行验证。

近年来国内外对人工鱼礁流场特性方面研究, 主要是针对某种具体鱼礁类型利用风洞、水槽等模型试验与数值模拟结果进行对比, 来验证数值模拟对人工鱼礁流场效应研究的可行性^[5-15]。如

收稿日期: 2019-12-24; 修订日期: 2020-02-16。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972845); 农业农村部转产转业项目-江苏省海州湾国家级海洋牧场示范项目(D-8005-18-0188, D8006-16-8060)。

作者简介: 张硕(1976-), 男, 教授, 博士, 从事海洋牧场和人工鱼礁生态效应研究. E-mail: s-zhang@shou.edu.cn

通信作者: 初文华, 博士, 从事流体力学与冲击力学研究. E-mail: whchu@shou.edu.cn

刘洪生等^[6-7]通过风洞模型试验和数值模拟对正方体、金字塔及三棱柱 3 种礁体的流场进行了对比验证。李珺等^[9]利用数值计算和水槽模型试验对米字型礁单体的流场进行了验证。郑延璇等^[10]通过数值模拟与 PIV 试验对 3 种叠放形式的圆管型礁体的流场效应进行对比研究。而针对人工鱼礁水阻力及其系数方面的研究,如唐衍力等^[5]采用水槽模型试验研究圆形开孔人工鱼礁水动力性能,于定勇等^[15]利用数值模拟研究不同开口比圆形开孔人工鱼礁水动力性能,但是对人工鱼礁在不同开口比和迎流角度下阻力系数的数值模拟和模型试验的对比验证尚缺乏研究^[3-13]。方形人工鱼礁越来越多的应用于海洋牧场建设中^[5,8,15],本研究利用数值模拟和水槽模型试验在迎流角度为 0°、15°、30°、45°下对开口比为 0.0625、0.14、0.25、0.39 的六边形开口方形鱼礁的水动力进行对比研究,通过对比分析水槽模型试验结果和数值模拟结果,探讨数值模拟在人工鱼礁礁体和礁区设计中的应用,对于进一步降低人工鱼礁前期设计和评价成本具有一定的意义,并为人工鱼礁的结构设计和安全性评估提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数值模拟

1.1.1 控制方程 本文数值计算中,假定礁体周围为湍流流动的黏性不可压缩流体,温度不变,忽略能量方程^[5]。

连续方程:

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

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\ -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] + S_i \end{aligned} \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u_i 、 u_j ($i, j=1, 2, 3, i \neq j$) 为直角坐标系 X 、 Y 和 Z 3 个方向的平均流速; p 为平均压强, Pa; μ 为动力黏度; $\overline{\rho u'_i u'_j}$ 为雷诺应力。

湍流模型采用 RNG k - ε 模型, 式(3)和式(4)分

别为湍动能 k 方程(3), 湍流耗散率 ε 方程(4)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k u_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon u_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $u_{eff} = \mu + \mu_t$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $C_\mu = 0.0845$;

$\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$; $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$, $C_{1\varepsilon} =$

1.42, $C_{2\varepsilon} = 1.68$; $\eta_0 = 4.377$, $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$;

$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, $\beta = 0.012$ 。

1.1.2 礁体模型 试验礁体是中心开口为六边形的鱼礁模型。模型的尺寸为 20 cm×20 cm×20 cm, 壁厚度为 5 mm, 礁体顶面不作开口处理外, 其他 5 个侧面均为开口边长相同的六边形中心开口。如图 1 所示, 4 个礁体的中心开口边长分别为 3.10 cm、4.65 cm、6.20 cm 和 7.76 cm, 开口比依次分别为 0.0625、0.14、0.25、0.39。迎流角度为来流方向与礁体夹角 θ (图 2)。根据鱼礁投放海域的最大流速和试验流速的梯度设计, 选取 8 个海域实际流速, 依次为 20 cm/s、30 cm/s、40 cm/s、50 cm/s、60 cm/s、80 cm/s、100 cm/s、120 cm/s。在试验中, 水流的主要作用力是重力、惯性力和紊动阻力, 因此本试验采用重力相似准则^[10], 试验流速依次为 5.2 cm/s、7.8 cm/s、10.3 cm/s、12.9 cm/s、15.5 cm/s、20.7 cm/s、25.8 cm/s 和 31.0 cm/s。

1.1.3 计算域和边界条件 数值模拟礁体模型尺寸见图 2, 流场计算域为长 4.2 m, 宽 3.0 m, 高 3.0 m 的长方体区域, 长方体前方为入口边界(inlet), 后方为出口边界(outlet), 上下左右为壁面(wall)。礁体长、宽、高均为 0.2 m, 将礁体放在计算域底部。礁体底部中心距前方入口边界 1.1 m, 距左右壁面 1.5 m, 距后方计算域出口边界 3.1 m, 距上壁面(wall) 3.0 m。礁体前方计算域约为礁体

