

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.17259

塔型桁架人工鱼礁流场效应及稳定性

公丕海^{1,2}, 郑延璇³, 李娇^{1,2}, 关长涛^{1,2}, 崔勇¹, 李强⁴

1. 农业农村部渔业装备与工程重点开放实验室, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266071;
3. 乳山市水产技术推广站, 山东 威海 264500;
4. 中国海监乳山市大队, 山东 威海 264500

摘要: 本研究利用物理模型试验和粒子图像测速技术, 对塔型桁架人工鱼礁模型在 6 种换算流速 0.031 m/s、0.063 m/s、0.095 m/s、0.126 m/s、0.158 m/s 和 0.190 m/s (实际流速 0.2 m/s、0.4 m/s、0.6 m/s、0.8 m/s、1.0 m/s 和 1.2 m/s) 下产生的流场效应与物理稳定性进行研究。结果表明, 流速达到 1.2 m/s 时, 礁体不会发生漂移和倾覆, 说明该礁型具有良好的稳定性。单体礁在 45°和 90°迎流方式下, 最大上升流流速和上升流平均流速随来流速度增加而递增, 90°摆放单体礁最大上升流流速为来流速度的 15.6%~21.0%, 45°摆放单体礁最大上升流流速为来流速度的 16.3%~23.5%; 上升流面积和高度随来流速度的增大先增加后减小, 均在来流速度为 0.095 m/s 时出现最大值; 缓流区面积均随来流速度的增加而减小; 在相同来流速度下, 45°迎流时礁体缓流区面积大于 90°迎流; 在 45°和 90°摆放方式下, 缓流区长度与礁高比值均随来流速度的增加呈下降趋势, 且下降趋势逐渐平缓; 45°迎流时缓流区长度为礁体高度的 13~24 倍, 90°迎流时缓流区长度为礁体高度的 11~22 倍。塔型桁架人工鱼礁礁体前后没有涡流形成, 但具有较好的缓流作用, 在礁体后方形成了较大规模的缓流区。

关键词: 塔型桁架人工鱼礁; 图像粒子测速; 流场效应; 稳定性

中图分类号: S953

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)05-1021-08

人工鱼礁建设是一种重要的资源增殖技术, 主要通过集鱼和提高生物的自然生产力来改善渔业资源^[1], 被广泛用于鱼类等经济物种的增殖、生境营造。2009 年联合国环境规划署将人工鱼礁功能归纳为环境管理(生物多样性和生态系统修复管理、水质管理等), 增殖海洋生物资源(吸引、提高生产和保护), 促进旅游和休闲活动(钓鱼、潜水、冲浪、划船等)、科学研究和教育等^[2], 使人工鱼礁在世界沿海地区应用逐渐提高。人工鱼礁投放海底后, 鱼礁结构和对周围环境的改变为鱼类提供了产卵、避害、索饵的场所。实践表明, 投放人工鱼礁后, 可以改善局部海域水体环境, 增加生物多样性, 修复海域生态环境, 增殖渔业资源^[3]。

鱼礁投放在海底后会改变局部海域水体环境, 在鱼礁周围产生上升流和背涡流, 上升流可以促进上下层海水的交换, 背涡流会导致营养盐和泥沙沉积, 鱼礁对其周围水体的流态改变和沉积环境的扰动可能会导致礁体倾覆、滑移和掩埋, 因此研究鱼礁的流场效应和物理稳定性对鱼礁的选址、布局和投放具有重要的指导意义。国内研究人员主要对构造简单的星体型^[4]、复合 M 型^[5]、正方体型^[6]、圆管型^[7]和方型^[8-9]鱼礁的流场效应进行了研究, 对回字型^[10]、等边三角型^[11]、三圆管型^[12]、箱型^[13]人工鱼礁物理稳定性进行了研究, 4 种礁型均具有较好的抗滑移、抗翻滚性能, 为鱼礁选型和布局提供了参考, 但对构造复杂的礁体

收稿日期: 2018-07-07; 修订日期: 2019-03-30.

基金项目: 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0501-4); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2016HY-ZD0103).

作者简介: 公丕海(1986-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事设施渔业研究. E-mail: gongph@ysfri.ac.cn

通信作者: 李娇(1982-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事设施渔业研究. E-mail: lijiao@ysfri.ac.cn

研究较少。塔型桁架人工鱼礁是由日本技研兴业株式会社开发,主要用于诱集鱼类,后经中国引进并进行了结构改造。塔型桁架人工鱼礁由桁架和水动力盘组成,其结构复杂,既具有较大的空间结构,又能保持较小的重量。本研究利用物理模型试验和粒子图像测速技术研究塔型桁架人工鱼礁的流场特性和物理稳定性,以期为以后进一步应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验对象

