



六边形开口方形人工鱼礁水动力性能模型实验

张 硕^{1,2,3}, 张世东¹, 初文华^{1,2}, 胡夫祥^{4*}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 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 201306;

3. 上海海洋大学, 海洋牧场工程技术研究中心, 上海 201306;

4. 东京海洋大学, 东京 108-8477)

摘要: 为了研究六边形开口方形人工鱼礁阻力系数和侧向力系数与迎流角度、开口比之间的关系, 利用水槽模型实验对 4 种开口比 ($\gamma_{iy} = 0.06, 0.14, 0.25, 0.39$) 的六边形开口方形人工鱼礁在 4 种迎流角度 ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) 下的阻力和侧向力进行测定, 并计算其阻力系数和侧向力系数。结果显示, 六边形开口方形礁体模型阻力 $F_x(30^\circ) > F_x(45^\circ) > F_x(15^\circ) > F_x(0^\circ)$, 侧向力 $F_y(30^\circ) > F_y(15^\circ) > F_y(45^\circ) > F_y(0^\circ)$; 礁体模型阻力 $F_x(30^\circ)$ 是 $F_x(0^\circ)$ 的 1.28~1.72 倍, 侧向力 $F_y(30^\circ)$ 是 $F_y(0^\circ)$ 的 2.8~11.1 倍。迎流角度对礁体模型的阻力以及侧向力可产生较大影响。4 种开口比和 4 种迎流角度下, 礁体模型阻力系数 C_D 变化范围为 0.98~1.53。阻力系数 $C_D(30^\circ) > C_D(15^\circ) > C_D(45^\circ) > C_D(0^\circ)$, 阻力系数 $C_D(30^\circ)$ 与 $C_D(0^\circ)$ 相比最大可达 1.26 倍; 4 种开口比和 4 种迎流角度下, 礁体模型侧向力系数 C_L 变化范围为 0.001~0.210。侧向力系数 $C_L(30^\circ) > C_L(15^\circ) > C_L(45^\circ) > C_L(0^\circ)$, 侧向力系数 $C_L(30^\circ)$ 与 $C_L(0^\circ)$ 相比最大可达 3.5 倍。当 $\theta = 30^\circ$ 时, 不能忽视侧向力对礁体模型的作用力。

关键词: 人工鱼礁; 开口比; 迎流角度; 水槽模型实验

中图分类号: S 953.1

文献标志码: A

近年来, 随着我国近海海洋牧场的快速发展, 人工鱼礁投放规模增大, 其大小、形状和结构也趋向于大型化和复杂化^[1-4]。由于礁体结构和形状等几何参数对于人工鱼礁水动力功能的发挥和礁体投放的安全性均会产生影响^[5-6], 因此, 人工鱼礁水动力性能和稳定性也成为研究人员在评估人工鱼礁建设效果时需要考虑的主要因素之一。

目前, 学者就人工鱼礁的开口比、迎流角度、礁体类型和开口形状等参数变化对礁体水动力性能的影响等方面进行了一定研究, 发现

不同开口比和迎流角度的礁体其水动力性能具有明显差异^[7-10]。人工鱼礁开口比 (γ) 是指迎流面开口部分的投影面积与迎流面全投影面积之比, 迎流角度为水流方向与迎流面中垂线的夹角 θ ^[9-10]。为了更准确地评估人工鱼礁安全性能, 国内外学者通过物理模型实验或者数值模拟等方法就人工鱼礁的水动力性能开展了系列研究。Woo 等^[11]、Kim 等^[12] 利用计算机数值模拟的方法研究了礁体在不同迎流角度下的阻力系数; 唐衍力等^[13] 利用水槽模型实验方法, 得出方型礁体迎流角度变化对阻力系数有较大影响; 刘

收稿日期: 2019-09-24 修回日期: 2020-03-24

资助项目: 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); 国家自然科学基金 (31972845)

通信作者: 胡夫祥, E-mail: fuxiang@kaiyodai.ac.jp

健等^[14]利用风洞模型实验方法,探讨了方型礁体不同开口比与阻力系数的关系;于定勇等^[15]利用计算机数值模拟方法研究礁体阻力系数与开口比的关系。以上研究为人工鱼礁的设计、投放和安全性评价提供了参考^[9-15],但以人工鱼礁开口比和迎流角度为特征参数来探讨礁体阻力系数、侧向力系数等方面的研究还鲜有报道。为此,本研究利用水槽模型实验方法对六边形开口方形人工鱼礁在不同开口比和迎流角度下产生的阻力系数与侧向力系数进行研究,建立起阻力系数与开口比之间的关系,以期为人鱼礁的设计、投放以及稳定性预测提供参考。

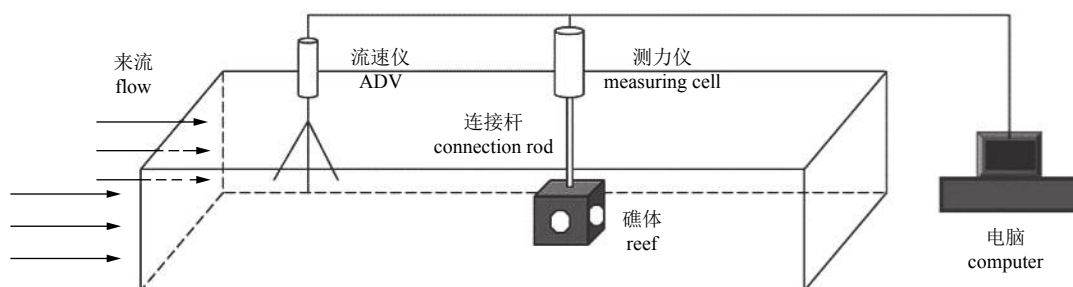


图1 模型实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model test device

1.2 礁体模型

实验礁体模型材质为有机玻璃,实物鱼礁材质为混凝土。实物礁体为棱长3 m的方形人工鱼礁,实验礁体模型取尺度比为1:15。根据糙率相似准则(公式1),实验礁体模型采用有机玻璃,根据表1所示的有机玻璃和混凝土的糙率,基本符合(1)式的条件。

