

三棱柱型人工鱼礁绕流流场的 CFD 分析

黄远东, 龙 催, 邓济通

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘 要: 基于 CFD 软件平台 ANSYS FLUENT, 模拟得到了 5 种不同来流速度(0.1、0.2、0.4、0.6 和 0.8 m/s)下三棱柱型人工鱼礁(各边长均为 3 m)周围的三维水流场。通过速度场模拟结果分析, 得到了上升流最大速度点位置、上升流最大高度、上升流最大速度、上升流平均速度以及背涡区尺度等参数; 分析了礁体周围的压力分布和背涡区的涡旋结构特征。此外, 还初步揭示出三棱柱型人工鱼礁绕流与方型人工鱼礁绕流在流场效应上的异同点。

关键词: 三棱柱型人工鱼礁; 剧烈分离; 水流场; 上升流; 背涡区; 数值仿真

中图分类号: TV131 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2013)01-0001-04

Analysis of water flow field based on CFD at a three – prism artificial reef

HUANG Yuandong, LONG Cui, DENG Jitong

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Three – dimensional water flow fields past a three – prism artificial reef with three meters long of each side are numerically simulated by using the commercial CFD software (ANSYS FLUENT) under the five different incoming velocities (0.1, 0.2, 0.4, 0.6 and 0.8 meter per second respectively). The position of the maximum velocity of the upwelling current, the maximum upwelling height, the maximum and average velocities of the upwelling current as well as the size of the wake vortex region are all obtained through analyzing the numerical results of the velocity fields, and the wake vortex structures and pressure distributions are analyzed. Moreover, the flow discrepancies are revealed when the flow passes between a rectangular artificial reef and a three-prism artificial reef.

Key words: three-prism artificial reef; massive separation; water flow field; upwelling current; wake vortex region; numerical simulation

人工鱼礁建设是保护和增殖渔业资源的有效措施之一, 目前世界上很多国家已在本国沿海投放人工鱼礁^[1]。人工鱼礁投放到海底后, 由于礁体的阻流作用, 将产生上升流和尾涡流等流场效应。正确掌握礁体所产生的流场效应, 对于礁体结构优化设计、分析鱼礁的集鱼机理和饵料效应等至关重要^[2-3]。水绕鱼礁流动为典型的剧烈分离流动, 其涉及到旋涡发展演化等复杂的非线性过程。对于此类问题的研究有现场实测、风洞试验^[4]或水槽试验^[5]等。近年来, 随着商用计算流体力学(CFD)软件的日益推广和高性能计算机的涌现, CFD 也已用于探究人工鱼礁周围的绕流问题^[4,6]。近期, 黄远东等人^[7-8]基于商用 CFD 软件平台 – ANSYS FLUENT, 仿真分析了不同来流速度下实心方型人工鱼礁绕流和多空方型人工鱼礁绕流。本文以此为基础, 进一步数值研究不同来流速度下三棱柱型人工鱼礁的三维绕流问题, 以期为进一步掌握三棱柱型

人工鱼礁的流场效应奠定基础。

1 鱼礁结构与计算区域

如图 1 所示, 采用各边长均为 3 m 的三棱柱型实体人工鱼礁(礁体高度为 2.6 m)。计算区域的大小为 60 m × 33 m × 30 m(见图 2 所示)。

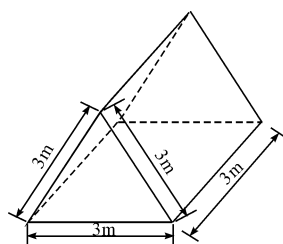


图 1 鱼礁结构尺寸

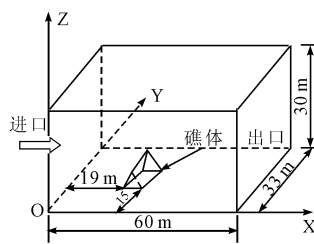


图 2 计算区域

来流方向从左至右; 坐标原点位于进口平面底边的端点; 置于 $z = 0$ 平面上的鱼礁底面与 x 轴和 y 轴的最短距离分别为 15 m(礁体高度的 5.8 倍)和 19 m

收稿日期: 2012-09-26; 修回日期: 2012-10-11

基金项目: 上海市教委重点学科建设项目(J50502); 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1102)

作者简介: 黄远东(1965-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 教授, 从事河流动力学及环境模拟技术的研究。