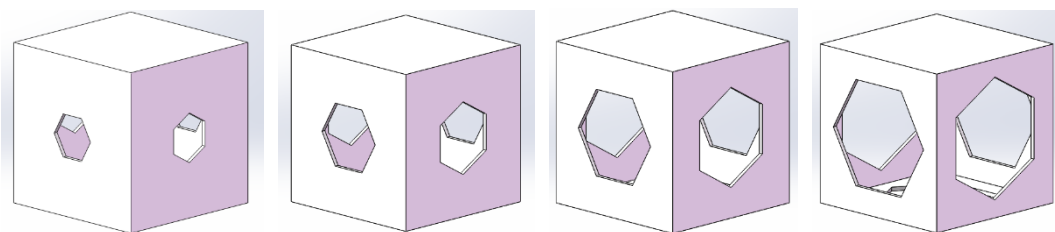


图 1 方形礁体模型示意图

Fig. 1 Diagram of the square reef model

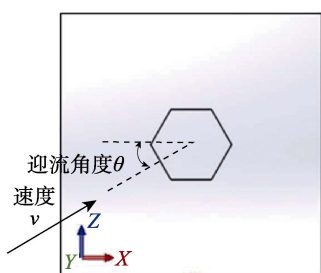


图 2 方形礁体模型迎流角度示意图

Fig. 2 Diagram of the square reef model angle of attack

的 5 倍, 左右计算域均为礁体 7 倍, 后方计算域为礁体的 15 倍, 计算域高为礁高的 15 倍, 即 $21L \times 15W \times 15H$ (图 3a)^[14-15]。

文中所设定的边界条件如下:

(1) 入口边界条件设置来流速度(velocity)分别为 5.2 cm/s、7.8 cm/s、10.3 cm/s、12.9 cm/s、15.5 cm/s、20.7 cm/s、25.8 cm/s、31.0 cm/s。

(2) 礁体与来流速度角度为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 。

(3) 出口边界为压力出口(pressure-out), 相对压强为 0 Pa。

(4) 计算域的上下左右表面选择壁面, 设置为

光滑和无滑移。

1.1.4 网格划分 使用 ANSYS Workbench ICEM 模块对人工鱼礁和计算域进行非结构性四面体网格划分, 并通过 Smooth Mesh Globally 提高网格质量至 0.4 以上, 全局网格质量低于 0.4 的网格数量占总网格比例小于 5%。采用有限体积法离散控制方程, 压力-速度耦合采用 SIMPLES 算法, 计算残差值取 10^{-3} , 其他采取默认值^[14-15]。本研究为了提高对礁体受力的计算精度, 将礁体单元网格最大尺寸设置为 3 mm, 并对礁体边界层进行加密。计算域单元网格最大尺寸设置为 50 mm, 网格相对礁体较为稀疏, 并进行网格无关性预试验, 结果表明, 当计算域网格最大尺寸不超过 50 mm 时, 网格数量的增多对结果基本无影响, 总网格数量介于 $1.5 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6$ (图 3b)。

1.2 物理模型试验

本试验于东京海洋大学水平循环水槽(水槽基本尺寸: $22.0 \text{ m} \times 8.5 \text{ m} \times 2.7 \text{ m}$)中进行, 水槽试验段尺寸为: 长 9.0 m、宽 2.2 m、高 1.95 m, 试验水深 1.6 m, 流速测试范围为: 0~2.0 m/s, 流速均

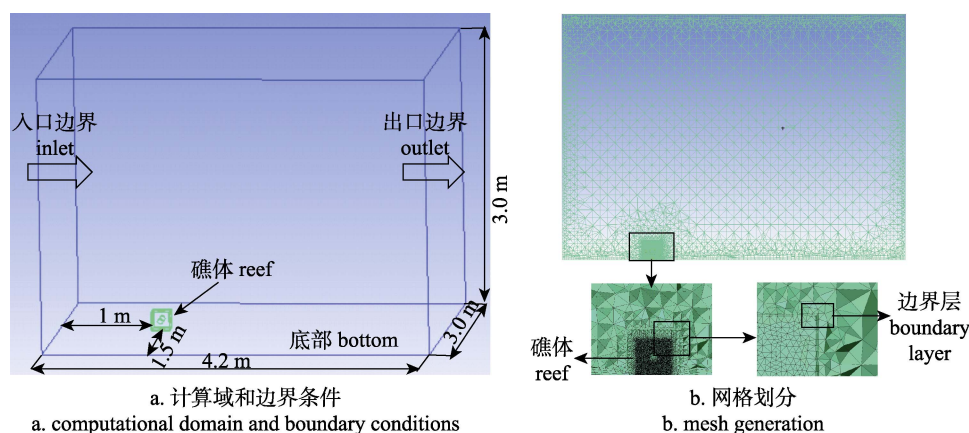


图 3 方形礁体模型计算域、边界条件及网格划分

Fig. 3 Square reef model computational domain, boundary conditions and mesh generation

一性良好, 流速波动 $\pm 2.0\%$ 以下。试验采用一根直径 16 mm, 长 36 cm 的连接杆, 上端与六分力测力仪(量程 50 N, 精度为 $\pm 0.30\%$)连接, 下端焊接有厚度为 2 mm, 大小为 10 cm $\times$ 10 cm 的小平板, 将此小平板与人工鱼礁模型连接(试验模型上端封闭, 与连接杆固定, 起到固定礁体和连接传感器的作用), 试验数据通过计算机采集, 试验装置示意图(图 4)。水槽模型试验模型尺寸同数值模拟礁体(图 2)。

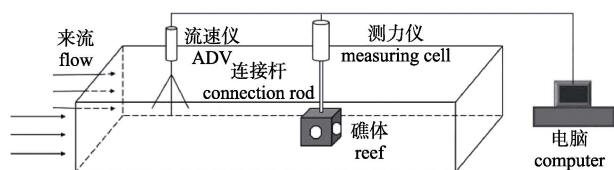


图 4 模型试验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the model test device