表1 礁体模型与实物糙率对照表

Tab. 1 Reef model and physical roughness comparison table

参数 parameter	有机玻璃 synthetic glass	混凝土 concrete
参考糙率范围 reference roughness range	0.008~0.0095	0.014~0.017
计算糙率 computational roughness	0.009	0.014

$$\lambda_n = \lambda_L^{1/6} \quad (1)$$

式中, λ_n 为实物与模型的糙率比尺, λ_L 为实物与模型的长度比尺, $\lambda_L=15$ 。

实验礁体模型是中心开口为六边形的方形

1 材料与方

1.1 实验装置

本实验于东京海洋大学水平循环水槽(水槽基本尺寸:22.0 m×8.5 m×2.7 m)中进行,水槽实验段尺寸:长9.0 m、宽2.2 m、高1.95 m,水深1.6 m,流速测试范围为0~2.0 m/s,流速均一性良好,流速波动±2.0%以下。实验采用一根直径16 mm,长36 cm的连接杆,一端与六分力测力仪(量程50 N,精度为±0.30%)连接,另一端焊接有10 cm×10 cm,厚度为2 mm的小平板与人工鱼礁模型连接,实验数据通过计算机采集,实验装置示意图见图1。

人工鱼礁模型。礁体模型的尺寸规格为20 cm×20 cm×20 cm,壁厚度为5 mm,为便于连接六分力测力仪,除礁体顶面不作开口处理外,其他5个侧面开口均为相同的六边形。4个礁体的中心开口边长分别为3.10、4.65、6.20和7.76 cm,开口比分别为0.06、0.14、0.25和0.39(图2)。

1.3 实验方法

根据人工鱼礁投放海域的最大流速和实验流速梯度设计,选取海域8个流速梯度,依次为20、30、40、50、60、80、100和120 cm/s。在水槽实验中,水流的主要作用力是重力、惯性力和紊动阻力,因此本实验采用重力相似准则,实验流速依次为5.2、7.8、10.3、12.9、15.5、20.7、25.8和31.0 cm/s。每个礁体模型在水槽中按照迎流角度 θ 为0、15、30和45(°)摆放(图3),依次在8个实验流速下测得礁体模型所受阻力和侧向力,实验具体因素和水平见表2。由六分力测力仪测得礁体模型所受阻力、侧向力和由电磁流速仪测得的流速,经由A/D转换器后输入

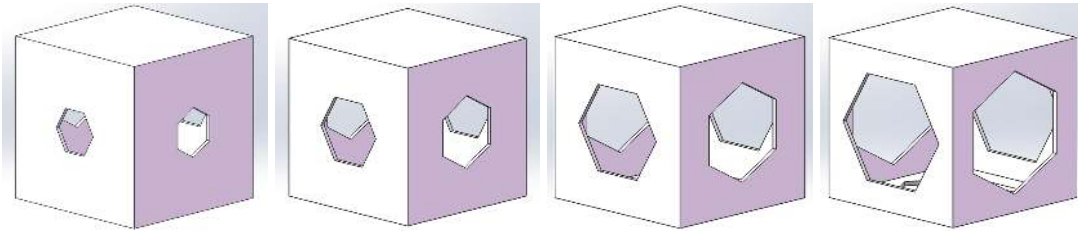


图 2 方形礁体模型示意图

Fig. 2 Square reef model diagram

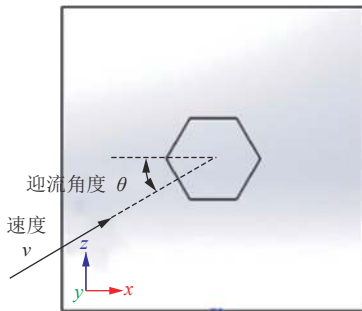


图 3 迎流角度示意图

Fig. 3 Sketch of angle of attack

表 2 实验方案设计

Tab. 2 Experimental scheme design

因素 factors	水平 level
开口比 opening ratio	0.06、0.14、0.25、0.39
迎流角度/(°) angle of attack	0、15、30、45
海域流速/(cm/s) current velocity	20、30、40、50、60、80、100、120
实验流速/(cm/s) experiment velocity	5.2、7.8、10.3、12.9、15.5、20.7、25.8、31.0

计算机记录。每个测量值是在流速和模型迎角 θ 稳定后 20 s 内所获得的 400 个数据的平均值。

1.4 数据分析

根据上述实验条件, 由六分力测力仪测得礁体模型阻力 F_x (N) 和侧向力 F_y (N) 值, 按下列公式计算其雷诺数 R_e (公式 2)、阻力系数 C_D (公式 3) 和侧向力系数 C_L (公式 4)。

$$R_e = \frac{Vl}{\nu} \quad (2)$$

$$C_D = \frac{2F_x}{\rho S V^2} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{2F_y}{\rho S V^2} \quad (4)$$

