

人工鱼礁流场风洞实验与数值模拟对比验证

刘洪生¹, 马翔¹, 章守宇¹, 林军¹, 于红兵², 黄华接²

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 中国科学院 南海海洋研究所, 广东 广州 510300)

摘要: 人工鱼礁增殖渔业资源的生态效益一定程度上取决于其产生的流场效应, 因此流场效应的研究是人工鱼礁生态效益研究的关键。数值计算是研究人工鱼礁流场效应的新方法, 但其可行性和准确度还没有得到广泛验证。本研究针对正方体、三棱柱及金字塔型人工鱼礁实体模型, 根据流动相似性原理设定相对应的来流速度, 分别利用风洞实验和数值模拟研究了人工鱼礁周围的流场, 选择具有代表性测点的水平和垂直方向流速, 无量纲化后进行对比。研究表明, 两实验测点流速平均误差约8%, 大多数测点的 u^* (x 方向无量纲流速) 差别甚微, 且变化趋势基本相同, 从而验证了数值计算模拟人工鱼礁流场的可行性和准确性。[中国水产科学, 2009, 16(3): 365-371]

关键词: 人工鱼礁; 流场; 风洞实验; 数值模拟; 验证

中图分类号: S96

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737-(2009)03-0365-07

随着人工鱼礁的大规模投放, 世界各国先后开展了人工鱼礁实验研究。人工鱼礁产生的背涡流域多为缓流区, 可为鱼类提供休憩、躲避强流的场所; 人工鱼礁产生的上升流能促进上下层海水交换, 加快营养物质循环速度、提高海域的基础饵料水平, 为鱼类提供了索饵场所, 因而易于诱集鱼类从而形成渔场。可以说人工鱼礁增殖渔业资源的生态效益主要是通过人工鱼礁的流场效应来实现^[1-3], 因此流场是人工鱼礁的研究关键。

迄今为止, 国内外关于人工鱼礁流场研究的方法主要有3种: 现场调查、水槽实验或风洞实验、数值计算。由于海洋的深度和广度及其流动的不稳定性, 人工鱼礁海域的现场调查难度大、成本高, 也不可能单纯地由理论分析而得到定量结果, 要想对流场问题进行研究和分析, 则需要借助理论和实验的方法进行。但是水槽实验(流水水槽、回流水槽)或风洞实验只能反映人工鱼礁海域局部的流速流向, 而不能正确把握整个人工鱼礁海域流场的分布和变化, 数值计算方法应运

而生^[4]。数值计算模拟人工鱼礁海域流场效应是一个新的发展方向, 但目前还没有得到广泛地验证。因此本研究中设计了风洞实验以及数值模拟计算, 两实验选取相同形状的人工鱼礁模型, 模拟相同环境下人工鱼礁周围流场的流态, 将两实验结果进行对比, 验证数值计算所选计算模型的可行性和准确度。

1 材料与方法

1.1 风洞实验

1.1.1 实验原理 风洞实验是以风为介质模拟流场, 其理论基础是流动相似性原理: 当2个流动现象的特征量所组成的无量纲组合数相等时, 两流动现象即相似。由无量纲数雷诺数 Re (Reynold's number)^[5] 相等(1)推导出风洞工况风速计算公式(2):

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (1)$$

$$u_w = u_m \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{\mu_w}{\mu_a} \quad (2)$$

公式(1)中, ρ 为流体密度, u 和 L 分别为流场的特征

收稿日期: 2008-09-12; 修订日期: 2008-12-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30471332); 国家863重点项目课题(2006AA100303); 上海市教委重点学科项目(J50702); 广东省人工鱼礁水动力学及生态效应研究课题(技D-8006-06-0021).

作者简介: 刘洪生(1963-), 男, 硕士, 研究方向为海洋环境工程与生态系统. Tel: 13371935352; E-mail: hslu@shou.edu.cn

通讯作者: 章守宇. Tel: 133719353556; E-mail: syzhang@shou.edu.cn

速度和特征长度， μ 为流体动力黏性系数。根据雷诺数相似推导出公式(2)，其中 u_m 和 u_w 分别为风洞工况风速和数值计算初始流速， L_m 和 L_r 分别为风洞