1.3 数据处理

根据上述试验条件, 由模型试验和数值模拟测得礁体模型阻力 $F_x(N)$ 值, 按下列公式计算其阻力系数 C_D 和雷诺数 Re [16-17]。

$$Re = \frac{Vl}{\nu} \quad (5)$$

$$C_D = \frac{2F_x}{\rho S V^2} \quad (6)$$

式中, V 为来流速度, l 为礁体特征长度, S 为礁体在与水流垂直方向的投影面积, ρ 和 ν 分别为试验流体的密度和动黏度。

2 结果与分析

2.1 人工鱼礁模型水阻力的数值模拟与水槽模型试验的对比验证

图 5 所示为六边形开口方形人工鱼礁数值模拟($\triangle$)和水槽模型试验($\blacksquare$)中, 人工鱼礁模型水阻力与来流速度、迎流角度和开口比之间的关系。从图 5 中可以看出, 不论是水槽模型试验还是数值模拟, 均能反映出人工鱼礁模型水阻力变化情况: 人工鱼礁模型水阻力均随着流速的增加而增大, 且其变化趋势基本相同。在 4 种开口比和 4 种迎流角度下, 人工鱼礁模型水阻力数值模拟值与水槽试验值的误差在 0.12%~17.18%, 且数

值模拟值略小于水槽试验值。

在相同迎流角度下, 人工鱼礁模型数值模拟与水槽模型试验均能反映出 4 种开口比下人工鱼礁礁体模型水阻力变化情况: 4 种开口比人工鱼礁模型水阻力 $F_x(0.0625) > F_x(0.14) > F_x(0.25) > F_x(0.39)$, 即水阻力随着开口比的增大而减小。当开口比为 0.0625、0.14、0.25、0.39 时, 人工鱼礁模型水阻力数值模拟值与水槽模型试验值的相对误差分别在 0.14%~12.42%、2.00%~13.87%、0.12%~17.18%、0.61%~16.65%, 平均误差分别为 3.66%、6.11%、10.00%、10.78%。从误差平均值可以看出, 人工鱼礁模型水阻力数值模拟值与水槽模型试验值之间的误差随着开口比的增加而增大。

在相同开口比下, 人工鱼礁礁体模型水槽模型试验与数值模拟均能反映出礁体在 4 种迎流角度下水阻力变化情况: 4 种迎流角度下, 水阻力 $F_x(30^\circ) > F_x(45^\circ) > F_x(15^\circ) > F_x(0^\circ)$, 即水阻力在迎流角度 $\theta=30^\circ$ 时最大。当迎流角度 θ 分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 时, 人工鱼礁模型水阻力数值模拟值与水槽模型试验值的相对误差分别在 0.12%~10.68%、2.00%~19.83%、2.55%~14.36%、0.14%~18.23%, 平均误差分别为 5.36%、11.10%、8.84%、10.52%。从平均值可以看出, 人工鱼礁模型水阻力数值模拟值与水槽模型试验值在迎流角度 θ 分别为 15° 、 30° 、 45° 时的误差略大于 $\theta=0^\circ$ 时的误差。

2.2 人工鱼礁模型水阻力系数的数值模拟与水槽模型试验的对比验证

2.2.1 数值模拟与水槽模型试验中人工鱼礁水阻力系数与流速之间的关系 如图 6 所示, 人工鱼礁模型数值模拟与水槽模型试验中, 水阻力系数与来流速度、迎流角度、开口比的关系。当 $Re > 1.5 \times 10^4$ ($V \geq 7.8$ cm/s) 时, 随着雷诺数 Re 增加水阻力系数 C_D 基本保持不变, 即水阻力系数为人工鱼礁模型试验状态已经进入自动模型区 [14-15]。将自动模型区的阻力系数取平均值, 即得该人工鱼礁模型在该开口比、迎流角度下的水阻力系数。本研究中人工鱼礁模型水阻力系数均为进入自动模型区后礁体平均水阻力系数 [17]。人工鱼礁模型水槽模型试验与数值模拟的水阻力系数在不同迎流