本实验以投放在山东烟台长岛海区的塔型桁架人工鱼礁为试验对象。塔型桁架(图 1)人工鱼礁

实体利用钢筋混凝土制作,便于进行 PIV 光学试验,模型制作材料选用有机玻璃,模型按照重力相似准则设计尺度比 λ 值为 40,尺寸见表 1。

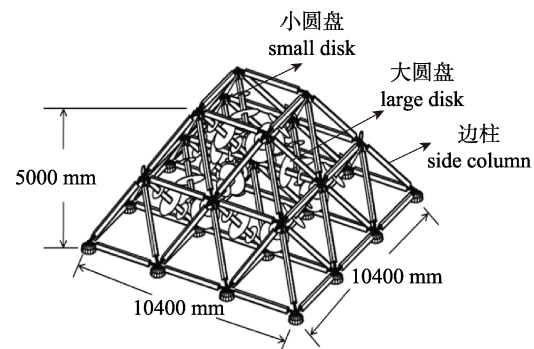


图 1 塔型桁架人工鱼礁
Fig. 1 Tower-type truss artificial reef

表 1 实物礁和模型礁尺寸
Tab.1 The measurement of object and model reef

礁体 reef	底边/mm bottom			边柱/mm side column			大圆盘/mm large disk		小圆盘/mm small disk	
	长 length	宽 width	高 height	长 length	直径 diameter	高 height	直径 diameter	厚 thickness	直径 diameter	厚 thickness
实物 object	10400	10400	5000	2850	76.3	180	1200	59	680	92
模型 model	260	260	125	71.25	1.9	4.5	30	1.5	17	2.3

1.2 试验装置

试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室完成。试验装置(图 2)与材料包括:造流水槽(尺寸为长 22 m,宽 0.45 m,高 0.6 m)、激光电源、激光发射器、同步器、相机、电脑、测力计、海流计、跟随性和反光性较好的示踪粒子、Insight4G、DHDAS5922N 动态信号采集分析系统等。试验前先采用声学多普勒(ADV)流速仪确定试验设定流速值时造流装置频率,并在试验过程中观察监测实时流况。

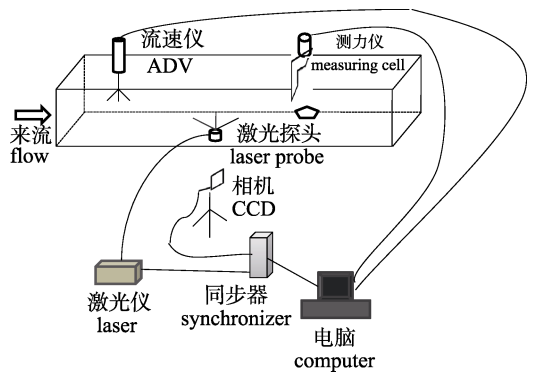


图 2 本研究所用试验装置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus in the study

1.3 试验工况

山东省烟台市长岛县礁体投放区海流速度测量值为 0.21~1.00 m/s。本试验中,设定 6 个实际流速分别是 0.2 m/s、0.4 m/s、0.6 m/s、0.8 m/s、1.0 m/s、1.2 m/s。在试验水槽中,水流的主要作用力是重力、惯性力和紊动阻力,根据重力和紊动阻力相似定律,换算对应的试验流速分别为 0.031 m/s、0.063 m/s、0.095 m/s、0.126 m/s、0.158 m/s、0.190 m/s,6 种流速下流场均在阻力平方区,可忽略流体黏性力影响。

1.4 数据采集与处理

1.4.1 PIV 试验 PIV 试验采集鱼礁单体在不同流速和不同摆放方式下流场特性,摆放方式分为 45°迎流和 90°迎流 2 种。利用 Insight 4G 软件对每个流速工况采集 2 次,每次采集 50 对图像,每对采集间隔 0.4 s,使用 Insight 4G 对采集的 50 对图像进行数据处理后,利用嵌入 Insight 4G 的 Tecplot 软件对 50 组数据取均值合成 1 组数据,然后用 Tecplot 软件进行分析。为了便于分析比较,本实验上升流区域是流速沿竖直方向分量大于或

等于 10% 倍来流速度的区域^[14], 以流速沿水平方向分量小于或等于 0.8 倍来流速度的区域作为缓流区区域^[15]。

1.4.2 水阻力测量 由于该礁型主要安置在水深 15~50 m 的海域, 基本不受波浪影响, 因此只研究水流对该礁体物理稳定性的影响。鱼礁模型摆放方式为 90°迎流。鱼礁模型通过固定装置与测力计连接。通过调节固定装置确保礁体模型与水面垂直, 礁体模型的底部与造流水槽的底部相距 0.1 mm, 本试验中底部边界对模型礁水阻力测定影响较小, 忽略底部边界影响。通过测定固定装置和礁体模型共同受到的水阻力和空载时固定装置受到的水阻力, 得到礁体模型受到的水阻力。本实验测力计量程为 1 kg, 误差小于 0.01。使用 DHDAS5922N 动态信号采集分析系统进行数据采集与处理。每个流速重复测量 5 次, 然后取平均值。