实验和数值计算鱼礁模型尺寸。

1.1.2 模型及规格 风洞实验采用的人工鱼礁模型类型和规格见图1。

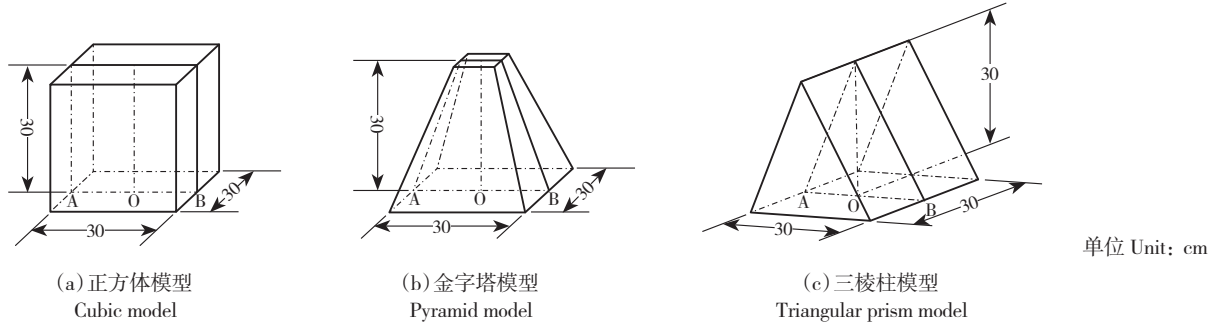


图1 人工鱼礁模型类型及其规格

Fig. 1 Types and specifications of artificial reef models

模型均为实心,类型分为正方体、平顶金字塔及三棱柱3种,其中正方体模型边长为30 cm;平顶金字塔模型下底面正方形边长30 cm,上底面边长为下底面的1/5,高30 cm;三棱柱模型底面为边长30 cm的正方形,高30 cm,来流方向于图1中A指向B。

1.1.3 测点布置 实验的模型和测点的布局见图2。图中所示的为模型中垂面剖面图,阴影部分为模型,模型以正方体实体模型为例,更换模型时,测点位置坐标基本不变。坐标原点位于模型底面中心,x轴沿风洞纵向,并以气流方向为正,z垂直向上,坐标值单位为cm。

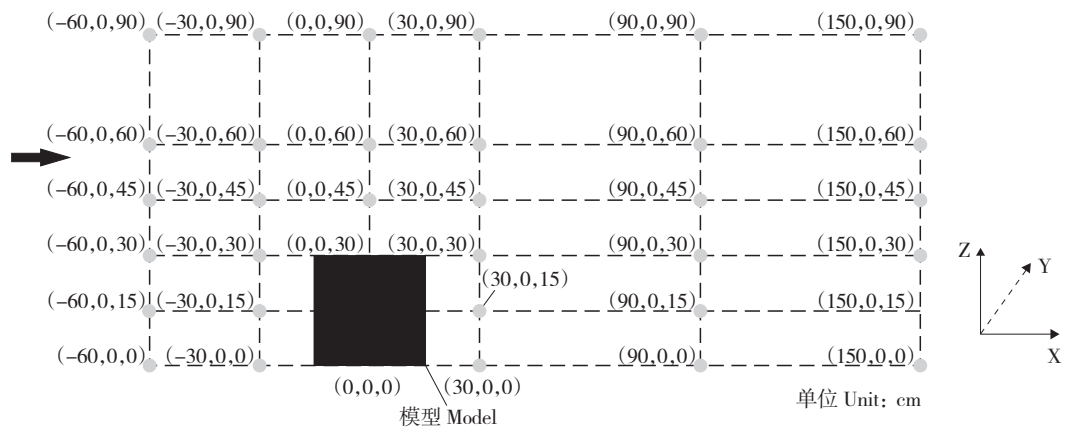


图2 人工鱼礁模型和测点布局剖面图

Fig. 2 Profiles of artificial reef model and distribution of measuring points

1.1.4 工况条件 实验所用风洞总长度为33 m,实验段尺寸为长18 m、宽2.5 m、高1.8~2.1 m,风速范围0.5~20 m/s。风洞由前段、收缩段和实验段组成,实验段后部底板装有直径为2.15 m的圆形实验台,实验模型可安放其上。实验中用毕托管测出各测点的纵向流速 u (x 方向)和垂向流速 w (z 方向)。风洞实

验中各模型规格尺寸均为30 cm×30 cm×30 cm。由于风洞实验风速介于0.5 m/s和20m/s之间,因此选定3个工况为6 m/s、9 m/s和12 m/s进行实验。