(礁体高度的6.9倍);礁体背流面的底边与计算域出口平面的距离为39 m(礁体高度的15倍),礁体顶部棱线与计算域顶部面的距离为27.4 m(礁体高度的10.5倍)。

2 模型方程与数值方法

2.1 水流运动控制方程

水绕人工鱼礁流动为流体力学中典型的非定常、不稳定、具有剧烈分离的流动,流动过程中始终伴随着旋涡的壁面生成、脱落、在主流场中的对流和粘性扩散等非线性过程。作为初步研究,本文仅探究鱼礁绕流的时间平均特性。因此模拟中选取定常、不可压的 Navier - Stokes 方程和连续性方程,而描写湍流平均量的封闭方程组则采用 RNG 模型。

2.2 边界条件

本文作者已采用 CFD 技术模拟分析了实心方型人工鱼礁和多空方型人工鱼礁的三维绕流问题^[7-8]。本研究采用与前述研究中完全一样的边界条件,即:进口采用均匀速度进口条件,且选取0.1、0.2、0.4、0.6和0.8 m/s 等5种不同来流速度;出口边界采用自由出流条件;计算区域的两侧与顶部均采用对称边界条件,而计算域底面以及鱼礁各壁面均采用无滑移条件。

2.3 网格划分

采用边长为0.3 m 的六面体和楔形混合网格,整个计算区域的网格单元总数为2194300。

2.4 数值算法

计算在商用 CFD 软件 ANSYS FLUENT 平台上完成。压力与速度耦合采用 SIMPLEC 算法,梯度项的处理采用基于单元体的最小二乘法,压力项处理采用 standard 差分格式,各方程的空间离散均采用 QUICK 格式,精度控制中的计算残差值取为 10^{-6} ,计算迭代的最大步数设为4000步。

3 模拟数值结果与分析

模拟得到了5种不同来流速度(0.1、0.2、0.4、0.6和0.8)下三棱柱型人工鱼礁周围的三维水流场。

3.1 上升流特性分析

上升流是一种极其重要的流态,其可促进海底营养物质往海底上部迁移和扩散,从而达到诱集鱼类的效果。图3显示5种不同来流速度下 $y = 16.5$ m 截面(过礁体中心)上的速度矢量分布。从该图可以明显看出,当水流逼近鱼礁迎流面时,由于鱼礁的阻流作用,水流转向抬升而形成上升流。为与已

有的研究结果相比较,本研究仍取水流的 z 方向速度分量与来流速度之比大于或等于5%的水域作为上升流区域^[7-8]。通过分析 $y = 16.5$ m 截面上的速度分布,得出5种不同来流速度下的上升流最大速度都出现于点(19.3, 16.5, 2.34)上,即位于三角形截面顶点的上游且紧靠该顶点;进一步分析,得出来流速度为0.1、0.2、0.4、0.6和0.8 m/s 下的上升流最大速度与来流速度的比分别为0.579、0.580、0.588、0.588和0.590,这表明上升流最大速度与来流速度的比基本不随来流速度大小的改变而改变;同样通过分析 $y = 16.5$ m 截面上的速度分布,得出来流速度为0.1、0.2、0.4、0.6和0.8 m/s 下的上升流平均速度与来流速度的比分别为0.138、0.139、0.139、0.140和0.140,这表明上升流平均速度与来流速度的比也基本不随来流速度大小的改变而变化。上述分析也表明不同来流速度下上升流最大速度大致为上升流平均速度的3倍。

通过分析过礁体中心的铅垂线(截面 $x = 19.5$ m 与截面 $y = 16.5$ m 的交线)上的 z 方向速度分量分布,得出不同来流速度下上升流的最大高度均为礁体高度的2.88倍,即上升流最大高度与礁体高度的比也不随来流速度大小的改变而改变。

对比分析无孔方型人工鱼礁绕流和多孔方型人工鱼礁绕流的 CFD 数值仿真结果^[7-8],可以进一步得出,三棱柱型人工鱼礁绕流的上升流最大速度与来流速度的比小于无孔方型人工鱼礁绕流和多孔方型人工鱼礁绕流下的上升流最大速度与来流速度的比(无孔方型鱼礁绕流和多孔方型鱼礁绕流下的上升流最大速度与来流速度之比分别为0.64和0.74),这说明三棱柱迎流面坡度的存在对自由来流的加速起到了一定的缓解作用(相对于垂直放置的鱼礁迎流面),也表明三棱柱型人工鱼礁的阻流作用要稍弱于方型人工鱼礁;而三棱柱型人工鱼礁绕流的上升流平均速度与来流速度的比以及上升流最大抬升高度与礁体高度的比均略大于无孔方型人工鱼礁绕流和多孔方型人工鱼礁绕流下的比值(无孔方型人工鱼礁和多孔方型人工鱼礁绕流下的上升流平均速度与来流速度的比均为0.12;无孔方型人工鱼礁和多孔方型人工鱼礁绕流下的最大抬升高度与礁体高度的比分别为2.63和2.68)。