1.4.3 礁体抗滑移性研究 要保证礁体投放后不发生滑动或漂移, 抗滑移系数 S_1 数值必须大于 1.2^[16-18]。抗滑移系数 S_1 计算公式为

$$S_1 = W\mu(1-\rho/\sigma)/F_{\max} \quad (1)$$

式中, W 为礁体重量, μ 为礁体与底质间的最大静摩擦系数, ρ 为海水密度, σ 为礁体单位体积重量, $F_{\max}$ 为礁体所受最大水流作用力。

1.4.4 礁体抗倾覆性研究 抗倾覆系数 $S_2 > 1.2$, 才能保证礁体不发生倾覆^[17-18]。 S_2 的计算公式^[11, 18]为:

$$S_2 = W(1-\rho/\sigma)L_w/(F_{\max}h_0) \quad (2)$$

式中, W 为礁体重量, ρ 为海水密度, σ 为礁体单位体积重量, $F_{\max}$ 为礁体所受最大水流作用力, L_w 为翻倒的回转中心到重心的水平距离, h_0 为流体作用力的高度。

2 结果与分析

2.1 塔型桁架单体礁周围流场分布

从塔型桁架单体礁在 45°和 90°迎流下、来流速度为 0.190 m/s 时的速度矢量图(图 3)可以看出, 2 种迎流方式下, 礁体左上方均形成了较小的上升流区域, 礁体后方都有明显的缓流区域, 没有涡流形成。在 6 种流速下, 2 种迎流方式礁体前部、后部均没有涡流形成。

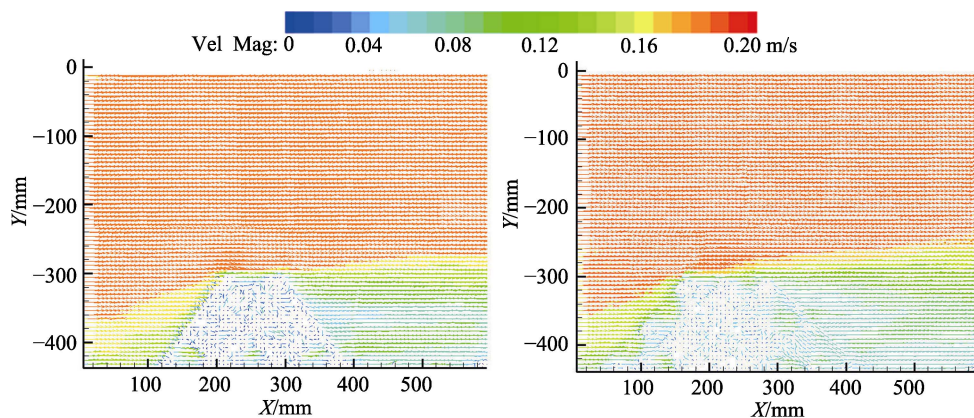


图 3 45°(左)和 90°(右)单体礁速度矢量图

Fig. 3 Flow field velocity diagram of 45° (left) and 90° (right) single reef model

计算表明, 45°和 90°摆放的单体礁的最大上升流流速($V_{\max}$)和上升流平均流速都随着来流速度(V)的增加呈递增趋势, 90°摆放单体礁最大上升流流速为来流速度的 15.6%~21.0%, 45°摆放单体礁最大上升流流速为来流速度的 16.3%~23.5%。45°摆放时产生的上升流平均流速和 90°摆放时无明显差异($P < 0.05$, 图 4)。2 种不同摆放方式的礁

体上升流面积都随来流速度的变化先增加后减小, 在来流流速为 0.095 m/s 时上升流面积均达到最大值。上升流高度与上升流面积的变化趋势相同, 90°摆放单体礁上升流高度为礁体高度的 1.250~1.483 倍, 45°摆放单体礁上升流高度为礁体高度的 1.375~1.500 倍, 45°摆放时形成的上升流面积和高度均大于 90°(图 4)。

