

米字型人工鱼礁流场数值模拟与水槽实验的比较

李 珺, 章守宇*

(上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 采用 LES(大涡模拟)紊流模式,对定常来流速度下按实际尺寸缩小 10 倍的米字型人工鱼礁单体附近流场进行三维数值模拟,同时利用相同尺寸的水槽实验验证该数值计算方法的可行性。在数值模拟与水槽实验中分别设置了 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 以及 1.2 m/s 6 种来流速度,并比较礁体附近三个方向上流速变化的情况。结果表明,数值模拟中约 80% 的测点速度与水槽实验结果吻合。而且,具有较大差异的值都发生在礁体上方开口中心位置附近的测点,该位置流场变化强烈且水槽实验测量有一定难度,易产生误差,因此对比结果差异较大是可允许的。综合比较结果,初步认为利用三维数值模拟计算方法模拟人工鱼礁的流场变化是可行的,今后可利用该数值计算方法替代复杂的水槽实验,甚至可以对实际投放礁体的原始规格以及所放置的海域进行等比例模拟,更清晰准确地对人工鱼礁周围流场变化进行详细研究。同时对不同结构的人工鱼礁和人工鱼礁群周围的流场进行系统分析,从而实现人工鱼礁的优化配置。

关键词: 人工鱼礁; 三维数值模拟; 水槽实验

中图分类号: **文献标识码:** A

人工鱼礁引起的流场变化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,从而改善近海水域生态环境,产生一定的生态效应^[1-2]。研究显示,正确把握礁体周围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、饵料效应等至关重要。人工鱼礁投放后现场流场数据的采集存在一定的难度,早期人工鱼礁流场变化的研究主要利用水槽实验和风洞试验等方法,目前已有学者尝试将三维数值计算的方法用于研究人工鱼礁周围流态变化^[3-5]。这种方法得到的数据不会受测量仪器和客观环境的影响,能够更为全面地反映流场变化。礁体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^[3,6-7]。但是,这种数值模拟在人工鱼礁流场模拟的运用还处于起步阶段,数值计算的方法和模型的设置尚未得到

准确验证。因此,本研究利用大涡模拟(LES)的数值计算方法对人工鱼礁单体进行三维模拟,同时做了相同规格尺寸、相同水域环境下的水槽实验,将二者的结果进行比较分析,探讨其在人工鱼礁数值模拟研究中运用的可行性。

1 材料与方法

1.1 水槽实验

以投放在实际海域中所用到一种典型礁体——米字型礁(外部框架结构为边长 3 m 的正方体)为例,将其按 1:10 的比例缩小为一小型米字型礁(外部框架结构为边长 0.3 m 正方体)。将缩小后的米字型礁放入长×宽×高=80 m×4 m×3 m 的长方体水槽中(图 1)。

首先,利用一块底板(长×宽=3 m×3 m),底板两头平滑以减少底板运动时产生的水流影响,使得在底板运动时产生的相对迎流是定常流。

收稿日期:2010-04-21 修回日期:2010-05-29

资助项目:国家“八六三”高技术研究发展计划重点项目(2006AA100303);国家科技支撑计划(2007BAD43B03);上海市教委重点学科(J50702)

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

在设计的海底模型上放置成比例缩小后的方型米字鱼礁,并在礁体中轴剖面周围的测点位置固定流速仪传感器,用以测得该点三个方向上的流速。该水里模型实验在静水槽中完成,通过移动上方脚手架从而带动整个海底模型运动,以其整体对静止水体作相对运动产生的相对流速,完全可以获得与动水槽相同的实验效果。

利用上述方法移动底板,给水平方向提供速度为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 和 1.2 m/s 的均匀来流速度 U ,观察礁体附近流速变化情况。

在定常流速下,礁体附近的流态变化较为强烈,离礁稍远处的变化虽然明显,但由于涡流产生脱落,流态的变化很不稳定。而礁体周围的流态相对于离礁稍远处的流态变化更为稳定。另外,考虑到礁体附近能够产生上升流及背涡流的大致位置,选取能够代表这些特征并且流速变化