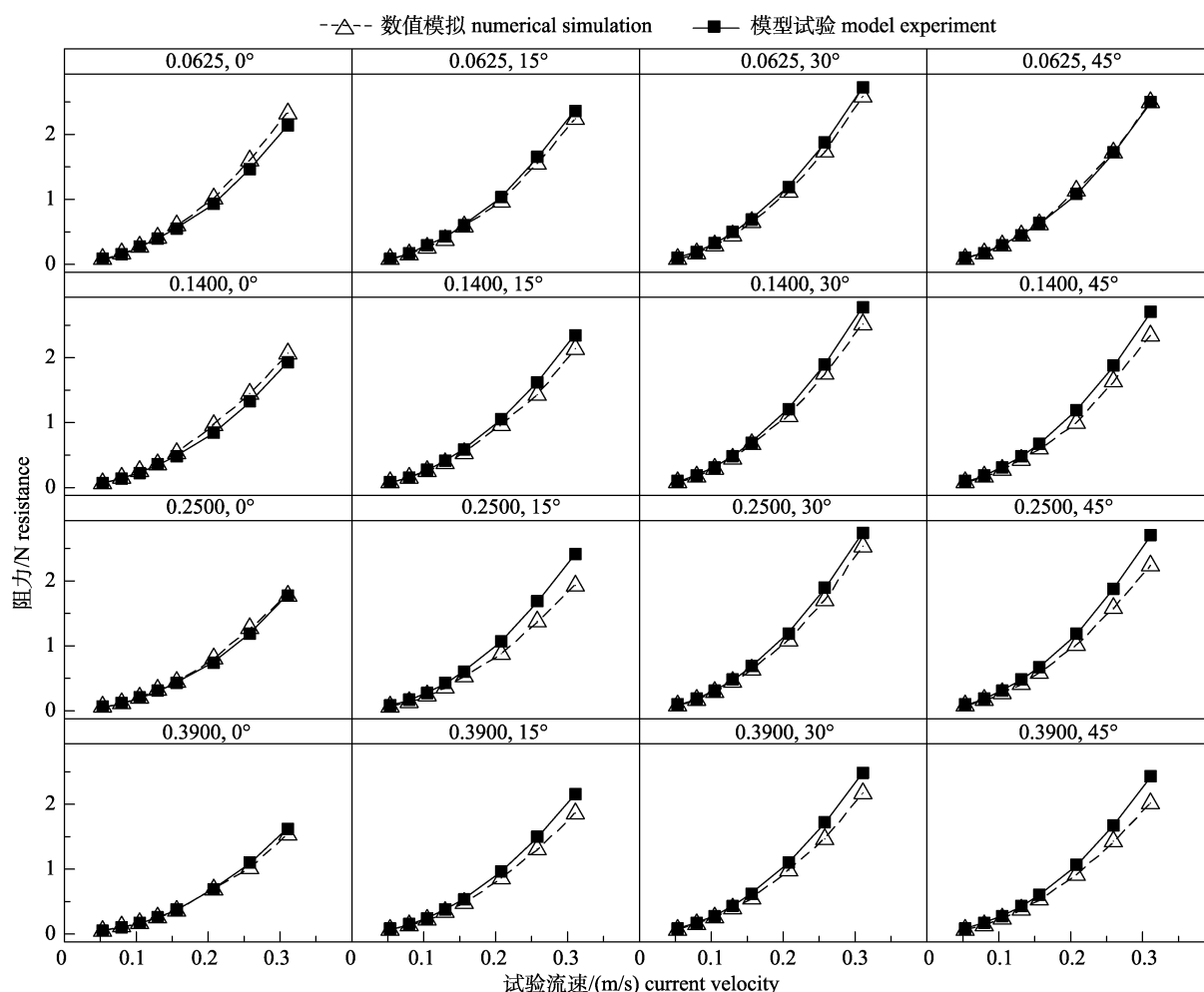


图 5 4 种开口比下人工鱼礁模型在不同迎流角度下水槽模型试验与数值模拟的水阻力比较
组块变量: 开口比、迎流角度。

Fig. 5 Comparison of water resistance between water tank model tests and numerical simulations of artificial reef models with different opening ratios at different angles of attack
Block variable: opening rate, angle of attack.

角度($\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)及不同开口比($\gamma_{ty}=0.0625, 0.14, 0.25, 0.39$)条件下变化规律基本一致, 且开口比和迎流角度的变化对人工鱼礁模型水阻力系数均有影响。4 种迎流角度和开口比情况下, 人工鱼礁模型数值模拟与水槽模型试验的水阻力系数取值范围分别为 0.94~1.37 和 0.94~1.54, 两者误差均在 20%以下, 平均误差为 5.26%。

2.2.2 数值模拟与水槽模型试验中人工鱼礁水阻力系数与开口比关系的比较 如图 7 所示($R_e > 1.5 \times 10^4, V \geq 7.8 \text{ cm/s}$), 在相同迎流角度下, 人工鱼礁模型数值模拟与水槽模型试验均能反映出 4 种开口比人工鱼礁模型水阻力系数变化情况: 当

$\theta=0^\circ$ 时, 人工鱼礁模型数值模拟与水槽模型试验中, 随着开口比的增加水阻力系数变化趋势较为平缓。当 $\theta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时, 人工鱼礁模型数值模拟和水槽模型试验中, 阻力系数 $C_D(0.39) > C_D(0.25) > C_D(0.14) > C_D(0.0625)$, 即水阻力系数均随着开口比的增加而增加, 具有明显的线性关系。当迎流角度 θ 为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时, 4 种开口比人工鱼礁水阻力系数数值模拟值、水槽模型试验值以及两者的相对误差见表 1。从平均误差值可以看出, 人工鱼礁水阻力系数数值模拟值与水槽模型试验值在迎流角度 θ 为 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时的误差略大于 θ 为 0° 时的误差。