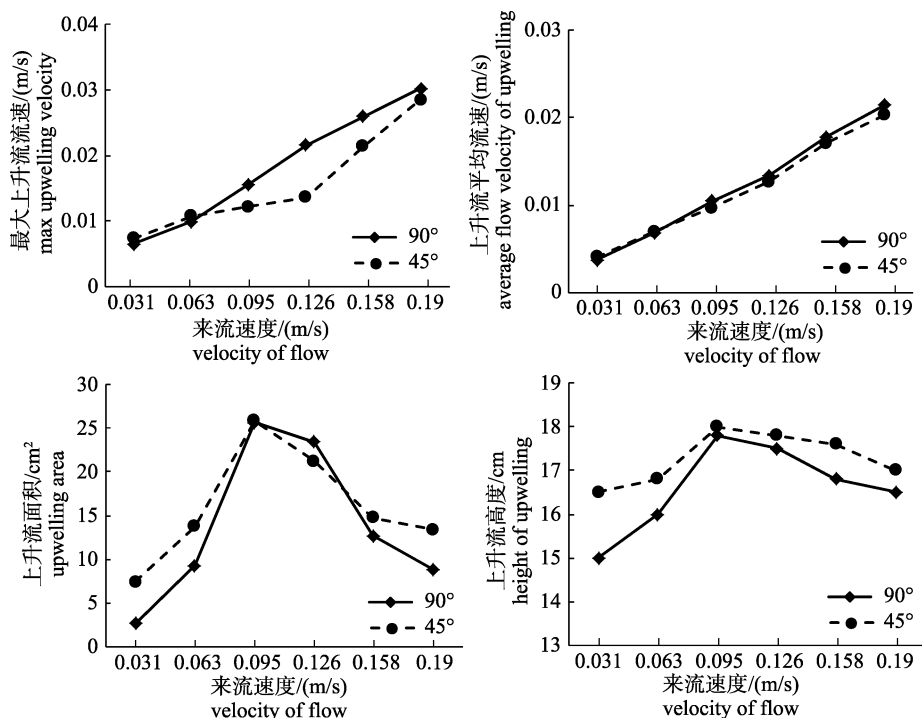


图 4 不同礁体摆放方式下上升流参数与来流速度的关系

Fig. 4 The relation between upwelling parameters and incoming velocity under different deployments

在 45° 和 90° 摆放方式下, 礁体后方缓流区长度与礁高比值 (L/H) 均随来流速度的增加呈下降趋势, 且下降趋势逐渐平缓(图 5); 在相同来流速度下, 45° 迎流时礁体缓流区长度较 90° 迎流时略大, 其中 45° 迎流时缓流区长度为礁体高度的 13~24 倍, 而 90° 迎流时缓流区长度为礁体高度的 11~22 倍。

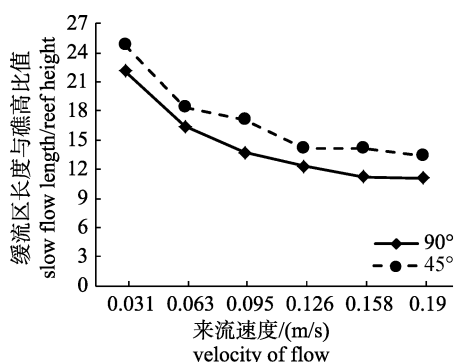


图 5 不同流速下缓流区长度与礁高比值

Fig. 5 Slow flowing length/reef height under different flow velocities

2.2 礁体物理稳定性研究

2.2.1 礁体水流力测定 用测力计对每个工况进

行 5 次重复测定, 取平均值, 6 个流速下礁体模型水流力平均值 f 分别为 $(0.063 \pm 0.0047) \text{ N}$ 、 $(0.094 \pm 0.0051) \text{ N}$ 、 $(0.112 \pm 0.0181) \text{ N}$ 、 $(0.141 \pm 0.0186) \text{ N}$ 、 $(0.258 \pm 0.0199) \text{ N}$ 、 $(0.391 \pm 0.0233) \text{ N}$ 。根据重力相似准则, 实体礁受到的水流力 $F = f\lambda^3$, 由于礁体模型受到的水流力随来流速度的增大而增大, 因此礁体在流速 1.2 m/s 时受到的水流力最大, 通过计算得出 6 种流速下礁体受最大水流力 $F_{\max}$ 为 25024 N。

2.2.2 礁体抗滑移安全性研究 塔型桁架型礁的重量 W 为 280691.6 N; 中村充^[16]研究表明混凝土摩擦系数为 0.5~0.6, 刘健等^[19]研究表明混凝土鱼礁与不同粒径底质最大静摩擦系数范围为 0.5~0.89, 郑延璇等^[11]研究表明混凝土与细砾(2~5 mm)和中砂(0.2~0.5 mm)最大静摩擦系数分别为 0.501、0.614, 礁体实际投放海域粒径为 0.215~0.370 mm, 平均值为 $(0.277 \pm 0.093) \text{ mm}$, 属于中砂, 选取最大静摩擦系数值 0.614 进行计算; 海水密度 ρ 为 1025 kg/m^3 ; 据塔型桁架鱼礁重量和体积计算得到 σ 为 2616 kg/m^3 。礁体抗滑移系数与来