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

有研究表明, 阻力系数大小与物体的通透性有关^[16-17]。礁体模型在不同的迎流角度下, 其迎流面积和前后面的通透面积具有显著差异, 进而礁体模型的水流透过性不同, 因此, 本实验引入投影开口比 γ_{ty} 和通透开口比 γ_{tt} ^[14], 其值由 solidworks 软件计算得出。六边形开口礁体模型以 $\theta=15^\circ$ 冲角迎流时的平面示意图, A_1 为对应角度下全投影面积, A_2 、 A_4 为开口投影面积, A_3 为通透投影面积, 投影开口比 $\gamma_{ty} = \frac{A_2 + A_4}{A_1}$, 即开口投影面积与礁面全投影面积之比; 通透开口比 $\gamma_{tt} = \frac{A_3}{A_1}$, 即通透投影面积与迎流面积之比(图 4)。本实验以礁体模型阻力系数为响应变量, 投影开口比、通透开口比为变量, 利用 minitab 中非线性回归, 拟合阻力系数 C_D 的计算公式。

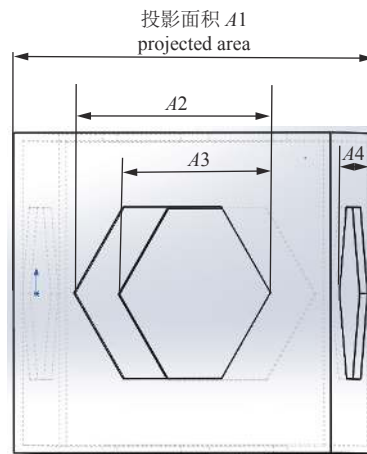


图 4 迎流面积示意图

Fig. 4 Schematic diagram of upstream area

2 结果

2.1 阻力、侧向力与开口比、迎流角度及流速的关系

礁体模型在4种开口比和4种迎流角度下，阻力随流速变化趋势相似。相同开口比下，礁体模型阻力在 $\theta=30^\circ$ 时最大、 $\theta=45^\circ$ 时次之、 $\theta=0^\circ$ 时最小，即 $F_x(30^\circ) > F_x(45^\circ) > F_x(15^\circ) > F_x(0^\circ)$ ，且 $F_x(30^\circ)$ 是 $F_x(0^\circ)$ 的1.28~1.72倍，迎流角度对礁体模型阻力的影响效果随着开口比增加而增大；相同迎流角度下，礁体模型阻力随着开口比增加而逐渐降低，即 $F_x(0.06) > F_x(0.14) > F_x(0.25) > F_x(0.39)$ ，且当 $\theta=0^\circ$ 时，阻力随开口比增加，其下降更显著(图5)。礁体模型在4种开口比和4种迎流角度下，侧向力随流速变化趋势相似，随着开口比的增加，上升幅度均逐渐减小(图6)。相同开口比下，礁体模型侧向力在 $\theta=30^\circ$ 时最大、 $\theta=15^\circ$ 时次之、 $\theta=0^\circ$ 时最小，即 $F_y(30^\circ) >$

$F_y(15^\circ) > F_y(45^\circ) > F_y(0^\circ)$ ，且 $F_y(30^\circ)$ 是 $F_y(0^\circ)$ 的2.8~11.1倍，迎流角度对礁体模型侧向力的影响效果随着开口比增加而降低；相同迎流角度下，礁体模型侧向力随着开口比增加而减小，即 $F_y(0.06) > F_y(0.14) > F_y(0.25) > F_y(0.39)$ 。

礁体所受作用力为阻力和侧向力的合力，本实验将阻力和侧向力进行比较。当 $\theta=0^\circ$ 时，礁体模型侧向力基本不变且趋近于0，其侧向力相对阻力较小，仅为阻力的1%~5%。当 $\theta=30^\circ$ 时，侧向力随着流速的增大而逐渐增大，但侧向力随着开口比的增加逐渐减小，其侧向力与阻力之比为1%~22%，因此当 $\theta=30^\circ$ 时，不能忽视侧向力对人工鱼礁的作用力。综上所述，当 $\theta=0^\circ$ 、 $\gamma=0.39$ 时，礁体模型阻力和侧向力最小，礁体模型作用力最小；当 $\theta=30^\circ$ 、 $\gamma=0.06$ 时，礁体模型阻力和侧向力最大，礁体模型作用力最大；迎流角度对礁体模型阻力、侧向力均可产生较大影响。

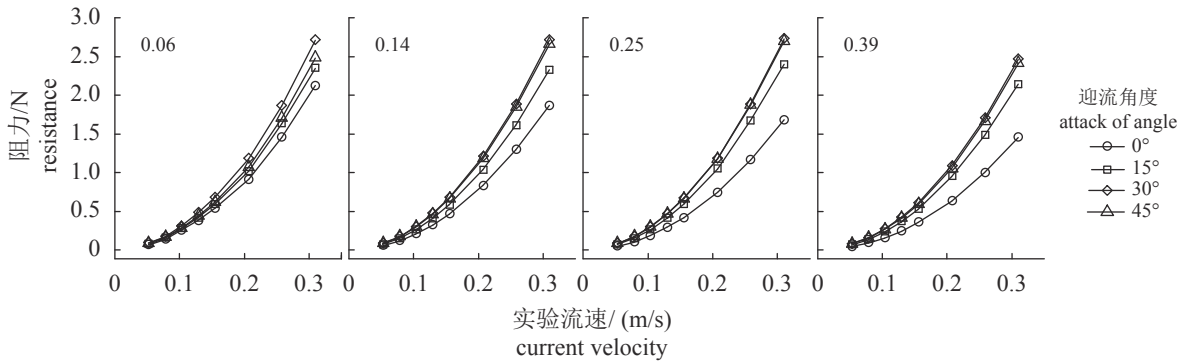


图5 4种开口比和4种迎流角度下礁体模型阻力与流速的关系

Fig. 5 Relation between resistance and velocity of reef model at 4 opening ratios and 4 angles of attack