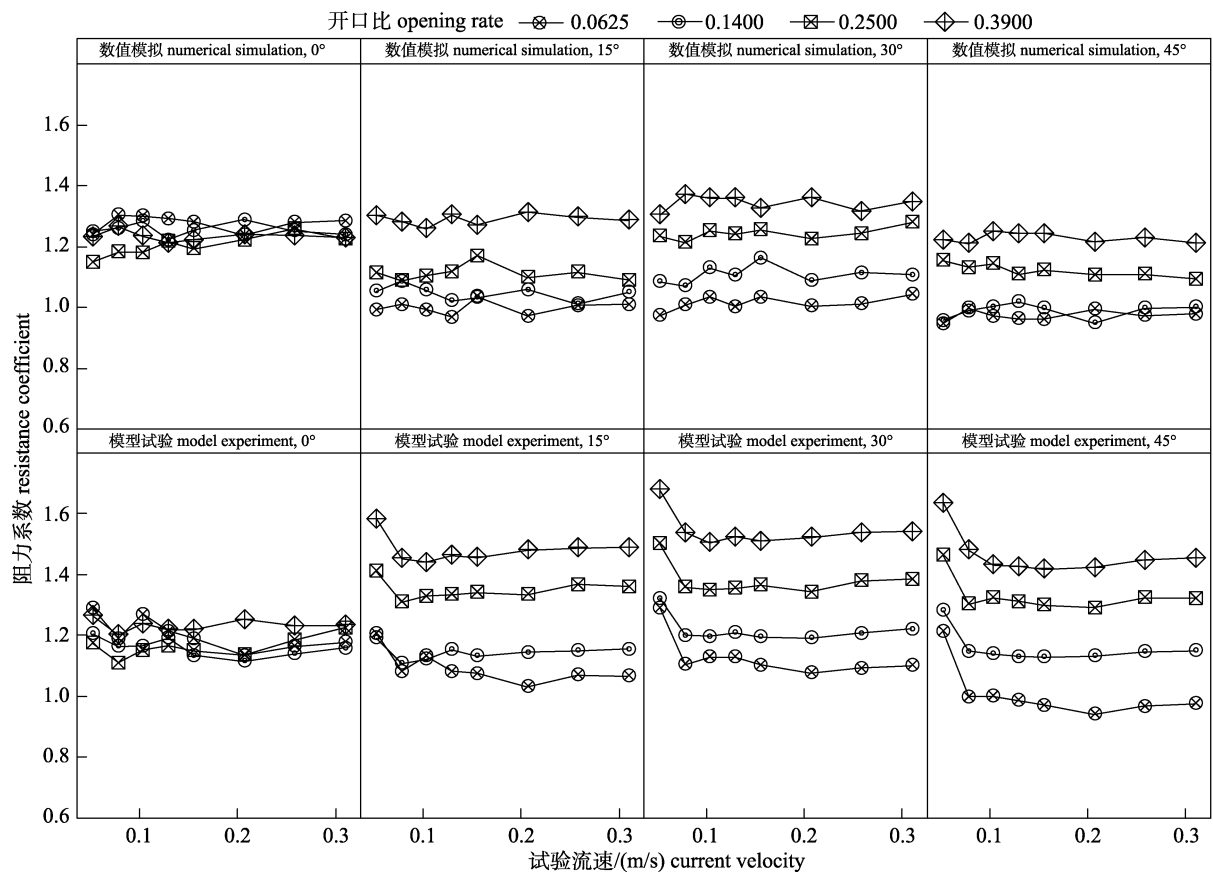


图 6 4 种开口比人工鱼礁模型模型试验与数值模拟在不同迎流角度下的阻力系数与流速的关系
块变量: 迎流角度.

Fig. 6 The relationship between the resistance coefficient and the current velocity of four kinds of ratios of artificial reef models in numerical simulation and model tests
Block variable: angle of attack.

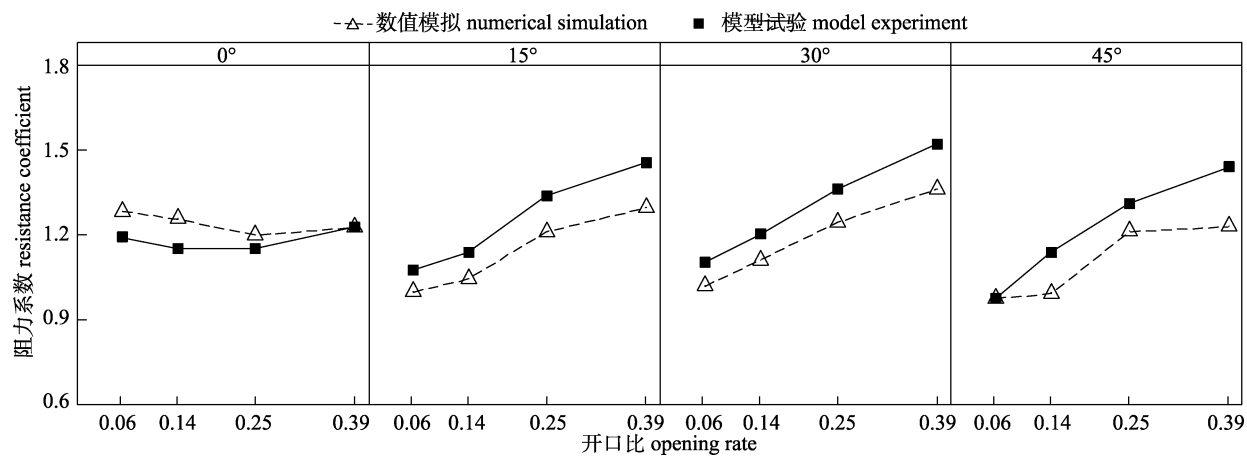


图 7 数值模拟与水槽模型试验中人工鱼礁水阻力系数与开口比关系的比较
块变量: 迎流角度.

Fig. 7 Comparison of the relationship between the resistance coefficient and the opening ratio of artificial reefs in numerical simulation and model tests
Block variable: angle of attack.

2.2.3 数值模拟与水槽模型试验中人工鱼礁水阻力系数与迎流角度关系的比较 如图 8 所示 ($R_e>1.5\times10^4$, $V\geqslant7.8$ cm/s), 在相同开口比下, 人工鱼礁模型水槽模型试验与数值模拟均能反映出礁体模型在 4 种迎流角度下水阻力系数变化情况: 当开口比 $\gamma_{ty}=0.0625$ 时, 人工鱼礁数值模拟与水槽模型试验中, 水阻力系数 $C_D(0^\circ)>C_D(30^\circ)>C_D(15^\circ)>C_D(45^\circ)$, 即水阻力系数在迎流角度 $\theta=0^\circ$ 时最大; 当开口比 $\gamma_{ty}=0.14$ 、 0.25 、 0.39 时, 人工