流速度呈反比关系, 随来流速度增加, 礁体受水流力增大, 礁体抗滑移系数减小(图6)。在水流速度为 1.2 m/s 时, 礁体受到的水流力最大, 抗滑移系数最小, 根据公式(1)计算得出在水深 20 m, S_1 为 4.18, 该值大于 1.2。在细砾底质上 6 个流速下得到的礁体抗漂移安全系数 S_1 均大于 1.2。因此, 在来流速度达到 1.2 m/s 时, 投放在长岛海区的塔型桁架鱼礁不会出现滑移的现象。

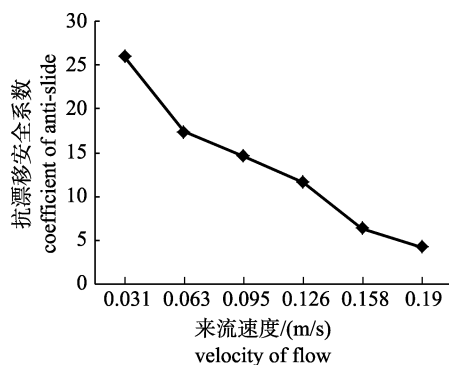


图6 不同流速下抗漂移系数

Fig. 6 Coefficient of anti-slide under different flow velocities

2.2.3 礁体抗倾覆安全性研究 王素琴^[20]、吴子岳等^[21]和钟术求等^[17]的研究表明, 结构对称的鱼礁, l_w 为礁体底面边长的一半, h_0 为礁体高度的一半。因此 90° 迎流时, 塔型桁架型礁翻倒的回转中心到重心的水平距离 L_w 为 5.2 m, 流体作用力的高度 h_0 为 2.5 m。图7给出由公式(2)计算得到的 6 个流速下的抗倾覆系数, 结果显示, 礁体的抗倾覆系数随着来流速度的增加, 逐渐减小。礁体的抗倾覆系数最小值 $S_2=14.19>1.2$, 表明投放在长岛海区的塔型桁架鱼礁在来流速度达到 1.2 m/s 时不会发生倾覆。

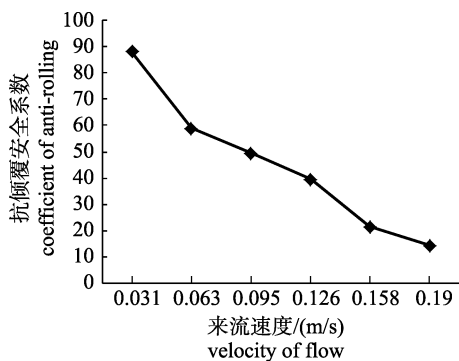


图7 不同流速下抗倾覆系数

Fig. 7 Coefficient of anti-rolling under different flow velocities

3 讨论

3.1 塔型桁架鱼礁上升流特性

45°和 90°摆放方式下, 塔型桁架鱼礁上升流最大值和平均值都随试验来流速度的增加而增大, 这一研究结果与刘洪生等^[22]和何文荣等^[23]对金字塔鱼礁, 肖荣等^[24]对梯形台鱼礁和中空方型鱼礁上升流流速的研究结果相一致。2 种摆放方式下, 塔型桁架鱼礁最大上升流流速与来流速度的最大比值分别为 0.21(90°迎流)、0.23(45°迎流), 小于肖荣等^[24]得到的 0.58~0.67 和何文荣等^[23]得到的 0.79。造成这一明显差异的主要原因是鱼礁迎流面结构特征的差异性, 尤其是迎流面开口比的不同。付东伟等^[25]和邵万骏等^[15]的研究表明, 开口比对上升流和背涡流规模与分布的影响大于来流速度对鱼礁流场效应的影响; 黄远东等^[26]对正方体鱼礁开口比对流场效应的影响研究结果为, 上升流最大速度、上升流平均流速及高度, 都随开口比的增大而减小。本研究对象塔型桁架鱼礁为组装式桁架结构, 具有充分的镂空性, 90°迎流面开口比达 0.9, 不利于上升流和背涡流的形成, 而肖荣等^[24]研究的金字塔礁实际为中空型四棱台结构, 何文荣等^[23]研究的金字塔鱼礁实际为四棱锥结构, 二者的迎流面开口比都小于本研究对象, 因此, 最大上升流流速与来流速度的比值为塔型桁架鱼礁<中空型四棱台鱼礁<四棱锥鱼礁, 这一分析结果符合上述学者对人工鱼礁开口比对其流场效应影响的研究结果。

2 种摆放方式下, 塔型桁架鱼礁上升流面积和上升流高度都随来流速度的增大先增加后减小, 造成这种趋势的主要原因是礁体内部的复杂结构。在试验过程中观察发现, 导流盘外围有示踪粒子旋转现象, 这一现象说明水流经过外围桁架后在礁体内部受到导流盘的阻挡, 并形成回流或下降流, 随着来流速度的增大, 导流盘对水流的阻挡作用愈加强烈, 并对礁体前方的上升流产生干扰, 造成礁体前方上升流面积与规模的减小。但是由于礁体内部复杂结构对 PIV 实验系统激光信号的遮挡影响, 使礁体内部流场分布在后处理中无法全部显示, 礁体内部流体流态的研究受到技术限制, 因此为更精确全面地阐述人工鱼礁的水