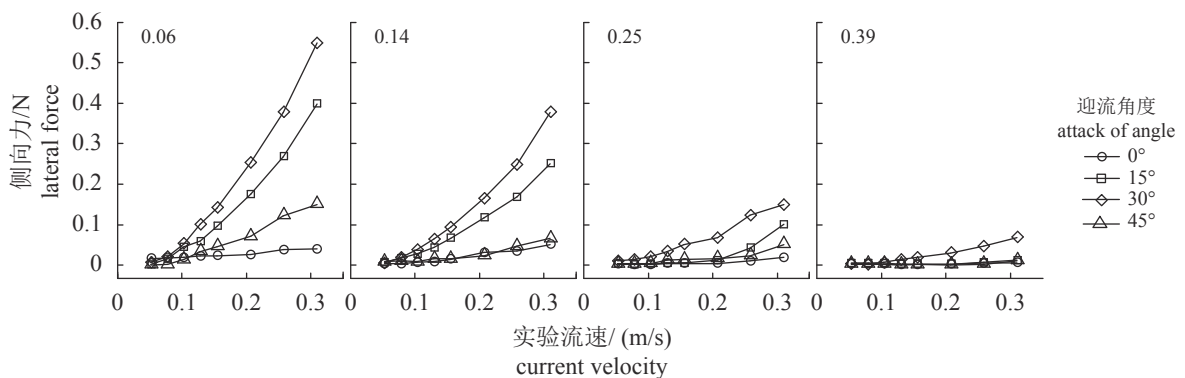


图6 4种开口比和4种迎流角度下礁体模型侧向力与流速的关系

Fig. 6 Relation between lateral force and velocity of reef model at 4 opening ratios and 4 angles of attack

2.2 阻力系数、侧向力系数与雷诺数、迎流角度及开口比的关系

阻力系数和侧向力系数与雷诺数的关系

当雷诺数 $R_e > 1.5 \times 10^4 (V \geq 7.8 \text{ cm/s})$ 时, 随着 R_e 增加, 阻力系数 C_D 基本保持不变, 即阻力系数进入自动模型区^[14-15] (图 7); 当雷诺数 $R_e > 2.25 \times 10^4 (V \geq 10.3 \text{ cm/s})$, 随着 R_e 增加, 侧向力系数 C_L 基本保持不变, 即侧向力系数进入自动模型区。礁体模型的 C_D 与 C_L 进入自动模型区后,

其取值范围分别为 0.98~1.53 和 0.001~0.210, 为确保数据的准确性, 将自动模型区的阻力系数和侧向力系数取平均值, 即得该礁体模型在当前开口比和迎流角度下的 C_D 与 C_L (图 8)。本实验所讨论的 C_D 与 C_L 均为进入自动模型区后的平均值。

阻力系数和侧向力系数与迎流角度及开口比的关系 礁体模型的阻力系数在 4 种迎流角度 ($\theta=0^\circ、15^\circ、30^\circ、45^\circ$) 及 4 种开口比 ($\gamma_{\text{开}}=0.06、0.14、0.25、0.39$) 条件下具有规律性变化 (图 9)。

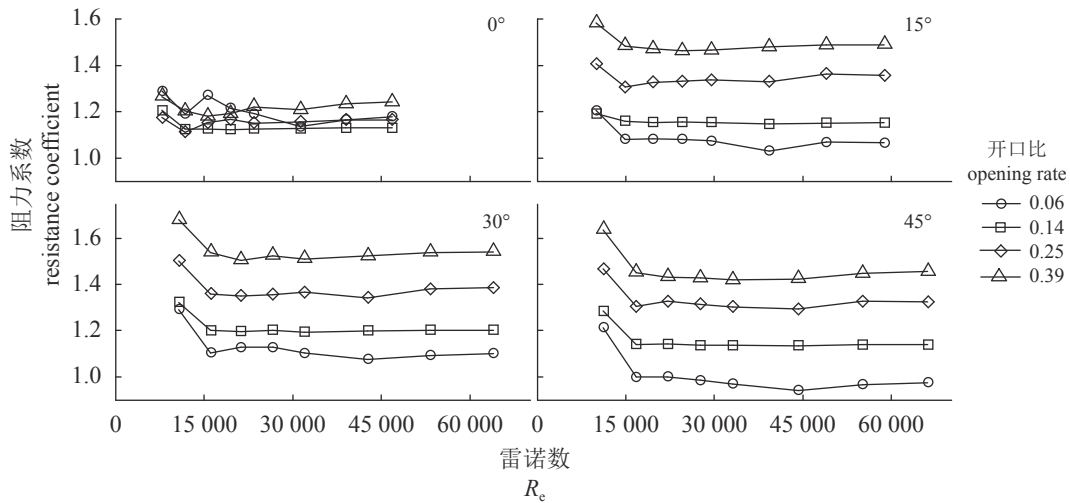


图 7 4 种开口比和 4 种迎流角度下礁体模型阻力系数与雷诺数的关系

Fig. 7 Relation between resistance coefficient and Reynolds number of reef model at 4 opening ratios and 4 angles of attack