鱼礁模型数值模拟与水槽模型试验中, 水阻力系数 $C_D(0^\circ)<C_D(15^\circ)<C_D(30^\circ)>C_D(45^\circ)$, 即水阻力系数在迎流角度 $\theta=30^\circ$ 时最大。当开口比 $\gamma_{ty}=0.0625$ 、 0.14 、 0.25 、 0.39 时, 4 种开口比条件下人工鱼礁模型水阻力系数数值模拟值、水槽模型试验值以及两者的相对误差见表 2。从平均值可以看出, 人工鱼礁模型水阻力系数数值模拟值与水槽模型试验值之间的相对误差的平均值随着开口比的增加而增大。

表 1 数值模拟和水槽模型试验中人工鱼礁在四种迎流角度下取值范围及误差
Tab. 1 Value range and error of artificial reef in numerical simulation and model test under four attack angles

迎流角度 θ angle of attack	数值模拟值 numerical simulation value	水槽模型试验值 model experiment value	相对误差/% relative error	平均误差/% average error
0°	1.20–1.28	1.15–1.23	0.13–9.14	5.22
15°	1.00–1.30	1.08–1.46	7.24–10.90	8.95
30°	1.02–1.36	1.10–1.52	7.60–10.38	8.58
45°	0.98–1.23	0.98–1.44	0.00–14.64	8.73

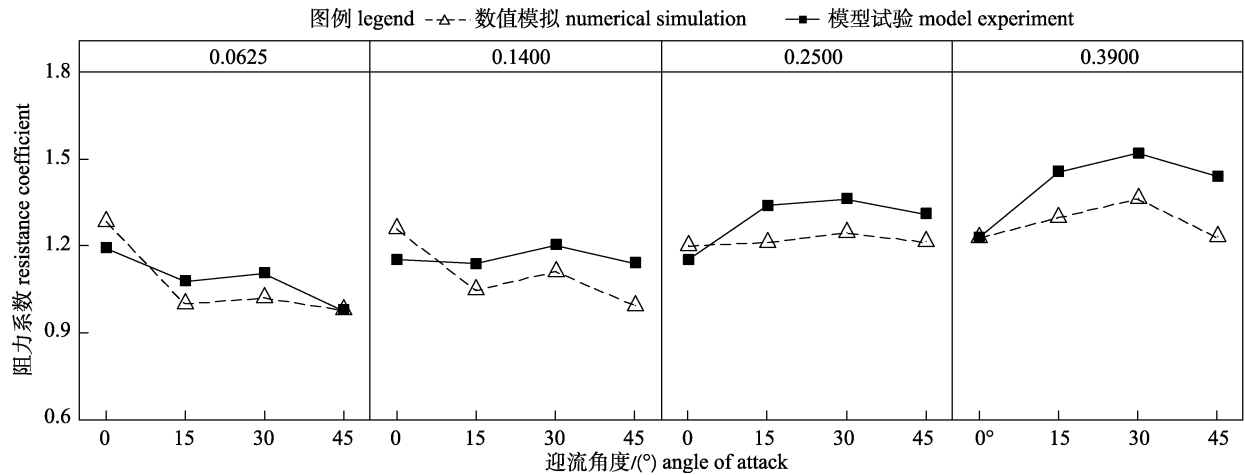


图 8 数值模拟与水槽模型试验中人工鱼礁模型水阻力系数与迎流角度关系的比较
组块变量: 开口比。
Fig. 8 Comparison of the relationship between resistance coefficient and attack angle of artificial reef in numerical simulation and model test
Block variable: opening rate.

表 2 数值模拟和水槽模型试验中人工鱼礁在四种开口比下取值范围及误差
Tab. 2 Value range and error of artificial reef under four opening ratios in numerical simulation and model test

开口比 γ_{ty} opening ratio	数值模拟值 numerical simulation value	水槽模型试验值 model experiment value	相对误差/% relative error	平均误差/% average error
0.06	0.98–1.28	0.98–1.19	0.00–7.75	1.80
0.14	0.99–1.25	1.14–1.20	7.60–12.80	4.84
0.25	1.20–1.25	1.23–1.36	4.12–9.54	5.40
0.39	1.23–1.36	1.23–1.52	0.13–14.64	9.01

3 讨论与分析

3.1 数值模拟与水槽模型试验中人工鱼礁模型阻力及阻力误差

本研究表明数值模拟与水槽模型试验中人工鱼礁礁体模型在不同条件下阻力变化趋势具有一致性。唐衍力^[5]使用水槽模型试验方法得出礁体模型阻力 $F_x(45^\circ) > F_x(0^\circ)$, Woo 等^[4]利用数值模拟方法对人工鱼礁的水动力特性进行了研究, 计算了 24 种不同形状人工鱼礁阻力值, 得出阻力与礁体迎流角度有明显关系, 本研究在此基础上利用数值模拟和模型试验方法研究礁体模型在不同迎流角度下的阻力值, 结果显示: 礁体阻力 $F_x(30^\circ) > F_x(45^\circ) > F_x(15^\circ) > F_x(0^\circ)$, 在迎流角度 $\theta=30^\circ$ 下阻力最大, 进一步表明数值模拟方法适用于礁体在不同迎流角度和不同开口比下的阻力研究。然而人工鱼礁水阻力数值模拟值与水槽模型试验值之间的误差随着开口比的增加而增大和人工鱼礁阻力数值模拟值与水槽模型试验值在迎流角度 $\theta=15^\circ$ 、 30° 、 45° 时的误差略大于 $\theta=0^\circ$ 时的误差, 主要有以下几个原因: (1) 可能是因为礁体开口的增大, 数值模拟时边界层的层数和高度没有做出改变, 从而造成误差增大; (2) 可能是由于数值模拟人工鱼礁在迎流角度 $\theta=15^\circ$ 、 30° 、 45° 网格的质量低于迎流角度 $\theta=0^\circ$, 说明迎流角度的变化对数值模拟的准确性可产生一定的影响, 但误差均在允许范围之内^[10]; (3) 水槽模型试验中难免存在误差, 这些误差可能有多个因素引起, 如水槽的震动以及连接杆的影响^[8]; (4) 为试验便于实施和采集数据, 数值模拟中礁体放置在底部, 模型试验中礁体未放置底部, 数值模拟和水槽模型试验中礁体放置方式不同而产生误差。

