

文章编号: 1674 - 5566( 2010) 06 - 0836 - 05

## 方形人工鱼礁通透性及其对礁体周围 流场影响的数值实验

李 珺, 林 军, 章守宇

(上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

**摘 要:** 基于考虑不同形状大小、组合规模的人工鱼礁投放于不同水域环境后形成的流态变化有较大差异, 设计  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向不同通透方式的单个正方体人工鱼礁, 采用 LES(大涡模拟)紊流模式, 对定常来流速度下人工鱼礁单体附近流场进行三维数值模拟, 建立反映礁体结构的通透系数与礁体产生流场变化的关系。结果显示: 上升流和背涡流的规模随通透系数增加而减小; 来流方向上, 礁体迎流面、背流面的通透系数变化对上升流和背涡流规模影响较为显著, 而内部结构的变化则作用不明显, 礁体上方与侧方的开口对上升流和背涡流的影响也不显著。迎流面通透系数变化是背涡流规模影响的主要因素。方形单礁缓流区体积随通透系数  $T_m$  增大呈线性减小, 关系为  $V_x = -1241.8T_m + 1206$ 。通过该研究可在数值计算中通过通透系数与流场变化的关系, 实现将复杂礁体简单化, 有效地提高计算效率; 为将小范围模拟扩大到群礁、甚至大海域的模拟, 定量评估人工鱼礁的生态效应打下基础。

**关键词:** 人工鱼礁; 三维数值模拟; 通透系数; 大涡模拟; 上升流; 背涡流

中图分类号: S 953.1 文献标识码: A

## The numerical experiment on the permeability of a cubic artificial reef and the effect on the flow field around the reef

LI Jun, LIN Jun, ZHANG Shou-yu

(College of Marine Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Different shapes, sizes, and the combinations of the artificial reefs can affect the upwelling and the back eddy flow. Considering the artificial reef in the sea can cause certain alteration to the flow around it, by using the Large Eddy Simulation(LES), a method of Computational Fluid Dynamics, this paper tries to design different structures of a cubic reef through  $x/y/z$  three directions, then we can study the connection between the structures and permeability. The result showed that the ranges of the upwelling and back eddy flows decreased as the increase of input and back-output permeability strongly; but the effect from the permeability of internal structure and the permeability of direction  $y$  and  $z$  are not very clear. So the Input-Permeability is the main effect factor of the range of the back eddy flows. The volume of the back eddy flows around a cubic artificial reef decreases as the increase of the Permeability  $T_m$ , the equation is  $V_x = -1241.8T_m + 1206$ . According to this study, we can use the relation between the permeability and the change of the

收稿日期: 2010-01-30

基金项目: 国家“八六三”计划项目(2006AA100303); 国家科技支撑计划(2007BAD43B03); 上海市教委重点学科建设项目(J50702)

作者简介: 李珺(1985-), 女, 硕士研究生, 专业方向为海洋生态系统工程。E-mail: jlee8541@gmail.com

通讯作者: 章守宇, Tel: 15692165356, E-mail: syzhang@shou.edu.cn

flows; so that we can simplify the reef with complex structure in the 3D numerical simulation as well as the improvement of computed speed; Based on this research, we can apply the small range simulation to the large area in order to evaluate the ecological effect of artificial reef.

**Key words:** artificial reef ; 3D numerical simulation; permeability; large eddy simulation( LES) ; upwelling; back eddy flows

建设人工鱼礁渔场是改善近海水域生态环境、修复渔业资源的一条行之有效的途径<sup>[1]</sup>。研究显示,人工鱼礁能够导致底泥重新分布,营养盐变化以及影响海洋生物索饵、避害、产卵等,但这些效应的根本是通过人工鱼礁的流场效应来实现的<sup>[2]</sup>。人工鱼礁产生的背涡流域,即缓流区,为鱼类提供了休憩、躲避强流的场所;上升流则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。因此,对人工鱼礁周围流场的研究是具有一定科学意义的。