1.2 数值模拟

1.2.1 控制方程及其离散 数值计算遵循质量守恒和动量守恒定律,不可压缩流体的控制方程为连续

方程(3)和动量守恒方程(4)(即Navier-Stokes方程,简称N-S方程):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + d_{\text{div}}(\rho u \bar{u}) = d_{\text{div}}(\mu g_{\text{grad}} v) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + d_{\text{div}}(\rho v \bar{v}) = d_{\text{div}}(\mu g_{\text{grad}} v) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_v \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + d_{\text{div}}(\rho w \bar{w}) = d_{\text{div}}(\mu g_{\text{grad}} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_w$$

式(3)和(4)中 u 、 v 和 w 分别为 x 、 y 和 z 方向的速度的分量(m/s), t 是时间(s), ρ 是密度, \bar{u} 是速度矢量(m/s), μ 是动力黏度, p 是压力, d_{div} 是散度, g_{grad} 是梯度, S_u 、 S_v 和 S_w 是动量守恒方程的广义源项。

确定好控制方程后,数值计算之前要将计算区域离散化,即将空间上连续的计算区域划分成多个子区域,并确定每个区域中的节点,从而生成网格。然后将控制方程在网格上离散,即将偏微分格式的控制方程转化为各个节点上的代数方程组。本实验选取的人工鱼礁模型形状与风洞实验完全相同,但考虑到为了便于计算和划分网格,实验选取的模型尺寸是3 m×3 m×3 m,根据模型形状不同选择不同的网格对计算区域进行离散化。本次计算使用的离散化方法为有限体积法,其基本思路是:将计算区域划分为网格,并使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积,待解微分方程对每一个控制体积积分,从而得到离散方程^[6]。数值计算时输出每个网格中心点位置的速度值。

1.2.2 湍流模型 湍流数值模拟方法分为直接数值模拟和间接数值模拟方法。直接数值模拟方法是直接求解瞬时湍流控制方程;非直接数值模拟方法就是不直接计算湍流的脉动特征,而设法对湍流作出某种程度的近似和简化处理,包括3种方法:大涡模拟法(LES)、雷诺时均法(RANS)和统计平均法。本实验采用的湍流模型为大涡模拟(LES)。其原理是为了模拟湍流运动,一方面要求计算区域的尺寸应大到足以包含湍流运动中出现的最大涡;另一方面要求计算网格应小到足以分辨最小涡的运动。然而,就目前

的计算机能力来说,能够采用的计算网格的最小尺度仍比最小涡的尺度大许多。因此,大涡模拟是最适宜的方法,其基本思路是用瞬时的Navier-Stokes方程直接模拟湍流中的大尺度涡,不直接模拟小尺度涡,而小涡对大涡的影响通过建立近似模型来模拟^[6]。

1.2.3 边界条件的设定 计算流体力学(CFD)问题需要边界条件,对于非稳态问题还需要有初始条件。所谓边界条件是指在求解区域的边界上所求解的变量或其一阶导数随时间地点变化的规律。只有给出了合理的边界条件,才可能计算得出流场的解。本实验中礁体模型和研究流域底面取壁面边界,采用无滑移边界条件,近壁面采用标准壁面函数。研究流域的其他表面除进出口边界外均定义为对称边界条件。

研究流域进口边界采用速度入口边界条件,来流定义为均匀流。由于海水的动力黏性系数会受盐度、碱度、温度和潮位等因素影响,据相关文献,在101 325 Pa大气压下、20℃时 $\rho_a \approx 1.21 \text{ kg/m}^3$, $\mu_a \approx 1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\rho_w \approx 1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\mu_w \approx 1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ^[7-8]。将上述各参数代入公式(2)可以得到公式(5):

$$u_w = u_m \frac{0.3 \text{ m}}{3 \text{ m}} \cdot \frac{1.21 \text{ kg/m}^3}{1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3} \cdot \frac{1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}}{1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}} \quad (5)$$

$$= 0.0067 u_m$$

由于实际海域的海底复杂多变,海水的黏度和密度也会随盐度、温度和潮位等因素的变化而变化,所以对于海水公式(1)中的参数值都是不确定的,因此在数值模拟中以纯水为模拟介质,进行简单的模拟。因此根据公式(5),风洞3个工况6 m/s、9 m/s和12 m/s在数值计算中分别对应0.04 m/s、0.06 m/s和0.08 m/s,即为数值计算的初始来流速度。为了与风洞实验对应以验证数值计算的可靠性,所设定的数值计算初始流速与实际海流流速相差很大,但是本实验主要目的是验证数值计算方法,如果该计算方法可行,在模拟实际海域计算时,只需将式(2)中的纯水参数换成海水参数即可进行流速转化,并且改变来流速度的设定不会影响计算结果的准确性。