相对稳定的点进行对比分析。在水槽实验的模型中,取中轴面上礁体周围的 17 个点(P1~P17),利用流速仪测得 x 、 y 、 z 三个方向上的流速分量,与之后的数值计算模型中相对应点的三个方向流速进行比较(图 2)。

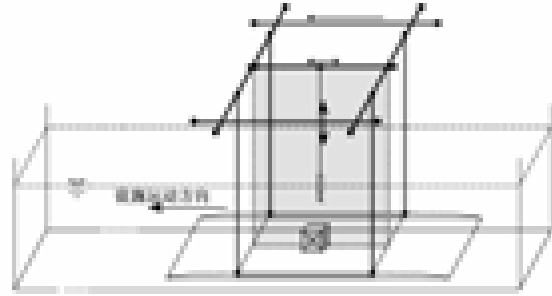


图 1 水槽实验示意图

Fig. 1 Diagram of the flume experiment

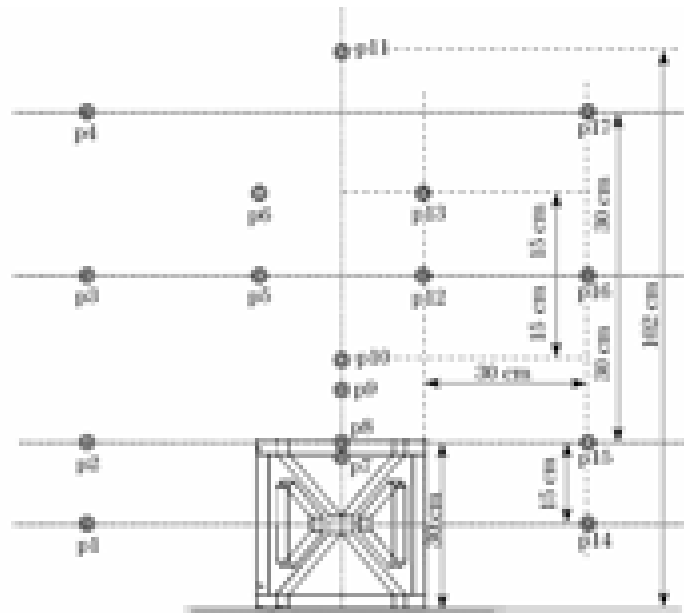


图 2 礁体周围测点位置

Fig. 2 Measuring points around the reef

1.2 数值模拟

数值计算方法 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^[12-14]。对各种数值方法的比较试算后,本研究选用大涡模拟法(large-eddy simulation,简称 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。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^[10]。

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 ϕ ,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地提供了滤波功能,即在一个控制体积上对

物理量取平均值,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:

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) = \\ - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (5)$$

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) τ_{ij} 为:

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

在非稳态的湍流模型中,对该水域边界给定合理的条件,才能使求解的模型变量随时间位置变化,从而计算出理想的结果。因此,在模型计算前要设置各边界条件的初始情况。本数值模型流域底面及礁体表面采用壁面边界,在近壁面利用标准壁面函数计算。为了简化模型,水域的水面和两侧面均采用对称边界条件。在进口面设定一初始速度值的定常来流。假设鱼礁后流域的范围给的足够大,当水流流出模型的出口面时,流场恢复到与进口面相同的初始流场状态(即定常流),因此出口面设定为速度出口。虽然实际海域中海水的密度、粘性等属性较为复杂,且可能随深度及温度而变化,但是本文中数值模拟的海域较小,为简化模型忽略以上属性,采用纯水填充整个流域,与水槽实验保持一致。

数值模型建立 在数值模拟计算时,根据水槽实验的规格尺寸建立完全相同的模型(图3),将1:10缩小的米字型单礁放置在长×宽×高=80 m×4 m×3 m的水域中,设置与水槽实验相应的0.2~1.2 m/s的不同来流速度,计算该礁体周围产生的流场(图4)。