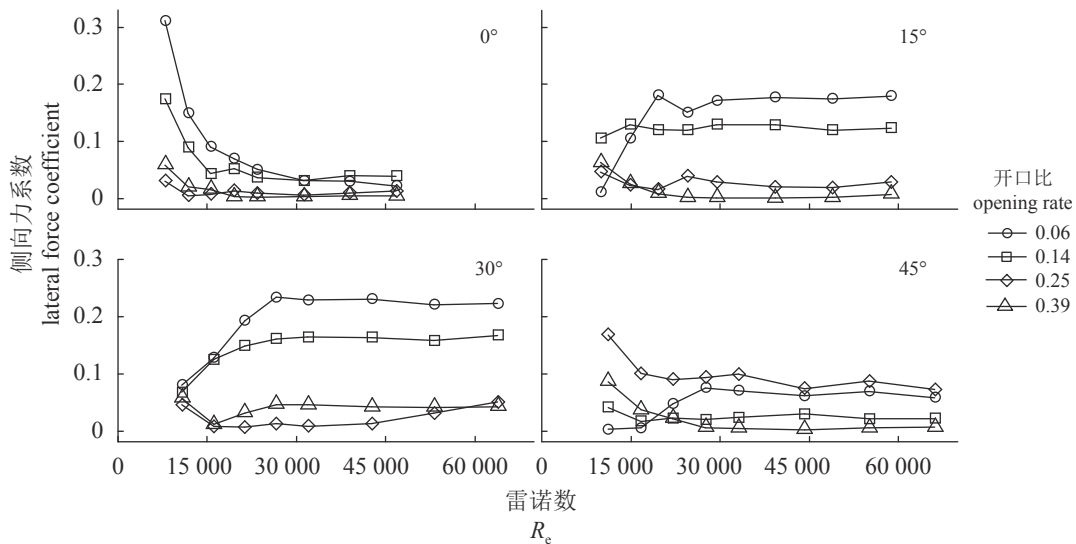


图 8 4 种开口比和 4 种迎流角度下礁体模型侧向力系数与雷诺数的关系

Fig. 8 Relation between lateral force coefficient and Reynolds number of reef model at 4 opening ratios and 4 angles of attack

相同迎流角度下, 阻力系数随开口比增加而增大, 即 $C_D(0.06) < C_D(0.14) < C_D(0.25) < C_D(0.39)$; 相同开口比下, 当 $\gamma_{ty}=0.06$ 时, 4种迎流角度下 $C_D(0^\circ) > C_D(30^\circ) > C_D(15^\circ) > C_D(45^\circ)$; 除 $\gamma_{ty}=0.06$ 外, 阻力系数在 $\theta=30^\circ$ 时最大, $\theta=15^\circ$ 时次之, $\theta=0^\circ$ 时最小, 即 $C_D(30^\circ) > C_D(15^\circ) > C_D(45^\circ) > C_D(0^\circ)$, 且 $C_D(30^\circ)$ 与 $C_D(0^\circ)$ 的比值最大可达 1.26 倍, $\theta=30^\circ$ 时, 对礁体模型的阻力系数影响最大, 阻力系数变化范围 0.98~1.53。当 $\theta=0^\circ$ 时, 阻力系数随着开口比增加变化较为平缓; 当 $\theta=15^\circ$ 、 30° 、 45° 时, 阻力系数随着开口比的增加呈线性上升趋势。

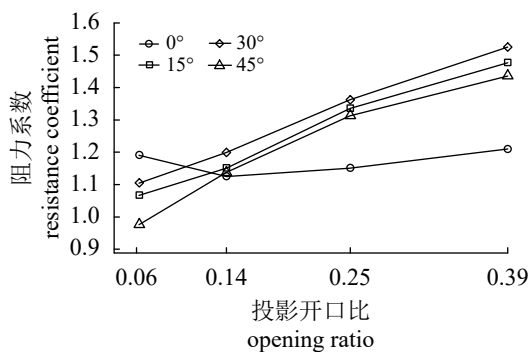


图 9 4种开口比和4种迎流角度下礁体模型的阻力系数

Fig. 9 Resistance coefficient of reef model at 4 opening ratios and 4 angles of attack

礁体模型的侧向力系数在4种迎流角度 ($\theta=0^\circ$ 、 15° 、 30° 、 45°) 及4种开口比 ($\gamma_{ty}=0.06$ 、 0.14 、 0.25 、 0.39) 条件下具有规律性变化 (图 10)。相同迎流角度下, 侧向力系数随着开口比增加均呈现出下降趋势, 即 $C_L(0.06) > C_L(0.14) > C_L(0.25) >$

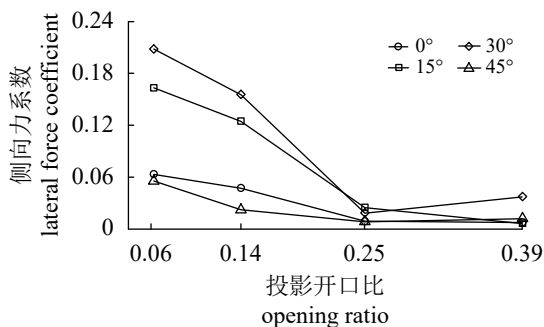


图 10 4种开口比和4种迎流角度下礁体模型的侧向力系数

Fig. 10 Lateral force coefficient of reef model with 4 opening ratios and 4 angles of attack