3.2 背涡流特性分析

从图3可以进一步看出,三角形顶点(从三维空间来看,为鱼礁顶部的一条棱线)为固定的流动分离点(分离线),由于流动剧烈分离,不断有旋涡

从鱼礁表面脱落进入到主流场,由于旋涡具有场特征和物质性^[9],旋涡在主流场中随流体对流和粘性扩散,从而在礁体的背流面后端形成尾迹流,产生速度很小,具有集鱼效果的背涡区。图 3 也清晰显示,背涡区内形成的是顺时针大旋涡,该旋涡的涡心(速度为零处)位于礁体顶部的棱线上方,且该旋涡的结构形态基本不随来流速度大小的改变而变化。

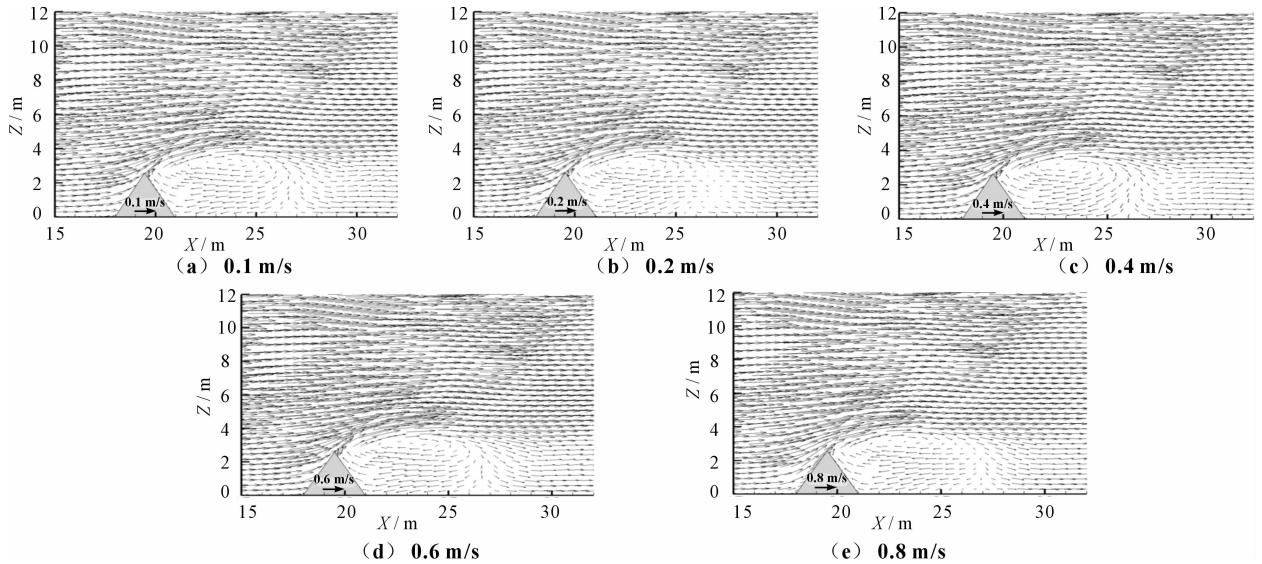


图 3 不同来流速度下 $y = 16.5$ m 平面上的速度矢量分布

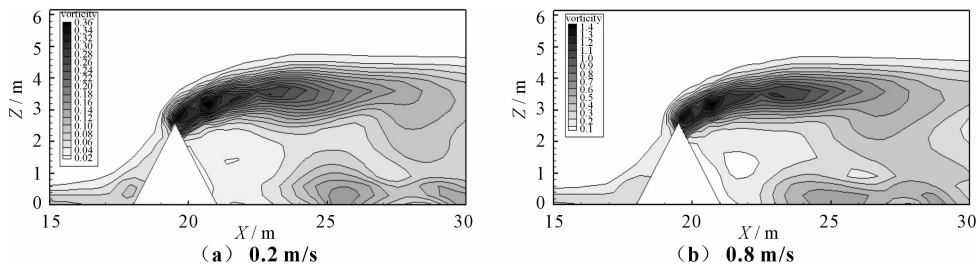


图 4 不同来流速度下 $y = 16.5$ m 平面上的涡量分布

通过图 3 分析,进一步得出:当来流速度为 0.1、0.2 m/s 时,背涡区长度为礁体高度的 2.31 倍;而当来流速度为 0.4、0.6 和 0.8 m/s 时,背涡区长度为礁体高度的 2.12 倍;5 种不同来流速度下的背涡区高度均约为礁体高度的 1.39 倍。

图 5 为 $y = 16.5$ m 截面上鱼礁周围的压力分布。可以看出,紧靠礁体迎流面处压力最高,而背涡区内压力显著降低,为负压区。这说明人工鱼礁投放后,由于礁体的阻水作用,引起礁体周围压力分布的变化,从而带来来流速度场的调整,进而形成上升流和尾涡区。

图 6 为 $z = 1.3$ m 平面上的速度矢量分布。图中可以明显看出,由于流动分离,在礁体背部形成由两个旋转方向相反的旋涡所组成的大旋涡区(背涡区),且旋涡结构的形状与来流大小相关。来流速

度为 0.1、0.6 和 0.8 m/s 下的各工况,其旋涡结构类似,而来流速度为 0.2、0.4 m/s 下的两工况旋涡结构类似。与方型人工鱼礁绕流相比,三棱柱背涡区内的双涡旋结构更加明显,这是由于三棱柱横截面的长宽比(0.5)显著小于方型人工鱼礁横截面的长宽比(1.0),因而为双涡结构在背流面后部形成提供了空间。从图 6 还可以进一步看出,虽然背涡区内的涡旋结构与来流速度大小相关,但背涡区的最大长度基本不随来流速度的变化而改变,其约为礁体该横截面宽度(3 m)的 2.7 倍,而背涡区的宽度均为礁体宽度(3 m)的 1.53 倍。