3.2 数值模拟与水槽模型试验中人工鱼礁模型阻力系数及阻力系数误差

本研究表明数值模拟与水槽模型试验中人工鱼礁礁体模型在不同条件下阻力系数变化趋势具有一致性。于定勇等^[15]利用数值模拟方法研究不同开口比方形人工鱼礁的阻力系数, 得出数值模拟方法适用于不同开口比人工鱼礁阻力系数的研究, 本研究进一步表明: 数值模拟方法同样适用

于不同迎流角度下人工鱼礁阻力系数研究。Woo 等^[4]利用数值模拟方法研究结果认为, 礁体的阻力系数与迎流角度有关, 这和本文的研究结果一致, 并且本文进一步研究表明当 $\theta=15^\circ$ 、 30° 、 45° 时, 数值模拟方法与水槽模型试验方法礁体模型阻力系数均随着开口比的增加而增加, 具有明显的线性关系。4 种迎流角度下, 数值模拟方法和水槽模型试验方法礁体模型阻力系数在迎流角度 $\theta=30^\circ$ 时最大, 这与刘健等^[8]利用风洞模型试验研究结果相一致, 也表明了数值模拟方法在不同迎流角度下的研究结果和物理模型试验方法相一致。人工鱼礁阻力系数数值模拟值与水槽模型试验值在迎流角度 $\theta=15^\circ$ 、 30° 、 45° 时的误差略大于 $\theta=0^\circ$ 时的误差, 人工鱼礁阻力系数数值模拟值与水槽模型试验值之间的相对误差随着开口比的增加而增大, 可能是因为以下两点: (1) 当迎流角度 $\theta=15^\circ$ 、 30° 、 45° 时, 数值模拟中礁体模型摆放方式不规则, 导致礁体附近网格质量降低, 从而引出的误差; (2) 随着开口比的增加, 人工鱼礁开口大小边界条件发生改变, 而边界层的加密层数和高度没有做出相应调整, 导致礁体开口附近网格质量降低, 从而引出了误差。

4 小结

本文以六边形开口方形人工鱼礁为研究对象, 采用水槽模拟试验和数值模拟交互验证的方式开展研究, 具有一定的创新性。数值模拟与模型试验阻力的相对误差在 0.12%~17.18%, 平均误差 7.43%; 礁体阻力系数的相对误差在 0.03%~14.64%, 平均误差 5.26%; 阻力及阻力系数误差均在 20% 以下, 在误差允许范围内。模型试验与数值模拟阻力和阻力系数相关系数 R 分别为 0.99 和 0.80, $P < 0.001$, 具有极强的相关性, 表明数值模拟和水槽试验具有良好的吻合性, 数值模拟在人工鱼礁阻力及阻力系数的应用可为将来人工鱼礁多角度研究提供研究方法和条件, 也可在以后的研究中, 细化迎流角度, 进一步发现规律, 为人工鱼礁的结构设计、迎流方式提供了一定的理论依据, 对于进一步降低人工鱼礁前期设计和评价成本具有一定的意义。

参考文献:

- [1] Pickering H, Whitmarsh D. Artificial reefs and fisheries exploitation: A review of the 'attraction versus production' debate, the influence of design and its significance for policy[J]. Fisheries Research, 1997, 31(1-2): 39-59.
- [2] Zhong S Q, Sun M C, Zhang S Y, et al. Study on the design and stability of the artificial steel prism reef[J]. Marine Fisheries, 2006, 28(3): 234-240. [钟术求, 孙满昌, 章守宇, 等. 钢制四方台型人工鱼礁礁体设计及稳定性研究[J]. 海洋渔业, 2006, 28(3): 234-240.]
- [3] Xu L X, Liu J, Zhang S, et al. Research on the design and stability calculation of the artificial Hui style reef[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(12): 79-83, 94. [许柳雄, 刘健, 张硕, 等. 回字型人工鱼礁礁体设计及其稳定性计算[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(12): 79-83, 94.]
- [4] Woo J, Kim D, Yoon H S, et al. Characterizing Korean general artificial reefs by drag coefficients[J]. Ocean Engineering, 2014, 82: 105-114.
- [5] Tang Y L, Wang L, Liang Z L, et al. Test of the hydrodynamic performance of square artificial reefs[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(5): 713-716. [唐衍力, 王磊, 梁振林, 等. 方型人工鱼礁水动力性能试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(5): 713-716.]
- [6] Liu H S, Ma X, Zhang S Y, et al. Research on model experiments of effects of artificial reefs on flow field[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(2): 229-236. [刘洪生, 马翔, 章守宇, 等. 人工鱼礁流场效应的模型实验[J]. 水产学报, 2009, 33(2): 229-236.]
- [7] Liu H S, Ma X, Zhang S Y, et al. Validation and comparison between wind tunnel experiments and numerical simulation of flow field around artificial reefs[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(3): 365-371. [刘洪生, 马翔, 章守宇, 等. 人工鱼礁流场风洞实验与数值模拟对比验证[J]. 中国水产科学, 2009, 16(3): 365-371.]
- [8] Liu J, Xu L X, Zhang S, et al. Research on model experiments of the resistance coefficient of artificial reefs[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(10): 35-39. [刘健, 许柳雄, 张硕, 等. 人工鱼礁礁体模型阻力系数的实验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(10): 35-39.]
- [9] Li J, Zhang S Y. The comparison between numerical simulation and water channel experiment on an Mi-zi artificial reef[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(10): 1587-1594. [李珺, 章守宇. 米字型人工鱼礁流场数值模拟与水槽实验的比较[J]. 水产学报, 2010, 34(10): 1587-1594.]
- [10] Zheng Y X, Liang Z L, Guan C T, et al. Numerical simulation and experimental study on flow field of artificial reefs in three tube-stacking layouts[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(1): 11-19. [郑延璇, 梁振林, 关长涛, 等. 三种叠放形式的圆管型人工鱼礁流场效应数值模拟与 PIV 试验研究[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(1): 11-19.]
- [11] Liu X M, Zheng Y N, Chen C P, et al. Numerical simulation of flow around frame and caisson artificial reef models[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2019, 34(1): 133-138. [刘心媚, 郑艳娜, 陈昌平, 等. 框架型与沉箱型人工鱼礁绕流特性的数值模拟[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(1): 133-138.]
- [12] Zhang J, Pan Y, Feng D J, et al. Study on numerical simulation of hydrodynamic property of frame-type floating reefs under wave action[J]. Fishery Modernization, 2018, 45(2): 42-49. [张健, 潘昀, 冯德军, 等. 框架式浮鱼礁波浪水动力特性数值模拟研究[J]. 渔业现代化, 2018, 45(2): 42-49.]
- [13] Gong P H, Zheng Y X, Li J, et al. Flow field effect and stability of the equilateral tower-type truss artificial reef[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(5): 1021-1028. [公丕海, 郑延璇, 李娇, 等. 塔型桁架人工鱼礁流场效应及稳定性[J]. 中国水产科学, 2019, 26(5): 1021-1028.]
- [14] Tang Y L, Long X Y, Wang X X, et al. Comparative analysis on flow field effect of general artificial reefs in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8): 97-103. [唐衍力, 龙翔宇, 王欣欣, 等. 中国常用人工鱼礁流场效应的比较分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 97-103.]
- [15] Yu D Y, Yang Y H, Li Y J. Research on hydrodynamic characteristics and stability of artificial reefs with different opening ratios[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(4): 128-136. [于定勇, 杨远航, 李宇佳. 不同开口比人工鱼礁体水动力特性及礁体稳定性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 128-136.]
- [16] Jiang S J, Liu H D, Wu W, et al. Study on hydrodynamics and effect evaluation for constructing of an artificial reef[J]. Journal of Marine Sciences, 2017, 35(2): 53-60. [姜少杰, 刘海敌, 吴伟, 等. 一种人工鱼礁的水动力学研究与建设效果评价[J]. 海洋学研究, 2017, 35(2): 53-60.]
- [17] Zhang J, Feng D J, Wang P, et al. Hydrodynamic characteristics of a cage-net floating reef in waves[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(5): 1014-1020. [张健, 冯德军, 王萍, 等. 波浪作用下箱网式浮鱼礁水动力特性研究[J]. 中国水产科学, 2019, 26(5): 1014-1020.]

Comparison of a numerical simulation and a test model of a hexagonal and square opening artificial reef

ZHANG Shuo^{1,2}, ZHANG Shidong¹, HU Fuxiang³, CHU Wenhua^{1,2}, HUANG Chengyu¹, LIU Feifan¹, ZHANG Qiuchi¹

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo 108-8477, Japan

Abstract: To verify the resistance coefficient used in numerical simulations and experimental models of hexagonal and square opening artificial reefs, an experimental model and numerical simulations were used to measure and calculate the resistance coefficients of the two methods at four different opening rates ($\gamma_0=0.0625, 0.14, 0.25$ and 0.39) in hexagonal opening and square opening artificial reefs with four kinds of flow angles of attack ($\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$, and 45°). The results showed that (1) in both the numerical simulation and the experimental model, the resistance of artificial reef models decreased with the increase in opening rate. The resistance of reef models can be changed by changing the angles of attack. In addition, the artificial reef model resistance reached a maximum at $\theta=30^\circ$ at four angles of attack. (2) In both the numerical simulation and the model experiment, when $\theta=15^\circ, 30^\circ$, and 45° , the resistance coefficient increased with an increase of opening rate in an obvious linear relationship, and the resistance coefficient reached its maximum when $\theta=30^\circ$. (3) The relative error of resistance between the numerical simulation and the experimental model resistance ranged from 0.12% to 17.18%, with an average error of 7.43%; the relative error of resistance coefficient ranged from 0.03% to 14.64%, with an average error of 5.26%. The resistance and coefficient of resistance error were below 20%. The correlation coefficients, R , between the experimental model and the numerical simulation for resistance and resistance coefficients were 0.99 and 0.80, respectively ($P<0.001$), showing a strong correlation. Therefore, it is feasible to use numerical simulation to study the hydrodynamic performance of artificial reefs.

Key words: artificial reef; opening ratio; angle of attack; experimental model; numerical simulation

Corresponding author: CHU Wenhua. E-mail: whchu@shou.edu.cn