2 结果与分析

由于风洞实验结果为实测值,将其视为正确值,以此来验证数值计算的结果,两者结果越接近越能说明数值计算的可靠性。表1为两实验所有测点在

x 方向上平均速度与来流速度比值3种模型(\bar{u}/u_∞)。结果表明,风洞实验和数值实验各测点 x 方向速度的平均值与来流速度比值 \bar{u}/u_∞ 非常接近,差距在8%之内。

表1 3种模型风洞实验和数值实验各测点平均速度与来流速度的比值(\bar{u}/u_∞)
Tab.1 Contrast of ratio of mean measured velocities to incoming velocities (\bar{u}/u_∞) between wind tunnel experiment and numerical experiment for 3 models

实验 Trial	金字塔来流速度/($m \cdot s^{-1}$) Incoming velocity for Pyramid			三棱柱来流速度/($m \cdot s^{-1}$) Incoming velocity for Triangular prism			正方体来流速度/($m \cdot s^{-1}$) Incoming velocity for Cube		
	6	9	12	6	9	12	6	9	12
	风洞实验 Wind tunnel experiment	0.77	0.73	0.83	0.80	0.77	0.82	0.76	0.76
数值实验 Numerical experiment	0.77	0.78	0.85	0.74	0.74	0.78	0.75	0.75	0.85

由于风洞和数值计算所用介质不同,因此实验所选模型尺寸和来流速度不同,在进行对比之前将两者结果进行了无量纲处理,以 u 表示测点在 x 方向上流速, w 表示 z 方向速度, u_∞ 表示来流速度, H 表示礁高, L 表示礁宽, u^* 表示 u/u_∞ 、 z^* 表示 z/H 、 x^* 表示 x/L 。根

据风洞测点位置分布特点,以正方体型鱼礁为例按图3所示,选择与来流方向垂直(即 z 方向)的2条直线上的测点及与来流方向平行(即沿 x 方向)的4条直线上的测点对 u^* 进行对比,验证数值实验的可行性,图中以 \circ 代表测点,各测点均位于 $y=0$ 平面。

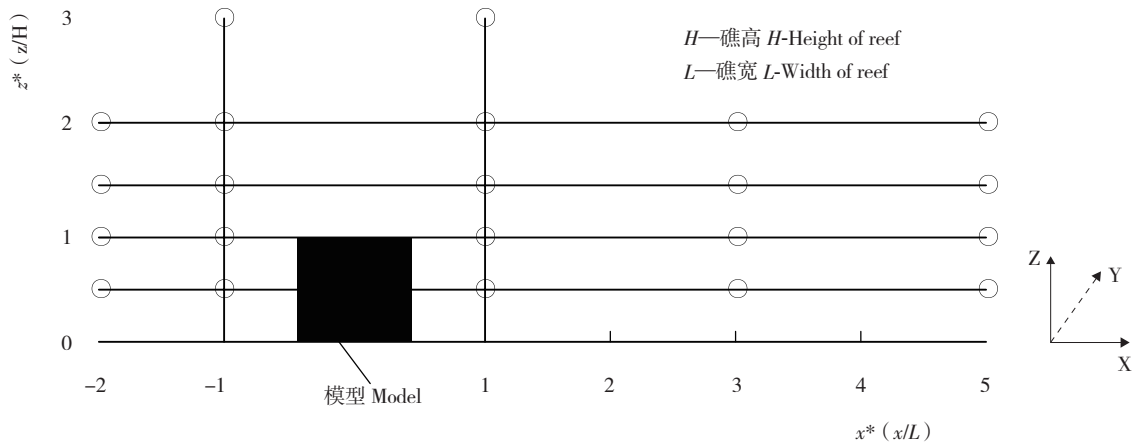


图3 测点相对位置分布示意图

“ \circ ” —测点

Fig. 3 Sketch of relative distribution of measuring points

“ \circ ” —measuring points

图4和图5为两实验部分对应测点 u^* 对比曲线,其中 \bullet 代表风洞实验结果,曲线代表数值实验结果。图4是风洞实验和数值实验 Z 方向测点的 u^* 对比图。其中(a)(b)表示金字塔模型,(c)(d)表示三棱柱模型,(e)(f)表示正方体模型,(a)(c)(e)表示图3中 $x^* = -1$