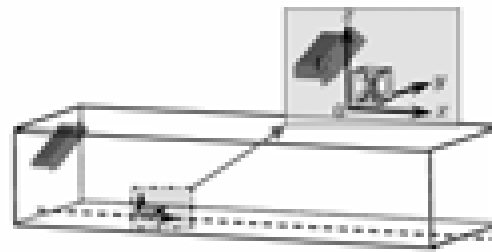


图3 数值模型简图

Fig.3 Diagram of the 3D numerical simulation

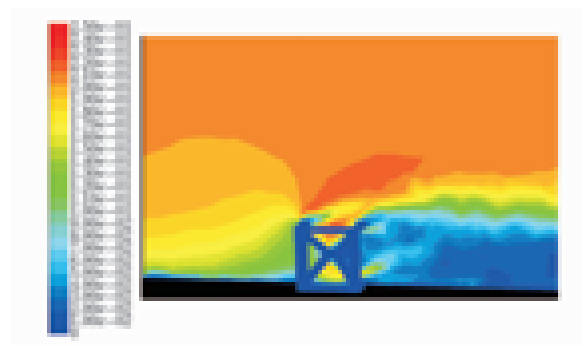


图4 礁体周围流态变化示意图(数值模拟)

Fig.4 Diagram of the flow around a reef (the 3D numerical simulation)

1.3 数据处理方法

在水槽实验中,实验条件和人为因素等客观条件限制使得测得的数据值变化较大。在数据处理时,利用标准方差法排除异常数值,取筛选后速度的平均值作为水槽实验的结果。并认为筛选后的一系列数据中最大值和最小值是水槽实验测度速度值的可信范围。

数值模拟计算的结果是相对稳定的一组数据。在计算到400 s之后,所测点的速度没有较大变化,因此,在400~500 s之间每间隔10 s取一次测点流速,求得速度平均值作为数值模拟的结果。

2 结果与讨论

如图5~图10,水槽实验中测点速度的平均值所在点用“●”表示,并利用测得速度的最小值与最大值在图表中作出水槽实验数据的变化范围。将数值模拟计算的速度平均值(所在点用“■”表示),与水槽实验相应点进行比较。以流速为0.2 m/s的实验结果为例,图5分别显示了该来流速度下,水槽实验与数值实验中 x 、 y 、 z 三个方向上17个测点的速度分量对比情况。

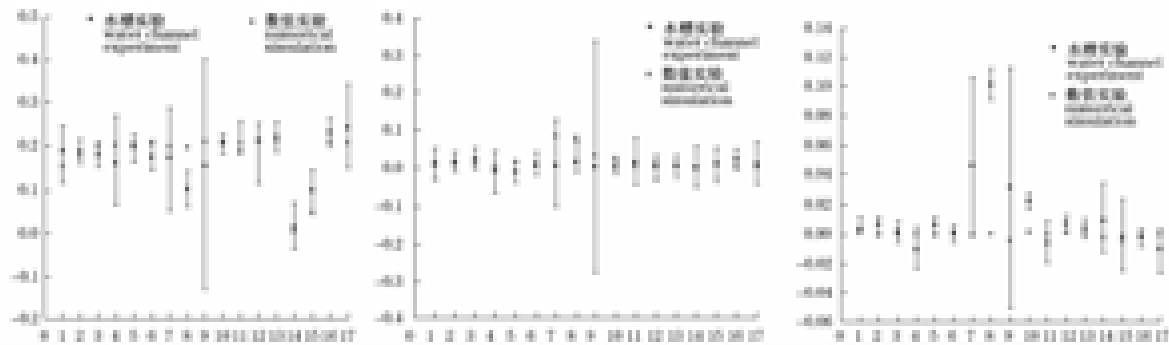


图5 米字型单礁在 0.2 m/s 来流速度下水槽实验与数值模拟的流速对比

左: x 方向上速度比较; 中: y 方向上速度比较; 右: z 方向上速度比较。

Fig. 5 Comparison of V around the Mi-Zi type artificial reef between numerical simulation and water channel experiment when the velocity of the coming flow is 0.2 m/s

Left: V_x ; Middle: V_y ; Right: V_z .