单个礁体的周围流场的数值模拟可以借助已有的商用软件如 FLUENT、CFX、STAR-CD 等来完成,这些软件广泛应用于细微尺度的流态模拟<sup>[3-6]</sup>。但是,实际人工鱼礁建设中往往投放的礁体数量达到成千上百个之多;且根据人工鱼礁区周边水质、生物资源等实际调查的结果表明,人工鱼礁区的影响范围可达到其建设规模的近 5~10 倍之多,通常的面积范围在  $10^0 \sim 10^1$  m 量级的公顷数<sup>[7]</sup>。而单个礁体内部则只有  $10^1 \sim 10^3$  mm 量级的结构变化,需要十分精细的网格才能准确模拟。但是,如此细微的网格划分对于实际人工鱼礁海域而言,其计算量实在过于庞大,非大型高速计算机则根本无法完成;而若网格划分大于 1 m 则无法准确模拟礁体近旁及后方的局部流态。正确把握这些局部区域的流态形成及变化规律对于深入分析鱼礁的集鱼机理、饵料效应等等都是至关重要的。基于这些问题的考虑,本文引入通透系数这一概念,通过对鱼礁单体的通透系数研究,寻找礁体结构变化与其产生的流场的关系,在数值计算的建模中就能够实现将复杂礁体的结构进行简化,利用能与之产生同样流场效应的简单礁体来建模,从而使网格划分更加简单,在保证模拟真实性的同时,有效地提高数值计算的效率。

## 1 人工鱼礁流场研究的内容及方法

### 1.1 通透系数的定义

由于实际投放的鱼礁都有一定镂空,本文将一个边长为  $L$  的实心正方体礁作镂空研究,对礁体镂空程度的度量以礁体通透系数这一无量纲数来表示。考虑  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上都有水流穿透产生的流场变化,而且礁体除了迎流面和出口面的变化会影响流场以外,礁体内部结构的变化也能影响流场的变化。综合考虑这些因素,参考相关文献对通透系数作出如下定义<sup>[8]</sup>:

(1)  $x$  方向上的平均通透系数  $\bar{T}_x$ : 在一个  $yz$  剖面上,镂空部分的面积为  $S_{yz}(x)$ ,整个正方体体积为  $V$ ,那么  $x$  方向上的平均通透系数  $\bar{T}_x = \int_0^L S_{yz}(x) dx / V$ ;  $\bar{T}_x$  的取值范围为  $0 \sim 1$ ,  $0$  表示完全不通透、相当于实心礁的情况,  $1$  表示完全通透、相当于无礁体的情况。同理可得  $\bar{T}_y$  和  $\bar{T}_z$ 。

(2) 礁体进背流面的通透系数  $\bar{T}_{in}$ 、 $\bar{T}_{out}$ : 迎流面  $yz$  上,进口面镂空面积为  $S_{yz_m}$ ,总面积为  $S$ ,那么进口面通透系数为:  $\bar{T}_{in} = S_{yz_m} / S$ ,  $\bar{T}_{in}$  取值范围为  $0 \sim 1$ 。同理可得礁体背流面通透系数  $\bar{T}_{out}$ 。

首先,将稳定来流速度方向上( $x$  轴方向)的通透系数与流场效应进行比较,之后再逐渐加入  $y$ 、 $z$  方向上的通透系数。

### 1.2 三维数值模拟的方法

#### 1.2.1 数值计算的原理

湍流模型的选择是否合适,将直接影响仿真的精度和真实性。本文选用大涡模拟法(Large-eddy Simulation, LES)。大涡模拟是介于直接数值模拟(DNS)与 Reynolds 平均法(RANS)之间的一种湍流数值模拟方法。基本思想为:用瞬时的 Navier-Stokes 方法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近似的模型来考虑。这样就能模拟出大于网格尺

度的涡的运动<sup>[7]</sup>。

在 LES 方法中,通过使用滤波函数,每个变量都被分成两部分。对于瞬时变量  $\phi$ ,有:

$$\bar{\phi} = \int_D \phi G(x, x') dx' \quad (1)$$

式中:  $D$  是流动区域;  $x'$  是实际流动区域中的空间坐标;  $x$  是滤波后的大尺度空间上的空间坐标;  $G(x, x')$  是滤波函数。  $G(x, x')$  的表达式有多种选择,但有限体积法的离散过程本身就隐含着提供了滤波功能,即在一个控制体积上对物理量取平均值<sup>[9]</sup>。因此,这里采用如下的表达式:

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V, & x' \in v \\ 0, & x' \notin v \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $V$  是表示控制体积所占几何空间的大小。这样,式(1)可写成:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{V} \int_D \phi dx' \quad (3)$$

现用式(1)表示的滤波函数处理瞬时状态下的 Navier-stokes 方程及连续方程,有:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (5)$$