处 z 方向测点的 u^* ,(b)、(d)、(f)表示图3中 $x^* = 1$ 处 z 方向测点的 u^* 。图5是风洞实验和数值实验 x 方向测点的 u^* 对比图,其中(a)、(b)表示正方体模型,(c)、(d)表示三棱柱模型,(a)-(d)依次表示图3中 z^* 为0.5、1、1.5和2处 x 方向测点的 u^* 。

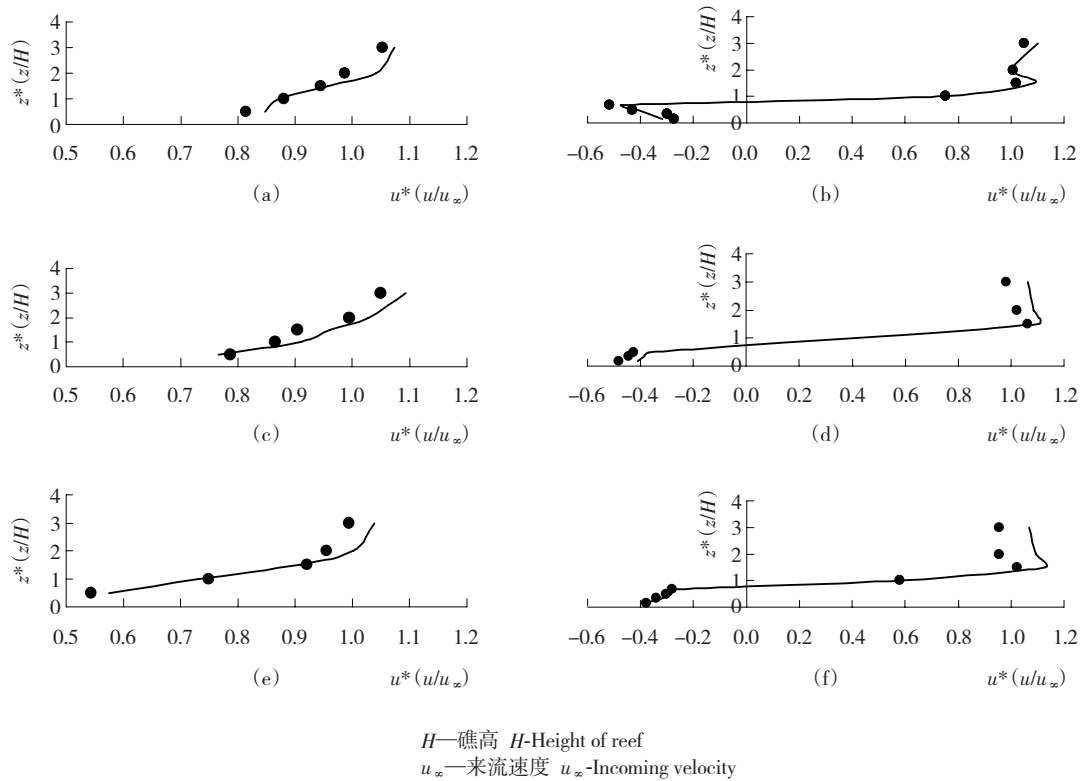


图4 3种模型的风洞实验和数值实验z方向测点 u^* 对比曲线

● 风洞实验; -数值实验

(a)和(b)金字塔模型;(c)和(d)三棱柱模型;(e)和(f)正方体模型;

(a),(c)及(e) $x^* = -1$; (b),(d)及(f) $x^* = 1$

Fig. 4 Contrast of u^* of measuring points along z direction between wind tunnel and numerical experiments for 3 models

● wind tunnel experiment; -numerical experiment

(a) & (b) pyramid models; (c) & (d) triangular prism models; (e) & (f) cubic models;