4 结 语

在 ANSYS FLUENT 平台上,模拟分析了 5 种不同来流速度(0.1、0.2、0.4、0.6 和 0.8 m/s)下三棱

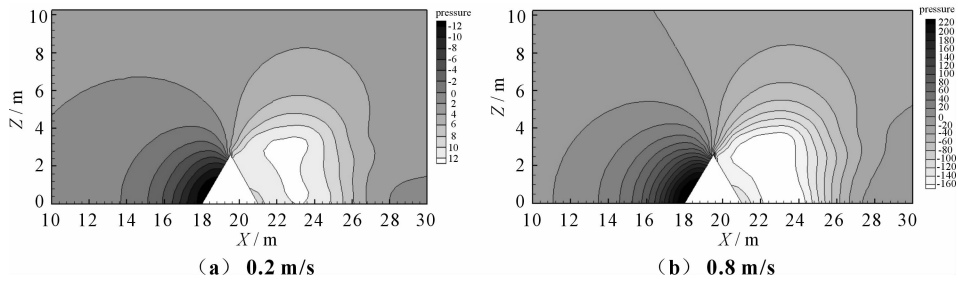


图5 不同来流速度下 $y = 16.5$ m 平面上的压力分布

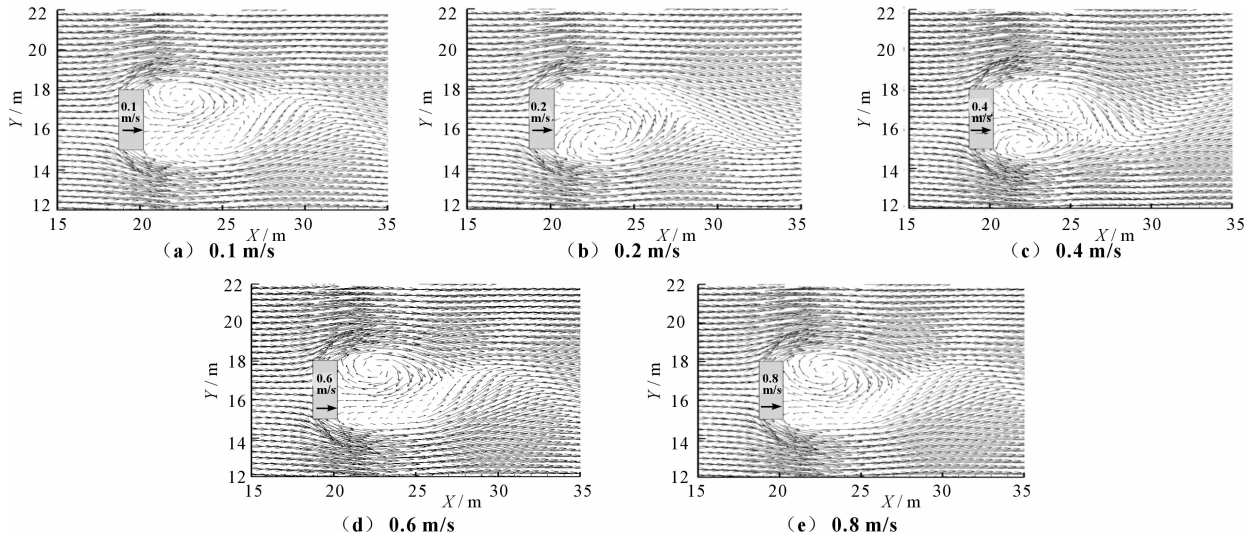


图6 不同来流速度下 $z = 1.3$ m 平面上的速度矢量分布

柱型人工鱼礁(各边长均为 3 m, 礁体高度为 2.6 m)周围的三维水流场。通过流场模拟结果分析,得到下述结论:①在过礁体中心的铅垂截面上,当水流逼近礁体迎流面时,水流转向抬升而形成上升流,上升流最大速度出现于棱柱三角形截面顶点的上游且紧靠该顶点;不同来流速度下,上升流最大速度与来流速度之比均约为 0.58 ~ 0.59,上升流平均速度与来流速度之比均约为 0.138 ~ 0.140,而上升流的最大高度均为礁体高度的 2.88 倍;由于流动剧烈分离,在礁体背流面后端形成速度很小的顺时针大旋涡(背涡区),该旋涡结构不随来流速度大小的改变而改变,且涡心位于礁体顶部棱线之上;5 种来流速度下的背涡区长度均约为礁高的 2.12 ~ 2.31 倍,而背涡区高度为礁体高度的 1.39 倍;紧贴礁体迎流面处压力最高,而背流面附近压力最低,为负压区。②在过礁体一半高度的水平截面上,由于流动分离,在礁体背水面后端形成由旋转方向相反的一对旋涡所组成的大旋涡区(背涡区),背涡区内的水流旋涡结构随来流速度大小而变,但背涡区的最大宽度在 5 种不同来流工况下均约为礁体宽度的 2.7 倍。

此外,还初步定性和定量分析了三棱柱型人工