$C_L(0.39)$; 相同开口比下, 侧向力系数在 $\theta=30^\circ$ 时最大、 $\theta=45^\circ$ 时次之、 $\theta=0^\circ$ 时最小, 即 $C_L(30^\circ) > C_L(15^\circ) > C_L(45^\circ) > C_L(0^\circ)$, 且 $C_L(30^\circ)$ 与 $C_L(0^\circ)$ 的比值最大可达 3.5 倍, $\theta=30^\circ$ 时对礁体模型侧向力系数影响最大, 侧向力系数变化范围为 0.001~0.210。当 $\theta=0^\circ$ 、 45° 时, 侧向力系数随着开口比的增加, 变化范围为 $0.01 < C_L < 0.1$, 侧向力系数逐渐趋近于 0; 当 $\theta=15^\circ$ 、 30° 时, 侧向力系数最大, $C_L=0.21$, 侧向力系数随着开口比的增加而逐渐降低, 变化范围为 $0.01 < C_L < 0.21$ 。

2.3 阻力系数数学建模

在 $\theta=0^\circ$ 与 $\theta=15^\circ$ 、 30° 、 45° 时, 阻力系数随开口比的变化趋势有较大差异, 故将其分为两组 (图 9)。根据礁体模型的阻力系数物理模型实验结果, 利用 minitab 非线性回归分析, 得出六边形开口方形人工鱼礁模型阻力系数 C_D 与开口比的拟合公式。

当 $\theta=0^\circ$ 时, γ_{ty} 和 γ_{tu} 相等, 故只引入单一变量 γ_{ty} , 建立阻力系数 C_D 和 γ_{ty} 的拟合公式 (5) ($R^2=0.97$, $P < 0.01$, 图 11)。

$$C_D = 2.639\gamma_{ty}^2 - 0.960\gamma_{ty} + 1.239 \quad (5)$$

当 $\theta=15^\circ$ 、 30° 、 45° 时, 投影开口比 γ_{ty} 和通透开口比 γ_{tu} 具有一定差异性, 引入两个变量 γ_{ty} 、 γ_{tu} , 建立阻力系数 C_D 和 γ_{ty} 、 γ_{tu} 的拟合公式 (6) ($R^2=0.96$, $P < 0.01$, 图 12)。

$$C_D = 0.9642 + 1.627\gamma_{ty} - 0.418\gamma_{tu} \quad (6)$$

3 讨论

3.1 阻力、侧向力与开口比及迎流角度的关系

礁体模型在4种开口比 ($\gamma_{ty}=0.06$ 、 0.14 、 0.25 、

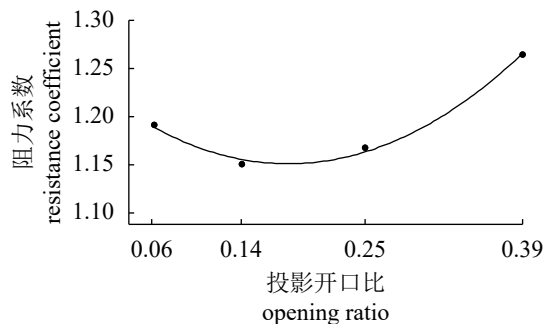


图 11 阻力系数与开口比拟合图

Fig. 11 Fitting diagram of resistance coefficient and opening ratio ($\theta = 0^\circ$)

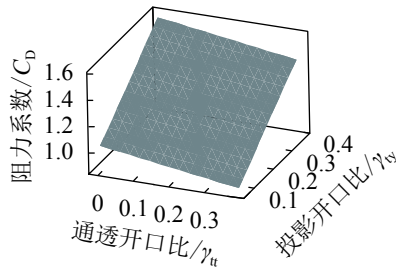


图 12 阻力系数与开口比拟合图

Fig. 12 Fitting diagram of resistance coefficient and opening ratio ($\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)

0.39) 和 4 种迎流角度 ($\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) 条件下, 阻力随流速增加均呈现指数增长, 这一研究结果与唐衍力等^[13]对方型礁体模型和公丕海等^[18]对塔型桁架鱼礁模型阻力与流速的研究结果相一致。唐衍力等^[13]对方型礁体模型的研究表明, 阻力在 $\theta=45^\circ$ 时大于 $\theta=0^\circ$ 时; 于定勇等^[15]对方型礁体模型的研究结果表明, 阻力随开口比的增大而减小。本研究对象六边形开口方形人工鱼礁其阻力 $F_x(30^\circ) > F_x(45^\circ) > F_x(15^\circ) > F_x(0^\circ)$, $F_x(0.06) > F_x(0.14) > F_x(0.25) > F_x(0.39)$, 这一结果符合上述学者对人工鱼礁开口比、迎流角度与阻力关系的分析。本研究中当 $\theta=0^\circ$ 时, 阻力随开口比的增加而下降显著, 是因为当 $\theta=0^\circ$ 时, 礁体随着开口比增加通透性直线增大, $\theta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时, 礁体随着开口比的增加, 因迎流角度的变化, 水流流出礁体时会受到礁体壁的阻碍, 从而阻力变化趋势并未与 $\theta=0^\circ$ 时一样下降较快。迎流角度 θ 对礁体模型阻力的影响效果随着开口比的增加而增大, 可能是因为开口比的增大, 水流进入礁体模型的效率增大, 流出礁体阻碍同样增大, 进一步导致 θ 对礁体模型阻力的影响效果增大。