以上两式构成了在 LES 方法中使用的瞬时状态下的控制方程组,式中带有上划线的量为滤波后的场变量,亚格子尺度应力 (Subgrid-scale Stress, 简称 SGS 应力)  $\tau_{ij}$  为:

$$\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (6)$$

### 1.2.2 模型建立

我国目前投放的人工鱼礁的尺寸范围一般在 1~5 m 的正方体,其中 2~4 m 的正方体占多,东海区人工鱼礁建设的礁体尺寸大都为 3 m × 3 m × 3 m 的正方体礁<sup>[10]</sup>;并且鱼礁单体的数值计算表明,3 m 礁高的正方体礁产生的流态变化最为显著<sup>[11]</sup>。因此,本实验设计工况以该尺寸为礁体的基本尺寸。通过数值实验计算结果可见,在鱼礁背流面生较来流速度而言流速缓慢的背涡流区域,又常称为缓流区,尤以涡心处为最接近零<sup>[12]</sup>。靠近鱼礁部分的涡流大,渐远渐弱。此外,在鱼礁迎流面也有涡流产生,其尺度很小,仅是鱼礁高度的几分之一<sup>[13-15]</sup>。在鱼礁迎流面会产生上升流,流体由前下方向后上方运动,上升流速度最强的区域位于鱼礁迎流面前上方(如图

1)。该流态变化与许多学者对单礁产生流态变化的研究结果相符<sup>[2,12]</sup>。

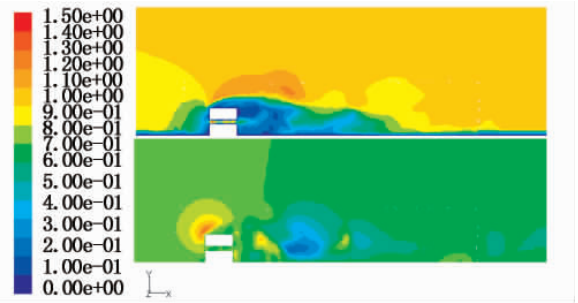


图1 单礁缓流区(上)与上升流区(下)示意图

Fig.1 The back-eddy flows of a reef (above) and the upward flows of a reef (below)

## 2 数据处理及分析

目前,对上升流和背涡流的大小规模没有一个统一的标准进行衡量,本文在定义缓流区范围时,根据大部分研究采用的方法,分别取  $x$  方向上速度绝对值小于来流速度  $u_0$  的 80%、75%、70%,比较缓流区体积大小,见图 2,可知 3 种取法的缓流区体积变化趋势是相同的,因此为了便于比较分析,在礁高为  $h = 3$  m 的单礁情况,规定  $x$  方向上速度绝对值小于 80% 来流速度  $u_0$  的区域为缓流区,取缓流区体积对缓流区进行比较分析。同理分别比较  $y$  方向上速度值大于 0.1 m/s、0.15 m/s、0.2 m/s 的区域,上升流体积变化趋势也相同,因此将  $y$  方向上速度值大于 0.1 m/s 的区域作为上升流区域,取上升流区域体积为对上升流区进行比较分析。

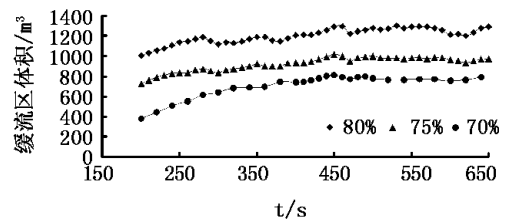


图2 缓流区体积随时间变化曲线

Fig.2 The change of the volume of back eddy flows with the time

另外,由图 2 和 3 可见计算达到 350 s 后缓流区和上升流区的体积基本达到一个稳定值,因此,取 400~500 s 的体积数据求平均值,得出缓流区体积  $V_x$  和上升流区体积  $V_y$ 。

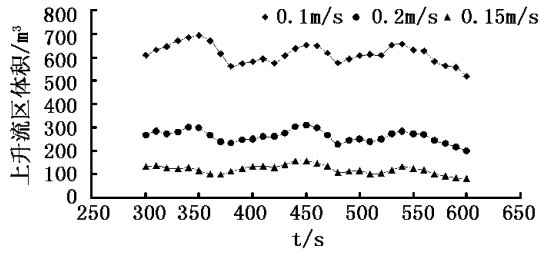


图3 上升流区体积随时间变化曲线  
Fig.3 The change of the volume of upwelling with the time

为了弄清正方体礁周围流态受到各个方向上的通透系数影响程度,设置正方体单礁迎流面、内部结构、背流面 3 个部分变化的不同情况,比较了 13 种工况 (Case1 ~ 13), 每种工况包含了 5 个渐变结构,共 65 种模型 (见附图 1)。例如 Case2,取相同的迎流面 (中部镂空一个 0.5 m × 0.5 m 的正方形区域),内部镂空结构呈线性增大至背流面,同时背流面也不断增大。其中 Case1 ~ 6 是仅在 x 方向 (来流方向) 上作通透处理, Case7 ~ 11 加入了 y 方向 (垂向) 上的通透处理, Case12 ~ 13 则再加入 z 方向 (侧向) 的通透处理。实验结果分析如下:

(1) 将 13 种工况分为 3 大类比较: (a) 仅 X 方向通透的情况,作缓流区体积与  $T_x$  的关系图,在图 3.3 中用点 “▲” 表示,趋势线用实线表示; (b) X 和 Y 两个方向通透的情况,作缓流区体积与  $T_y$  的关系图,在图 3.3 中用点 “■” 表示,趋势线用虚线表示; (c) X、Y 和 Z 3 个方向都通透的情况,作缓流区体积与  $T_z$  的关系图,在图 4 中用点 “◆” 表示,趋势线用点划线表示。同理作上升流区体积和 3 个方向通透率的关系,得图 5。由图 4 和图 5 可见,当将 y、z 方向上引入通透结构时,缓流区和上升流区的体积都未有明显影响。

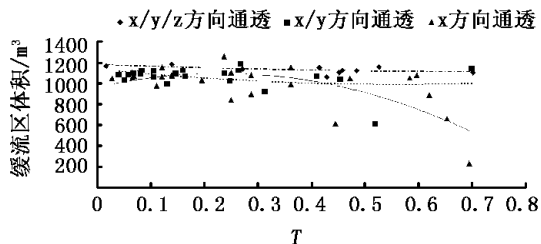


图4 缓流区体积与通透系数 T 的关系  
Fig.4 The relation between the volume of the back-eddy flows and the Permeability T

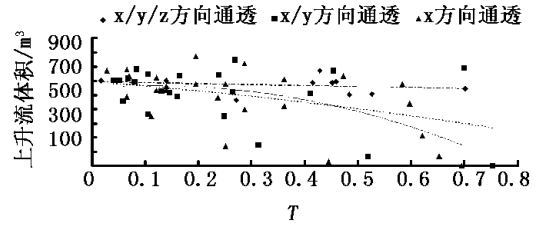


图5 上升流区体积与通透系数 T 的关系  
Fig.5 The relation between the volume of the upwelling and the Permeability T

因此可认为, x 方向 (来流方向) 的结构变化是影响缓流区和上升流区变化的主要因素,在下文中,则着重对缓流区、上升流区体积与 x 方向的通透系数之间的关系进行分析。

(2) 工况 case1 ~ 6 的设计包括了 x 方向上进口面的逐渐变化、内部结果的不同变化形式、背流面的逐渐变化的几种结构。

表 1 缓流区 & 上升流区体积与 T 的相关系数 R

Tab.1 The correlation R between the volume of upward flows & back eddy flows and the Permeability T

	$T_{in}$	$T_{out}$	$\bar{T}_x$
缓流区体积 (m <sup>3</sup> )	-0.863 5	-0.630 7	-0.745 2
上升流区体积 (m <sup>3</sup> )	-0.022 8	-0.381 4	-0.034 2

比较实验结果,根据统计分析,可得  $T_{in}$ 、 $T_{out}$  和  $\bar{T}_x$  与缓流区、上升流区体积的相关系数 (见表 1),由表 1 可见,与背流面通透比较,进口面通透对缓流区体积的影响更大,内部结构对产生的缓流区体积影响相对较小,缓流区的体积与进口面的通透系数  $T_{in}$  相关系数为 86%,关系最为密切。此可推断,单礁进口面结构是使得产生缓流区最佳效果的关键因素,缓流区体积随其通透系数的增加而减少。但是上升流区体积与出口通透系数之间的关系相对较为紧密,但由于上升流区体积的变化幅度并不非常显著,相关系数值不高。 $T_{in}$ 、 $T_{out}$  和  $\bar{T}_x$  对缓流区体积的变化都起到一定的影响,但  $T_{in}$  的影响最为显著,因此作  $T_{in}$  与缓流区体积关系图,由图 6 可见,缓流区的体积随通透系数  $T_{in}$  的增大而呈线性下降。 $V_x = -1241.8T_{in} + 1206$ , 方差  $R^2 = 0.856$ 。