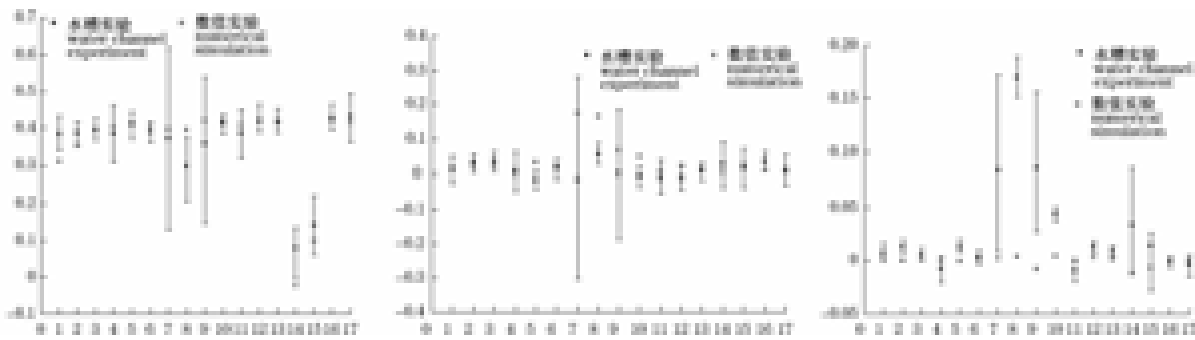


图6 米字型单礁在 0.4 m/s 来流速度下水槽实验与数值模拟的流速对比

左: x 方向上速度比较; 中: y 方向上速度比较; 右: z 方向上速度比较。

Fig. 6 Comparison of V around the Mi-Zi type artificial reef between numerical simulation and water channel experiment when the velocity of the coming flow is 0.4 m/s

Left: V_x ; Middle: V_y ; Right: V_z .

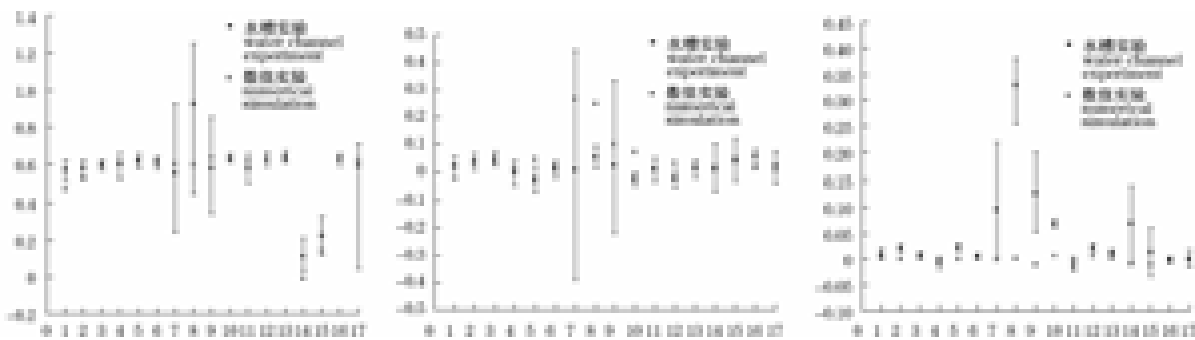


图7 米字型单礁在 0.6 m/s 来流速度下水槽实验与数值模拟的流速对比

左: x 方向上速度比较; 中: y 方向上速度比较; 右: z 方向上速度比较。

Fig. 7 Comparison of V around the Mi-Zi type artificial reef between numerical simulation and water channel experiment when the velocity of the coming flow is 0.6 m/s

Left: V_x ; Middle: V_y ; Right: V_z .