阻力与侧向力分别是水流在礁体 x 与 y 方向上的作用力^[19], 礁体所受作用力应为礁体阻力 F_x 与侧向力 F_y 的合力。关于礁体水动力性能,

侧向力研究较少, 主要原因是方形礁体 $\theta=0^\circ$ 或 45° 时, F_y 与 F_x 相比, 其值较小, 且 F_y 随流速的增大而增加较为平缓, 故而忽略对 F_y 的研究。刘健等^[19]对网板的研究表明, 侧向力与迎流角度有显著关系。本研究中, 当礁体模型 $\gamma_{ty}=0.06, 0.14, \theta=15^\circ, 30^\circ$ 时, F_y 与 F_x 比值为 0.10~0.21, F_y 相对 F_x 较大, F_y 与 F_x 可产生较大的合力矩, 故不可忽略礁体模型侧向力; 当礁体模型 $\theta=0^\circ, 45^\circ$ 时, $F_y(45^\circ)/F_x(45^\circ), F_y(0^\circ)/F_x(0^\circ)$ 的比值为 1%~5%, 故礁体模型侧向力可忽略不计。迎流角度对礁体模型侧向力的影响效果随着开口比增加而降低。因此, 礁体模型 F_x, F_y 与开口比、迎流角度密切相关。

3.2 阻力系数、侧向力系数与开口比及迎流角度的关系

4 种迎流角度时的通透开口比为 $\gamma_{tu}(0^\circ) > \gamma_{tu}(45^\circ) > \gamma_{tu}(15^\circ) > \gamma_{tu}(30^\circ)$, γ_{tu} 越小, 礁体模型阻碍流体通过的能力越强^[16-17], 阻力越大。当 $\gamma_{ty}=0.06$ 时, 阻力系数 $C_D(0^\circ)$ 异常, 是因为 $\gamma_{ty}=0.06$ 较小, 穿过礁体的水流较少, 这时礁体表面分流为影响阻力的主要因素, $\theta=45^\circ$ 时分流作用效果最好, 礁体阻力最小; $\theta=0^\circ$ 时礁体对水流呈直角阻碍, 礁体阻力最大(图 9)。因此当 $\gamma_{ty}=0.06$ 时, 4 种迎流角度下 $C_D(0^\circ) > C_D(30^\circ) > C_D(15^\circ) > C_D(45^\circ)$ 。当 $\gamma_{ty} \geq 0.14$ 时, 穿过礁体的水流较多, 这时礁体通透开口比为影响阻力的主要因素, 此时阻力系数在 4 种迎流角度下均呈现线性上升趋势。从以上分析可以得出, $\gamma_{ty}=0.06$ 与 $\gamma_{ty}=0.14$ 之间必有一个为影响礁体阻力的主要因素临界点, 在以后的研究中可以进行细化。Woo 等^[11]利用数值模拟方法得出, 迎流角度对礁体的阻力系数有显著影响。为探讨迎流角度对阻力系数的影响效果, 本研究以 $\theta=0^\circ$ 时的阻力系数为基准, 将 $\theta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时的阻力系数与之作为比较(表 3), 可以看出除 $\gamma_{ty}=0.06$ 外, $\theta=30^\circ$ 时

表 3 迎流角度对阻力系数的影响

Tab. 3 Influence of different angles of attack on resistance coefficient

迎流角度/ $(^\circ)$ angle of attack	开口比 opening ratio			
	0.06	0.14	0.25	0.39
0	0	0	0	0
15	-9.92%	-0.69%	14.77%	16.19%
30	-7.28%	4.55%	16.70%	20.41%
45	-18.37%	-0.91%	12.53%	13.34%

对阻力系数影响最大,并且迎流角度对阻力系数的影响程度随开口比的增加而增大。 $\theta=30^\circ$ 时对礁体模型侧向力系数影响最大,主要是因为 $\theta=30^\circ$ 时礁体模型对水流的阻碍作用较大,使水流向 y 方向作用,侧向力相应增加。

4 结论

六边形开口方形礁体模型阻力 $F_x(30^\circ) > F_x(45^\circ) > F_x(15^\circ) > F_x(0^\circ)$,侧向力 $F_y(30^\circ) > F_y(15^\circ) > F_y(45^\circ) > F_y(0^\circ)$;迎流角度对礁体模型阻力与侧向力具有显著影响。

4种开口比和4种迎流角度下,阻力系数 $0.98 < C_D < 1.53$,侧向力系数 $0.001 < C_L < 0.210$;阻力系数 $C_D(30^\circ) > C_D(15^\circ) > C_D(45^\circ) > C_D(0^\circ)$,侧向力系数 $C_L(30^\circ) > C_L(15^\circ) > C_L(45^\circ) > C_L(0^\circ)$,迎流角度对礁体模型阻力系数与侧向力系数具有显著影响。

当 $\theta=30^\circ$ 时,不能忽视侧向力对人工鱼礁的作用力。

参考文献 (References):

- [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] 王云龙, 李圣法, 姜亚洲, 等. 象山港海洋牧场建设与生物资源的增殖养护技术[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1972-1980.
- Wang Y L, Li S F, Jiang Y Z, *et al.* Marine ranching and fishery stock enhancement in the Xiangshan Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1972-1980(in Chinese).
- [3] 李忠义, 林群, 李娇, 等. 中国海洋牧场研究现状与发展[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1870-1880.
- Li Z Y, Lin Q, Li J, *et al.* Present situation and future development of marine ranching construction in China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1870-1880(in Chinese).
- [4] 陈丕茂, 舒黎明, 袁华荣, 等. 国内外海洋牧场发展历程与定义分类概述[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1851-1869.
- Chen P M, Shu L M, Yuan H R, *et al.* Review on development, definition and classification of marine ranching in domestic and overseas[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1851-1869(in Chinese).
- [5] 姜昭阳, 郭战胜, 朱立新, 等. 人工鱼礁结构设计原理与研究进展[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1881-1889.
- Jiang Z Y, Guo Z S, Zhu L X, *et al.* Structural design principle and research progress of artificial reef[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1881-1889(in Chinese).
- [6] 丁玲, 王佳美, 唐振朝, 等. 水流作用下粉砂海床上人工鱼礁局部冲刷的模型试验与分析[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 2015-2024.
- Ding L, Wang J M, Tang Z C, *et al.* Experimental study and analysis of local scouring of artificial reef on silty sand bed under steady currents[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 2015-2024(in Chinese).
- [7] 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.
- 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(in Chinese).
- [8] 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.
- 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(in Chinese).
- [9] 影山芳郎, 大坂英雄, 山田英巳, 等. 多孔立方体モデル周りの可視化: 第1報中心断面特性 [R]. 山口大学工学部研究報告, 1981, 31(2): 351-359.
- Kageyama Y, Osaka H, Yamada H, *et al.* Water tunnel visualization around the perforated cube: 1st report, flow visualization in a center plane[R]. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Yamaguchi University*, 1981, 31(2): 351-359 (in Japanese).
- [10] 影山芳郎, 大坂英雄, 山田英巳, 等. 多孔立方体モデル周りの流れの可視化: 第2報水平断面特性 [R]. 山口大学工学部研究報告, 1981, 32(1): 31-37.
- Kageyama Y, Osaka H, Yamada H, *et al.* Water tunnel visualization on flow around the perforated cube model: 2nd report, flow visualization in a horizontal plane[R]. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Yamaguchi University*