动力特性,应进一步采用先进科学技术开展鱼礁内部流场特征研究。

3.2 塔型桁架鱼礁缓流区特性

塔型桁架鱼礁在 2 种摆放方式下都没有在后方形成涡流,但具有规模较大的缓流区,缓流区长度与礁高比值随来流速度的增加而减小,且减小趋势逐渐变缓,塔型桁架鱼礁后方流场分布分析结果与付东伟等^[25]和邵万骏等^[15]的研究相一致,即鱼礁迎流面开口比大于 0.5 时,无明显涡流区。张硕等^[27]研究表明,立方体和 3 种长方体混凝土礁后形成的背涡流区域均随来流速度的增加呈收敛趋势,邵万骏等^[15]研究表明空心立方体礁背涡流体积随来流速度增加而减小,且随着来流速增大,背涡流体积的减小趋势逐渐变缓,这与本研究礁型缓流区变化趋势基本相同。塔型桁架鱼礁缓流区长度为礁高的 11~24 倍,大于潘灵芝等^[28]得到的 8.7~9.6 倍。本试验得到的塔型桁架鱼礁缓流区规模较大,是由于礁体具有不同角度的大小圆盘结构,这种结构将来流导向了不同方向,有效地抵消、减缓了来流速度,形成了较大的缓流区。

3.3 塔型桁架鱼礁稳定性

塔型桁架人工鱼礁其外形是梯形体结构,由桁架和水动力盘组成,该结构重心较低,具有空间结构大,相对重量小等特点,与其他大型结构礁体相比,具有节省材料,便于组装、投放和运输等优点。人工鱼礁建设投入高、见效慢,使用寿命越长收益越高,礁体投放后能够保证不出现滑移和倾覆现象是鱼礁设计和选址的基本要求。本研究礁体在 6 种流速下, S_1 和 S_2 值均大于 1.2,不会出现滑移和倾覆的现象。在流速为 1.0 m/s 下塔型桁架人工鱼礁受水流作用力为 16526 N,抗漂移系数 S_1 为 6.11,抗倾覆系数 S_2 为 10.76,投放在山东海域的等边三角型礁在流速 1.0 m/s 时受水流作用力为 12526 N, S_1 为 5.25, S_2 为 12.10^[18],投放于浙江嵊泗海域的回字型人工鱼礁在实际流速 1.03 m/s 时受水流作用力为 10054 N, S_1 为 7.66, S_2 为 10.15^[17],与等边三角型礁和回字型礁相比,塔型桁架鱼礁受到的水流作用力更大,但是抗倾覆系数和抗滑移系数相差较小,因此该礁型具有更好的稳定性。

4 结论

(1)在流场效应方面,塔型桁架人工鱼礁模型最大上升流流速和上升流平均流速与来流速度呈正相关,随来流速度的变化递增,上升流面积和上升流高度先是变大后又减少,最大值出现在流速 0.095 m/s 时。在所有试验工况下,塔型桁架人工鱼礁前后均没有形成涡流;由于该礁型镂空面积大,透水性强,导致在礁体周围产生的上升流和涡流方面没有明显效果。

(2)缓流区长度与礁高比值随来流速度的增加逐渐减小,且减小趋势逐渐变缓,该礁产生的缓流区长度为礁体高度的 11~24 倍。两种不同摆放方式在同一来流速度下,45°摆放比 90°摆放造成的上升流规模和缓流区长度均较大。从缓流区长度考虑,塔型桁架人工鱼礁在海区投放时单位礁间距离以不超过 11 倍礁高为宜。

(3)在礁体稳定性方面,塔型桁架人工鱼礁的抗漂移系数和抗倾覆系数与来流速度呈反比,来流速度增加,礁体受水流力增大,抗漂移系数和抗倾覆系数减小,在 6 种流速工况下, S_1 和 S_2 值均大于 1.2,礁体不会出现滑移和倾覆的现象。表明在实际投礁水深 20 m,来流流速达到 1.2 m/s 时,该礁能够保持稳定。

参考文献:

- [1] Bohnsack J A, Sutherland D L. Artificial reef research: A review with recommendations for future priorities[J]. Bulletin of Marine Science, 1985, 37(1): 11-39.
- [2] Yoon H S, Kim D, Na W B. Estimation of effective usable and burial volumes of artificial reefs and the prediction of cost-effective management[J]. Ocean & Coastal Management, 2016, 120: 135-147.
- [3] Lan X Z, Wan R, Tang Y L, et al. Numerical simulation of the flow field around the truncated-cone shaped artificial reef[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(8): 47-53. [兰孝政, 万荣, 唐衍力, 等. 圆台型人工鱼礁单体流场效应的数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(8): 47-53.]
- [4] Liu Y, Guan C T, Zhao Y P, et al. Experimental study on two-dimensional flow field of the star artificial reef in the water stream with PIV[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(6): 777-783. [刘彦, 关长涛, 赵云鹏, 等. 水流作用下星体型人工鱼礁二维流场 PIV 试验研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2010, 25(6): 777-783.]
- [5] Guan C T, Liu Y, Zhao Y P, et al. Experimental study on

- two-dimensional flow field of the compound M artificial reef with Particle Image Velocimetry (PIV)[J]. Fishery Modernization, 2010, 37(1): 15-19. [关长涛, 刘彦, 赵云鹏, 等. 复合 M 型人工鱼礁粒子图像测速二维流场试验研究[J]. 渔业现代化, 2010, 37(1): 15-19.]
- [6] Liu Y, Zhao Y P, Cui Y, et al. Experimental study of the flow field around cube artificial reef[J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(4): 103-108, 130. [刘彦, 赵云鹏, 崔勇, 等. 正方体人工鱼礁流场效应试验研究[J]. 海洋工程, 2012, 30(4): 103-108, 130.]
- [7] 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.]
- [8] Fu D W, Chen Y, Chen Y S, et al. PIV experiment of artificial monomer reefs on the flowing field[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2014, 29(1): 82-85. [付东伟, 陈勇, 陈衍顺, 等. 方形人工鱼礁单体流场效应的 PIV 试验研究[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(1): 82-85.]
- [9] Li J, Zhang X M, Guan C T, et al. Characteristics of upwelling of hollow square enhancement reefs based on particle image velocimetry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(24): 232-239. [李娇, 张秀梅, 关长涛, 等. 镂空方型增殖礁上升流特性的粒子图像测速试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 232-239.]
- [10] 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.]
- [11] Zheng Y X, Liang Z L, Guan C T, et al. Structure design and stability of the equilateral triangle artificial reef[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(3): 117-125. [郑延璇, 梁振林, 关长涛, 等. 等边三角形人工鱼礁礁体结构设计及其稳定性[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(3): 117-125.]
- [12] Guan C T, Li M J, Zheng Y X, et al. Numerical simulation of disposal space and analysis on physical stability of three-tube artificial reefs[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(9): 9-17. [关长涛, 李梦杰, 郑延璇, 等. 三圆管型人工鱼礁布设间距的数值模拟及物理稳定性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(9): 9-17.]
- [13] Chen X Y, Xie L, Wang F Y. Structure design and stability analysis of the artificial reef in marine ranching of Sanya Bay[J]. Marine Sciences, 2017, 41(10): 19-23. [陈小艳, 谢琳, 王发云. 三亚湾海洋牧场人工鱼礁结构设计及稳定性分析[J]. 海洋科学, 2017, 41(10): 19-23.]
- [14] Liu Y, Guan C T, Zhao Y P, et al. Numerical simulation and PIV study of unsteady flow around hollow cube artificial reef with free water surface[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2012, 6(4): 527-540.
- [15] Shao W J, Liu C G, Nie H T, et al. Analysis of hydrodynamic characteristics and flow field around artificial reefs[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(5): 580-585. [邵万骏, 刘长根, 聂红涛, 等. 人工鱼礁的水动力学特性及流场效应分析[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2014, 29(5): 580-585.]
- [16] Nakamura M. Aquatic Civil Science[M]. Tokyo: Industrial Current Affairs Press, 1991: 462-469. [中村充. 水产土木学. 东京: 工业时事出版社, 1991: 462-469.]
- [17] 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.]
- [18] Gao C, Mao H F, Yu B C. Research on stability of artificial reef based on Fluent[J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(10): 257-259. [高潮, 毛鸿飞, 余报楚. 基于 Fluent 对人工鱼礁稳定性的研究[J]. 山西建筑, 2012, 38(10): 257-259.]
- [19] Liu J, Zhang S, Xu L X, et al. Analysis of the maximum static friction coefficient of artificial reefs in different diameter of sediment[J]. Marine Sciences, 2012, 36(1): 59-64. [刘健, 张硕, 许柳雄, 等. 人工鱼礁礁体与不同粒径底质间最大静摩擦系数的试验研究[J]. 海洋科学, 2012, 36(1): 59-64.]
- [20] Wang S Q. Stress analysis and designing features of artificial fish reefs[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 1987, 7(1): 55-62. [王素琴. 人工鱼礁的受力分析与设计要点[J]. 大连水产学院学报, 1987, 7(1): 55-62.]
- [21] Wu Z Y, Sun M C, Tang W. The calculation of the hydrodynamic force of the artificial cross-reefs[J]. Marine Fisheries Research, 2003, 24(4): 32-35. [吴子岳, 孙满昌, 汤威. 十字型人工鱼礁礁体的水动力计算[J]. 海洋水产研究, 2003, 24(4): 32-35.]
- [22] 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.]
- [23] He W R, Huang Y D, Huang L M, et al. Simulation of three-dimensional CFD of water flow at pyramid artificial reef[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(5): 71-76. [何文荣, 黄远东, 黄黎明, 等. 金字塔型人工鱼礁绕流的三维 CFD 模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 71-76.]
- [24] Xiao R, Yang H. Numerical simulation on features of flow field around hollow artificial reefs[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(6): 934-942. [肖荣, 杨红. 镂空型人工鱼礁流场效应的数值模拟研究[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(6): 934-942.]
- [25] Fu D W, Luan S G, Zhang R J, et al. Two-way analysis of variance of effects of cut-opening ratio and surface shape facing flowing in artificial fish-reefs on the flowing field[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2012, 27(3): 274-278. [付东伟, 栾曙光, 张瑞瑾, 等. 人工鱼礁开口比和迎流面