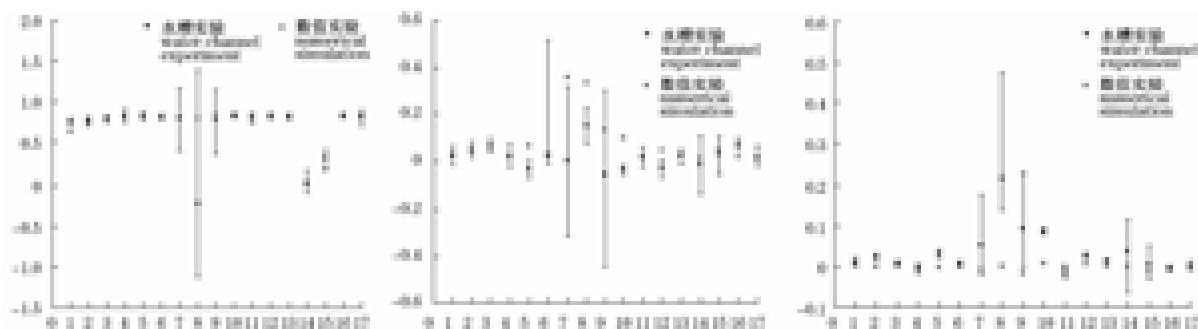


图8 米字型单礁在 0.8 m/s 来流速度下水槽实验与数值模拟的流速对比
左: x 方向上速度比较; 中: y 方向上速度比较; 右: z 方向上速度比较。

Fig. 8 Comparison of V around the Mi-Zi type artificial reef between numerical simulation and water channel experiment when the velocity of the coming flow is 0.8 m/s

Left: V_x ; Middle: V_y ; Right: V_z .

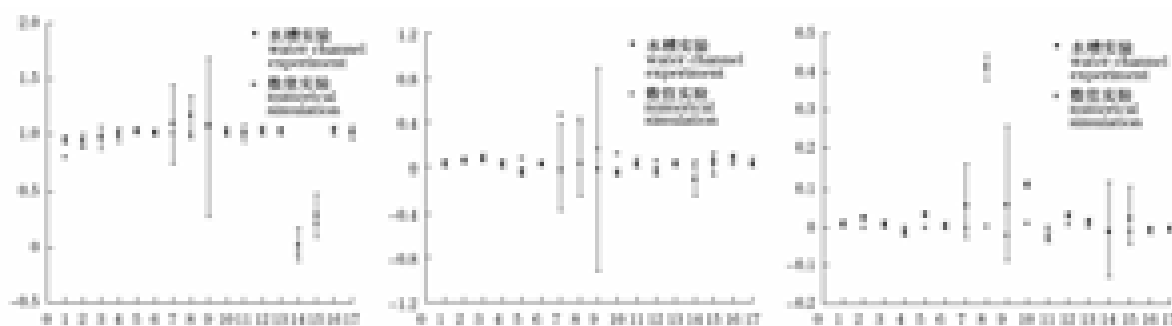


图9 米字型单礁在 1.0 m/s 来流速度下水槽实验与数值模拟的流速对比
左: x 方向上速度比较; 中: y 方向上速度比较; 右: z 方向上速度比较。

Fig. 9 Comparison of V around the Mi-Zi type artificial reef between numerical simulation and water channel experiment when the velocity of the coming flow is 1.0 m/s

Left: V_x ; Middle: V_y ; Right: V_z .

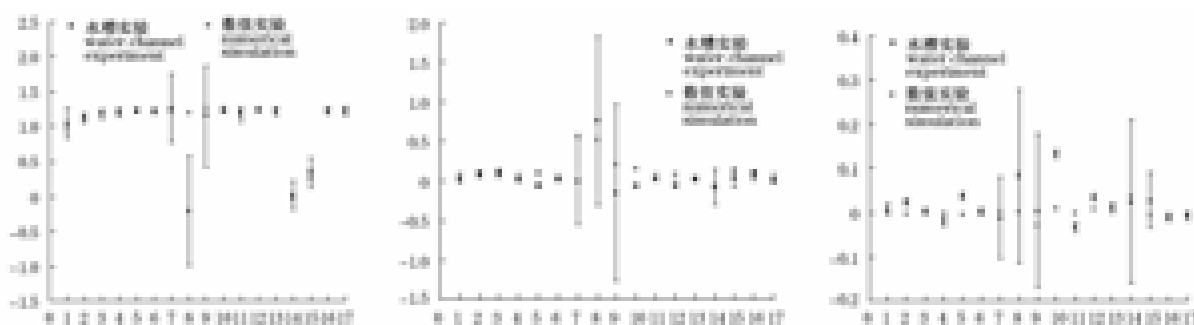


图10 米字型单礁在 1.2 m/s 来流速度下水槽实验与数值模拟的流速对比
左: x 方向上速度比较; 中: y 方向上速度比较; 右: z 方向上速度比较。

Fig. 10 Comparison of V around the Mi-Zi type artificial reef between numerical simulation and water channel experiment when the velocity of the coming flow is 1.2 m/s