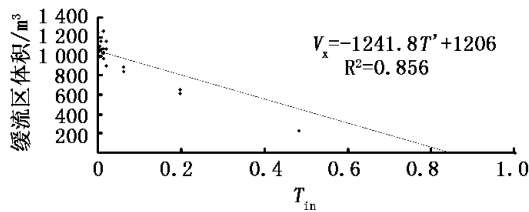


图6 缓流区体积与进口面通透系数  $T_{in}$  的关系

Fig. 6 The relation between the volume of the back-eddy flows and the Permeability  $T_{in}$

### 3 讨论

从本数值模拟实验中可得出以下结论: (1) 单个方形礁体产生的流场变化主要受来流方向上的通透结构变化影响。在来流方向上, 方形单礁的结构变化对其能产生的上升流和背涡流影响较大, 而其他方向上的结构变化和通透程度对流态的影响则较小; (2) 单个礁体的缓流区体积大小变化主要受礁体进口面和背流面的通透系数共同作用, 随进口面和背流面通透系数的增加而降低, 但与进口面的通透系数关系最为紧密, 即进口面的开口大小对缓流区体积的变化有很大影响; (3) 单礁缓流区体积随通透系数  $T_{in}$  增大呈线性减小, 关系为  $V_x = -1241.8T_{in} + 1206$ ,  $R^2 = 0.856$ 。通透系数是礁体结构变化的表示形式, 因此此关系式表示了礁体进口面的结构变化与缓流区体积大小的关系。确定通透系数  $T$  与缓流区的体积关系后, 我们能够在今后的数值计算中通过在简单礁体上根据通透系数赋值后, 使其产生的缓流区规模与复杂礁体相同, 这样在对大范围海域模拟时, 只需要放入简单礁体进行数值模拟。这样就能在保证规模的同时, 满足模拟精度和计算速度的情况下解决网格合理划分的问题提供一种有效的途径。同时, 引入礁体通透系数这一概念后, 可以得出礁体通透系数与所产生流场效应的定量关系, 为今后的礁体设计工作提供科学依据。在设计单礁的结构时, 只需要着重考虑进背流面的设计, 而内部的结构设计时则着重考虑功能性即可。

但是, 本文在运用该三维数值模拟的方法也存在一定局限性, 程序的编制及数据的收集、整

理与正确利用, 在很大程度上依赖于经验与技巧, 还需要实际观测或物理模型试验对其进行进一步验证。另外, 在工况的设计上可能存在不够全面的问题, 在今后进一步的研究中需要增加工况变化, 不断完善该数值模拟研究。

### 参考文献:

- [1] 刘惠飞. 日本人工渔礁研究开发的最新动向 [J]. 渔业现代化, 2002, (1): 25 - 28.
- [2] 陈勇, 于长清, 张国胜, 等. 人工鱼礁的环境功能和集鱼效果 [J]. 大连水产学院学报, 2002, 17(1): 64 - 49.
- [3] 潘小强, 袁璟. CFD 软件在工程流体数值模拟中的应用 [J]. 南京工程学院学报: 自然科学版, 2004, 2(1): 62 - 66.
- [4] 叶茂, 伍超, 陈云良, 等. FLUENT 软件在水利工程中的应用 [J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(3): 78 - 81.
- [5] 李文华, 苏明军. 常用湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用 [J]. 水泵技术, 2005, 4: 39 - 41.
- [6] 韩占中, 王敬, 兰小平. Fluent 流体工程仿真计算实例与应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [7] 中国水产科学研究院南海水产研究所, 中国人工鱼礁的理论与实践 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2005.
- [8] 吕珍谋, 赖泉基, 詹动全, 等. 透水与非透水结构物附近流场比较分析 [J]. 台湾水利, 2005, 54(4): 46 - 52.
- [9] 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [10] 刘同渝. 人工鱼礁的流态效应 [J]. 水产科学, 2003, 108(6): 43 - 44.
- [11] 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.
- [12] 虞聪达, 俞存根, 严世强. 人工鱼礁铺设模式优选方法研究 [J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(4): 299 - 305.
- [13] Djouimaa S, Messaoudi L, Glel P W. Transonic turbine blade loading calculations using different turbulence models-effects of reflecting and non-reflecting boundary conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27: 779 - 787.
- [14] Monismith S G. Hydrodynamics of Coral Reefs, Annual Review of Fluid Mechanics [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2007, 39: 37 - 55.
- [15] Apsley D. CFD Calculation of Turbulent Flow with Arbitrary Wall Roughness [J]. Flow Turbulence Combust, 2007, 78: 153 - 175.