- versity, 1981, 32(1): 31-37 (in Japanese).
- [11] Woo J, Kim D, Yoon H S, *et al.* Characterizing Korean general artificial reefs by drag coefficients[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 82: 105-114.
- [12] Kim D, Woo J, Yoon H S, *et al.* Wake lengths and structural responses of Korean general artificial reefs[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 92: 83-91.
- [13] 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, 2007, 37(5): 713-716.
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(in Chinese).
- [14] 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, 2011, 41(10): 35-39.
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(in Chinese).
- [15] 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, 2019, 49(4): 128-136.
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(in Chinese).
- [16] 杨杨, 程娟, 郭向阳. 关于透水混凝土的孔隙率与透水系数关系的探讨[J]. *混凝土与水泥制品*, 2007(4): 1-3.
Yang Y, Cheng J, Guo X Y. Study on relation of porosity and permeability coefficient of porous concrete[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2007(4): 1-3(in Chinese).
- [17] 白晓辉, 刘肖凡, 李继祥, 等. 透水混凝土孔隙率和渗透系数影响因素研究[J]. *武汉轻工大学学报*, 2014, 33(3): 80-83.
Bai X H, Liu X F, Li J X, *et al.* Research of porosity and permeability affect factors of porous concrete[J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2014, 33(3): 80-83(in Chinese).
- [18] 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.
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(in Chinese).
- [19] 刘健, 黄洪亮, 陈帅, 等. 小展弦比立式曲面网板的水动力性能[J]. *水产学报*, 2013, 37(11): 1742-1749.
Liu J, Huang H L, Chen S, *et al.* Hydrodynamic characteristics of low aspect ratio vertical cambered otter board[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(11): 1742-1749(in Chinese).

Model experiment of hydrodynamic performance of square artificial reefs with hexagonal openings

ZHANG Shuo^{1,2,3}, ZHANG Shidong¹, CHU Wenhua^{1,2}, HU Fuxiang^{4*}

(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. Engineering Technology Research Center of Marine Ranching, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

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

Abstract: In order to study the relationships between the resistance coefficients and lateral force coefficients of the square-shaped artificial reef with hexagonal openings and between the angle of attack and the opening ratio, we designed four model opening ratios ($\gamma_{by} = 0.06, 0.14, 0.25, 0.39$) The resistance and lateral force of the rectangular open artificial reef at four kinds of attack angles ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) were measured, and the resistance coefficient and lateral force coefficient were calculated. Hexagonal open square reef model resistance $F_x(30^\circ) > F_x(45^\circ) > F_x(15^\circ) > F_x(0^\circ)$, and lateral force $F_y(30^\circ) > F_y(15^\circ) > F_y(45^\circ) > F_y(0^\circ)$ were obtained; the reef model resistance $F_x(30^\circ)$ was 1.28-1.72 times that of $F_x(0^\circ)$, and the lateral force $F_y(30^\circ)$ was $F_y(0^\circ)$ 2.8 to 11.1 times. The angle of attack can have a greater impact on the resistance and lateral forces of the reef model. With 4 kinds of opening ratios and 4 kinds of attack angles, the resistance coefficient C_D ranged from 0.98 to 1.53. Resistance coefficient $C_D(30^\circ) > C_D(15^\circ) > C_D(45^\circ) > C_D(0^\circ)$. The reef model resistance coefficient $C_D(30^\circ)$ can be up to 1.26 times compared to $C_D(0^\circ)$. At 4 kinds of opening ratios and 4 kinds of angles of attack, the lateral force coefficient C_L ranged from 0.001 to 0.21. The lateral force coefficient $C_L(30^\circ) > C_L(15^\circ) > C_L(45^\circ) > C_L(0^\circ)$. The maximum lateral force coefficient $C_L(30^\circ)$ of the reef model can reach 3.5 times compared with $C_L(0^\circ)$. When $\theta = 30^\circ$, the effect of lateral force on artificial reefs cannot be ignored.

Key words: artificial reef; opening ratio; angle of attack; flume model test

Corresponding author: HU Fuxiang. E-mail: fuxiang@kaiyodai.ac.jp

Funding projects: Ministry of Agriculture's and Rural Affairs Production Conversion and Transformation Project-Haizhou Bay National Marine Ranch Demonstration Project (D-8005-18-0188, D8006-16-8060); National Natural Science Foundation of China (31972845)