Left: V_x ; Middle: V_y ; Right: V_z .

由图5~图10可见,数值计算得出的测点流速值中约有80%都在水槽实验值的变化范围内。具有较大差异的值都发生在测点7、8、9处(即礁

体上方开口中心位置附近)。将不同来流速度下的数值模拟和水槽实验的测点速度变化作整体的趋势图,得图11~图13。由图11可见随着来流

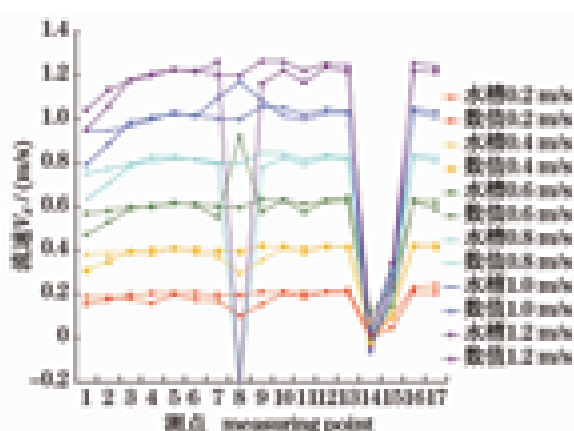


图 11 水槽实验与数值模拟的 x 方向上流速比较
Fig. 11 Comparison of V_x between numerical simulation and water channel experiment

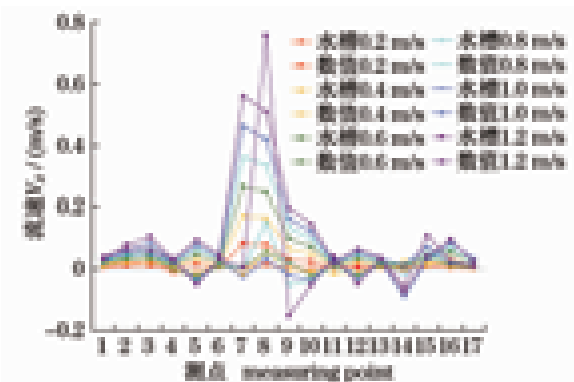


图 12 水槽实验与数值模拟的 y 方向上流速比较
Fig. 12 Comparison of V_y between numerical simulation and water channel experiment

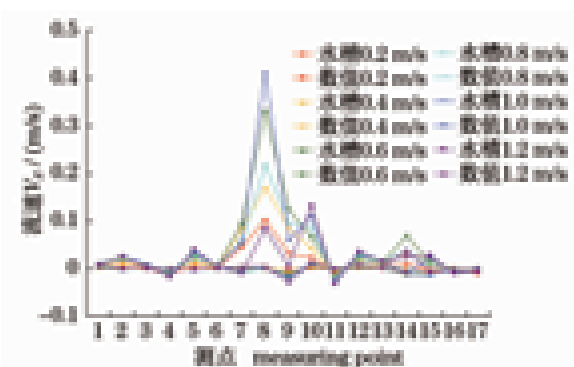


图 13 水槽实验与数值模拟的 z 方向上流速比较
Fig. 13 Comparison of V_z between numerical simulation and water channel experiment