(a), (c) & (e) $x^* = -1$; (b), (d) & (f) $x^* = 1$

图4和图5表明两实验大多数测点的 u^* (x 方向瞬时速度与来流速度比值)差别甚微,各测点的 u^* 拟合较好,且变化基本趋势相同。如图4中(b)、(d)、(f)表示在鱼礁后方1倍礁宽处垂直方向上各测点 u^* 的变化趋势,在1倍礁高以下测点 x 方向的瞬时速度 u 小于0,与来流速度 u_∞ 相差较大,而在1倍礁高以上测点的 u 非常接近 u_∞ 两实验的结果是一致的。图5中(a)和(b)分别代表0.5和1倍礁高处,随着测点与鱼礁水平距离的增大,测点 x 方向速度 u 与来流速度 u_∞ 的接近程度 u^* ,两实验结果均表明在鱼礁后方1倍礁高处 u^* 最小,在鱼礁两侧随着测点与鱼礁距离的增大 u^* 逐渐增大越来越接近1。

通过表1中两实验特征值的比较以及图4和图5

两实验中具有代表性测点的对比,说明数值计算所选模型能较好地模拟实际海域人工鱼礁周围流场,可以作为人工鱼礁海域流场的模拟计算工具。

3 讨论

(1) 以往学者对于人工鱼礁的实验研究曾采用过风洞(水槽)实验和数值模拟的方法,但是没有将两者结合起来进行对比实验,也就没有验证数值计算的可行性和准确度^[9-15]。本研究通过风洞和数值实验对比说明数值计算所选模型能较好地模拟实际海域人工鱼礁周围流速和流向,同时由于不会受到实验仪器的限制,测点较密,能够较好地反映鱼礁周围的上升流和背涡流规模和强度,因此可以作为人

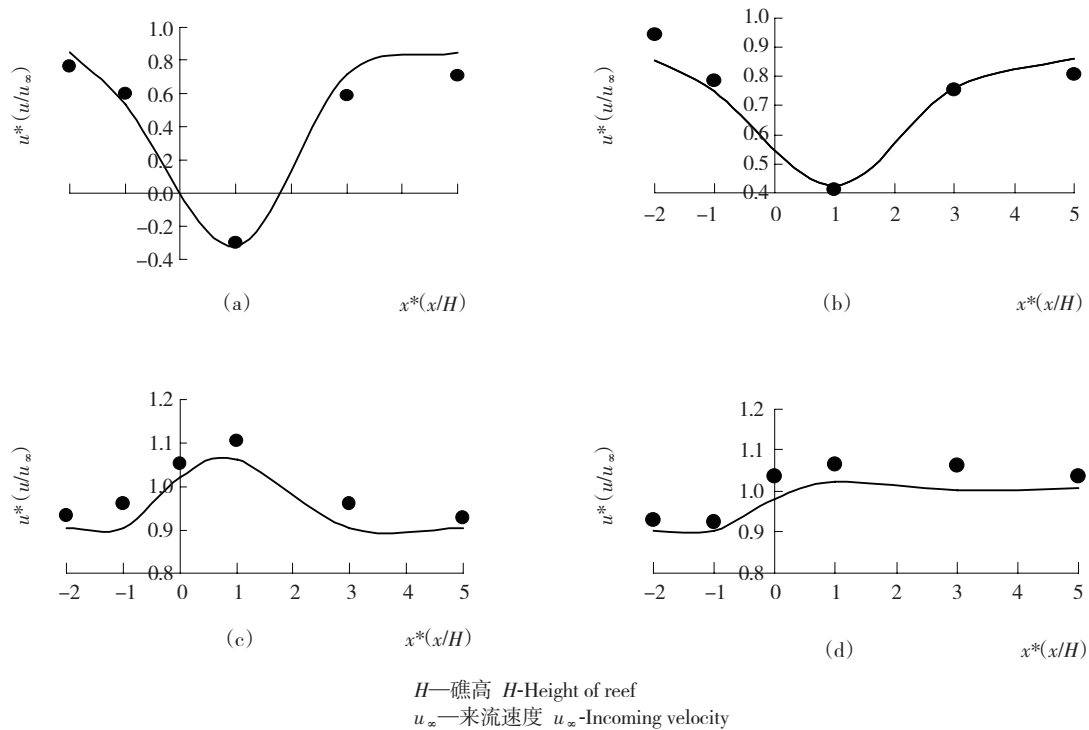


图5 风洞实验和数值实验 x 方向测点 u^* 对比曲线

● 风洞实验; - 数值实验

(a) 和 (b) 正方体模型; (c) 和 (d) 三棱柱模型; (a) - (d) z^* 依次为 0.5、1、1.5 和 2

Fig. 5 The contrast of u^* of measuring points along x direction between wind tunnel and numerical experiments