鱼礁绕流与多孔方型、无孔方型人工鱼礁绕流的流场效应异同点。定性分析主要集中于流场中的旋涡结构形态,而定量分析主要侧重于上升流参数和背涡区尺度等。

参考文献:

- [1] 王磊,唐衍力,陈晓蕾,等. 混凝土船形鱼礁的礁体设计与沉降计算[J]. 中国海洋大学学报,2010,40(7):43-46.
- [2] 李珺,章守宇. 米字型人工鱼礁流场数值模拟与水槽实验的比较[J]. 水产学报,2010,34(10):1587-1593.
- [3] 崔勇,关长涛,万荣,等. 人工鱼礁流场效应的数值模拟与仿真研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(23):7393-7396.
- [4] 刘洪生,马翔,章守宇,等. 人工鱼礁流场风洞实验与数值模拟对比分析[J]. 中国水产科学,2009,16(3):365-371.
- [5] 张硕,孙满昌,陈勇. 不同高度混凝土模型礁上升流特性的定量研究[J]. 大连水产学院学报,2008,23(5):353-358.
- [6] 崔勇,关长涛,万荣,等. 布设间距对人工鱼礁流场效应影响的数值模拟[J]. 海洋湖沼通报,2011(2):59-65.
- [7] 黄远东,姜剑伟,赵树夫. 方型人工鱼礁周围水流运动的数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(3):1-3.
- [8] 黄远东,赵树夫,姜剑伟,等. 多孔方型人工鱼礁绕流的数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(5):15-18.
- [9] 吴文权. 旋涡的场特征和物质性——离散涡方法基础[J]. 工程热物理学报,1996,17(3):301-304.