速度的增大,来流速度方向(x 方向)上流速基本与来流速度一致。在礁后 30 cm,距底面 15 cm 高的测点 14 处于礁体产生的背涡流区内流速值

变小,且来流速度变化不影响该区域的流速下降到 0.1 m/s 左右。不同来流速度的情况均在礁体开口正上方的测点 8 附近发现数值模拟和水槽实验测得的流速差异很大,这可能是因为该点位于礁体上方出口处,在水槽实验中对该点的位置掌握相对于其他点而言更加困难,而该处的实际流态变化又较为剧烈,稍微有所偏差,值的变化就很大,因此可认为该点附近产生的测量差异是允许的。

3 结束语

利用三维数值模拟的方法对人工鱼礁周围流场效应的研究成果仍处于理论阶段。对于在人工鱼礁流场研究中运用数值模拟方法的准确性还没有学者进行较系统的验证。有学者利用风洞试验与数值模拟作了相关对比验证^[4],但考虑水槽实验与数值模拟的密度、壁面函数、粘性系数、静压等重要物理参数可做到完全一致,因此利用二者的对比验证则更具有说服力。虽然本文只选用了一种礁体进行了数值计算与水槽实验的对比验证,但是该数值方法是具有共同性的,可以运用于其他类型礁体的模拟。从本文结论来看,大涡模拟数值计算方法能准确地模拟鱼礁周围流场的变化,具有一定的可行性。而且,三维数值模拟不受到实验仪器、环境等条件的限制,可以根据需要改变礁体的结构、位置和排列方式,也可以改变礁体所放置的区域大小、地形等。该方法测得的数据更为详细和完整,能够清晰地反映鱼礁周围以及更大范围内流场的变化,这对研究鱼礁产生的上升流和背涡流提供了良好的条件。因此,在今后对人工鱼礁周围流场效应的研究中,完全能够利用数值计算的方法替代复杂的水槽实验,甚至可以利用该数值模拟方法对实际投放礁体的原始规格以及所放置的海域进行等比例模拟,从而更清晰准确地对人工鱼礁周围流场变化进行详细研究。

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.
- [4] 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.
- [5] 刘同渝. 人工鱼礁的流态效应[J]. 水产科学, 2003,108(6):43-44.
- [6] 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.
- [7] 张晓庆,王志东,周林慧. 三维摆动鱼鳍的数值模拟[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2006,20(1):6-10.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [12] 张宏飞,曹红松,赵捍东,等. 数值仿真中湍流模型的选择[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(4): 242-244.
- [13] Djouimaa S, Messaoudi L, Giel 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(4):779-787.
- [14] Apsley D. CFD Calculation of Turbulent Flow with Arbitrary Wall Roughness [J]. Flow Turbulence Combust,2007,78(2):153-175.

The comparison between numerical simulation and water channel experiment on an Mi-zi artificial reef

LI Jun, ZHANG Shou-yu*

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

Abstract: The flow changing around the artificial reef is the fundament of its physical effect. So far, using 3D numerical calculation to study the flow around the artificial reef is a tentative research, so this paper compared the water channel experiment with the numerical calculation to prove its accuracy. Using the Large Eddy Simulation (LES), a method of Computational Fluid Dynamics, this paper simulated the flow around a Mi-zi type artificial reef (dimension compared with actual reef is 1:10) under a steady initial coming flow. Also, the water channel experiment with the same size as the numerical model is set to prove the feasibility of the numerical simulation. This paper compared the flow from x, y and z, three directions, under six different velocities of the coming flow, 0.2 m/s, 0.4 m/s, 0.6 m/s, 0.8 m/s, 1.0 m/s and 1.2 m/s. The result showed, about 80% of the velocity on the measured points by numerical simulation are consistent with the results measured by water channel experiment. Also, the discrepant points mainly located on the hatch of the top of the reef. And this position was difficult to measure because of the strong flow changing so that it was allowed to be variant. Therefore, under the overall comparison of results, this three-dimensional numerical simulation can replace the water channel experiment and be applied in the simulation of the same size as the actual artificial reef in the sea area to do the further research of the flow around the artificial reefs more clearly. At the same time, we can use this method to build the artificial reef models to study the flow around the artificial reef with different structures or a set of some artificial reefs, then we can optimize the construction of artificial reefs.

Key words: artificial reef; 3D numerical simulation; water channel experiment

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