- 形状对流场效应影响的双因素方差分析[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(3): 274-278.]
- [26] Huang Y D, Fu D F, He W R. Three dimensional numerical simulation on influence of cut-opening ratio of artificial reef on flow effect[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(4): 39-43. [黄远东, 付登枫, 何文荣. 人工鱼礁开口比对流场效应影响的三维数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 39-43.]
- [27] Zhang S, Sun M C, Chen Y. Quantificational features of wake vortices of concrete artificial model reefs with different height[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2008, 23(4): 278-282. [张硕, 孙满昌, 陈勇. 不同高度混凝土模型礁背涡流特性的定量研究[J]. 大连水产学院学报, 2008, 23(4): 278-282.]
- [28] Pan L Z, Lin J, Zhang S Y. A numerical experiment of the effects of artificial reef on vertical 2-dimensional steady flow field[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2005, 14(4): 406-412. [潘灵芝, 林军, 章守宇. 铅直二维定常流中人工鱼礁流场效应的数值实验[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(4): 406-412.]

Flow field effect and stability of the equilateral tower-type truss artificial reef

GONG Pihai^{1,2}, ZHENG Yanxuan³, LI Jiao^{1,2}, GUAN Changtao^{1,2}, CUI Yong¹, LI Qiang⁴

1. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fishery, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China;
3. Rushan Aquatic Product Technology Extension Station, Weihai 264500, China;
4. China Marine Surveillance of Rushan City, Weihai 264500, China

Abstract: Tower-type truss artificial reefs have superior structural stability but are large and of low quality. Presently, few studies have investigated the water dynamics of complex structure reefs in China. Based on studies of the flow field effect around the tower-type truss artificial reef, hoping to provide reference to planning and layout. The reef hemline was 10400 mm long, 5000 mm high, 10400 mm wide, and the cement column was 2850 mm minimum length. The diameter was 76.3 mm, the large disc diameter of the reef was 1200 mm, the thickness of the large disc was 59 mm, the small disc diameter of the reef was 680 mm, and the thickness of the small disc was 92 mm. Six real flow velocities (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, and 1.2 m/s) were designed to study the flow field around the reef. According to the similarity principle, the experiment velocities were 0.031, 0.063, 0.095, 0.126, 0.158, and 0.190 m/s. Using a water flume physical model test and particle image velocimetry (PIV) technology, the flow field effect around the tower-type truss artificial reef was evaluated under six different flow velocities. The anti-rolling and anti-slide coefficients were evaluated under different test conditions. The experimental results indicated that for the monomer reef by mode of 45° and 90° against the flow, the average and maximum upwelling velocity was increased with the flow velocity. The maximum upwelling velocity of the single reef 90° against the flow was 15.6%–21.0% the flow velocity, and 45° against the flow was 16.3%–23.5% of the flow velocity. Increases in flow velocity first increased and then decreased the upwelling scale and height, and when the coming flow speed was 0.095 m/s, the maximum upwelling scale and height were achieved. The slow flow area decreased with increasing flow velocity. Under the same flow velocity, the size of the slow flow area with 45° against the flow was greater than 90° against the flow. The length of the slow flow area to the reef height decreased with increasing flow velocity, and the trend decreased with increasing flow velocity. The length of the slow flow area with 45° against the flow was 13–24-fold longer than the height of the reef. The length of the slow flow area with 90° facing the flow was 11–22-fold longer than the height of the reef. The reef remained stable on the sea floor, where the water depth was 20 m and the current velocity was 1.2 m/s.

Key words: tower-type truss artificial reef; particle image velocimetry; flow field effect; stability

Corresponding author: LI Jiao. E-mail: lijiao@ysfri.ac.cn