● wind tunnel experiment; - numerical experiment

(a) & (b) cubic models; (c) & (d) triangular prism models; (a) - (d) $z^* = 0.5, 1, 1.5$ and 2 respectively

工鱼礁流域流况的模拟计算工具,为人工鱼礁效益评估提供可靠数据。虽然模型基本可靠,但是由于实际海域运动状况变化复杂,而且实际投放的鱼礁并不是单体鱼礁,而是群礁,因此在以后利用大涡模拟进行鱼礁区流场的数值计算时应该视具体情况改变计算模型各参数的设置,包括网格的划分、模型的物理参数、计算步长等。

(2) 本实验的不足是由于风洞实验仪器的限制使得风洞风速设定和模型尺寸与数值实验不同,并且实验测点较少,无法与数值实验进行较多定量的对比,为使对比结果更具说服力,以后进行此类对比实验时,首先在实验的设计时应注意测点的合理选择和实验条件的对应。

参考文献:

- [1] 王云新,冯吉南. 鱼礁与聚鱼[J]. 水产科学,2002(2): 30-31.
- [2] 冯吉南,王云新. 鱼礁和生物环境—鱼礁渔场的鱼群分布和活动[J]. 水产科技,2002(1): 22-24.
- [3] 张怀慧,孙龙. 利用人工鱼礁工程增殖海洋水产资源的研究[J]. 资源科学,2001,23(5): 6-10.
- [4] 潘灵芝. 渔业水域改善的数值模拟[D]. 上海水产大学,2005: 4.
- [5] 黄卫星,陈文梅. 工程流体力学[M]. 北京: 化学工业出版社,2001: 144.
- [6] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社,2004: 24-150.
- [7] 施永生,徐向荣,张英,等. 流体力学[M]. 北京: 科学出版社,2005: 4-9.
- [8] 张也影. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社,1999: 28.
- [9] Christina S J. Artificial reef study undertaken by california sea grant

- program[J]. Inter Coast, 2001: 1-2.
- [10] Smith J E, Smith C M, Hunter C L. An experimental analysis of the effects of herbivores and nutrient enrichment on benthic community dynamics on a Hawaiian reef [J]. Coral Reefs, 2001 (19): 332-342.
- [11] 野添学, 大桥行三, 藤原正幸. 鉛直2次定常流場に設置された働立型构造物による植物アランクトンと营养盐の変化予測に関する数值試験[J]. Fisheries Engineering, 2000, 36 (3): 253-259.
- [12] 鶴谷宏一, 松延嘉国, 惟住智昭, 等. 湧昇流を発生させるための水中設置構造物設置背後の流れと乱れ特性[J]. 港湾技术研究 所報告, 1987, 26 (2): 13-35.
- [13] 虞聪达, 俞存根, 严世强. 人工船礁铺设模式优选方法研究[J]. 海洋与湖沼, 2005, 35 (4): 299-305.
- [14] 潘灵芝, 林军, 章守宇. 鉛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.
- [15] 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.

Validation and comparison between wind tunnel experiments and numerical simulation of flow field around artificial reefs

LIU Hong-sheng¹, MA Xiang¹, ZHANG Shou-yu¹, LIN Jun¹, YU Hong-bing², HUANG Hua-jie²

(1. College of Marine Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Marine Institute of South China Sea, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: The eco-efficiency of proliferation of fishery resources through artificial reefs depends on the flow field effect of artificial reefs to some extent, so the flow field research is key to the research of artificial reef eco-efficiency. Numerical calculation is one of the new methods in flow field research on artificial reefs, but its feasibility and accuracy haven't been widely validated. In this paper, flow fields around solid artificial reef (AR) models with different shapes of cube, pyramid and triangular prism were studied by means of wind tunnel experiments and numerical simulation. According to the principle of similarity flow, the incoming velocities were set respectively; the horizontal and vertical velocities at some representative points were measured compared after given equations with no dimensions. It was found that the average error of velocities at all measuring points of wind tunnel and numerical experiments is about 8%, while u^* (the dimensionless velocity along x direction) at most measuring points are basically similar, manifesting the same trend, so the feasibility and accuracy of numerical calculation used for simulating flow fields on AR are validated. [Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16 (3): 365-371]

Key words: artificial reefs; flow fields; wind tunnel experiments; numerical simulation; validation

Corresponding author: ZHANG Shou-yu. E-mail: syzhang@shou.edu.cn