

人工鱼礁开口比对流场效应影响的 三维数值模拟研究

黄远东, 付登枫, 何文荣

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘 要: 采用 CFD 技术, 模拟得到了开口立方体人工鱼礁绕流的三维水流场。通过速度场模拟结果分析, 揭示出了流场效应随开口比变化的规律: ①上升流最大速度与来流速度的比、上升流平均速度与来流速度的比、以及上升流最大高度与礁体高度的比均随开口比的增大而降低; ②背涡区的尺度随开口比的增大而显著降低, 当开口比为 0.1 和 0.2 时, 在礁体背流面后端形成尺度较大而速度很小的尾涡区, 而当开口比为 0.5 和 0.6 时背流面后端已无明显旋涡区。此外, 模拟结果也揭示出上升流特性参数和速度场分布图案几乎不受来流速度大小的影响。

关键词: 立方体人工鱼礁; 开口比, 上升流; 背涡; 数值仿真

中图分类号: S911

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0039-05

Three dimensional numerical simulation on influence of cut-opening ratio of artificial reef on flow effect

HUANG Yuandong, FU Dengfeng, HE Wenrong

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

Abstract: Three-dimensional water flow field of rectangular artificial reef under various cut-opening ratios was numerically simulated by using CFD technique. Through analyzing the simulated results, the paper revealed the change law of flow field effect to cut-opening ratio that: ① the ratio of the maximum and average velocity of upwelling current to the inflow velocity, the ratio of maximum upwelling height to reef height decrease with the increase of cut-opening ratio; ② the size of the wake vortex region is reduced with the increase of the cut-opening ration, a large wake vortex region with very small flow velocity is formed when the cut-opening ratios are 0.1 and 0.2, whereas no obvious wake vortex region are perceived when the cut-opening ratio is equal to 0.5 and 0.6. Moreover, the simulation results reveal that the parameters for upwelling current and the map of distribution for velocity field are hardly affected by the magnitude of inflow velocity.

Key words: square artificial reef; cut-opening ratio; upwelling current; wake vortex; numerical simulation

1 研究背景

人工鱼礁是人为投放到海域的构筑物, 其投放到海底后, 由于礁体的阻水作用, 将产生流场效应, 即在礁体的迎流面上方产生上升流, 而在礁体背流面后端形成尾涡流。上升流和尾涡流会促使海底营养物质的卷起和扩散, 有利于海底丰富的营养物质在礁体周围各水层中的分布, 从而改善鱼群觅食条件。人工鱼礁增殖渔业资源的生态效应主要是通过人工鱼礁的流场效应来实现^[1], 并且人工鱼礁流场效应也是鱼礁

水动力学性能的重要方面。正因如此, 人工鱼礁流场效应已得到了广泛关注, 不少学者对其进行了研究。这些研究所采用的技术手段包括风洞试验^[2]、水槽试验^[1,3-4]以及计算流体动力学 (CFD) 数值仿真等。特别是近年来, 随着计算机硬件的快速发展和商用 CFD 软件的不推广, CFD 模拟已成为探究人工鱼礁绕流问题^[5-8]的重要手段之一。

很多学者采用 CFD 仿真或物理模拟对单个礁体^[1,6,9]以及礁体组合^[1,10]条件下的绕流问题进行了研究, 并取得了可喜的成果。单个礁体绕流问题

收稿日期: 2014-03-11; 修回日期: 2014-04-21

基金项目: 上海市教委重点学科建设项目 (J50502)

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研究。

的研究表明礁体表面开口对流场效应具有显著影响,但是目前的研究大都在某一固定开口尺寸下模拟礁体的绕流问题,对于开口面积的变化对流场效应的影响尚缺乏系统分析。鉴于此,本研究将采用 CFD 技术,选取单个正方体人工鱼礁,仿真不同开口面积下正方体鱼礁的三维绕流流场,并进而分析揭示出开口比变化对人工鱼礁流场效应的影响规律。

2 鱼礁结构与模拟计算区域

如图 1 所示,采用边长为 3 m,壁厚为 0.3 m 的空心、无底、多孔正方体人工鱼礁。礁体的每个面上

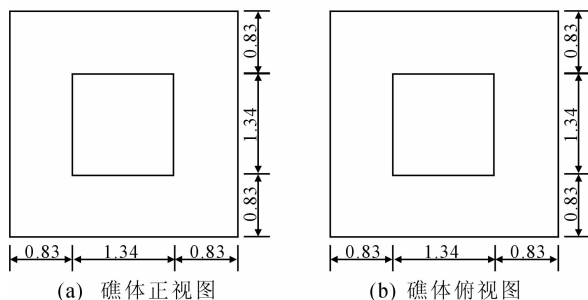


图 1 开口比为 0.2 的正方体人工鱼礁结构(尺寸的长度单位为 m)

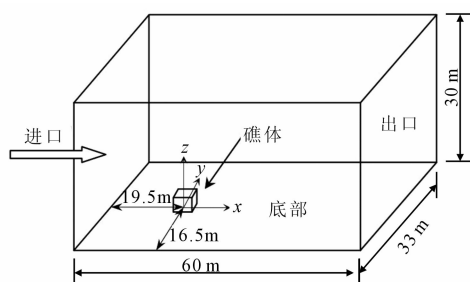


图 2 计算区域^[6]

3 数值模型

3.1 控制方程及湍流模型

鱼礁绕流为流体力学中典型的非定常、不稳定剧烈分离流动。

本研究仅探究鱼礁绕流的时间平均特性,因此模拟中选取定常、不可压的三维 N-S 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 RNGk- ε 模型^[10]。

3.2 网格生成

采用边长为 0.3 m 的六面体网格,整个计算区域的网格单元总数约为 2 200 000。

3.3 边界条件

进口采用均匀速度入口条件,来流速度大小(U)分别为 0.4 和 0.8 m/s;出口采用自由出流条件;计算区域的两侧面与顶面均采用对称边界条件;计算域底面以及鱼礁各壁面均采用无滑移条件。

3.4 数值算法

计算在 FLUENT 平台上完成。压力与速度耦合采用 SIMPLEC 算法,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,计算残差值取为 10^{-6} ,计算迭代的最大步数设为 4 000 步。

都设有一个正方形开口(5 个开口的大小一致,每个面上的开口中心与该面的中心重合)。开口比(φ)表示迎流面上开口的面积与迎流面面积之比。为探究不同开口比下的礁体周围流场特征,本研究选取鱼礁的开口比分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 等 6 种不同情形。仿真计算区域如图 2 所示。整个计算域的大小为 60 m × 33 m × 30 m。坐标原点位于礁体底部中心;自由来流方向为 x 轴正方向;礁体迎流面与计算域进口的距离为 6 倍礁体高度,礁体背流面与计算域出口的距离为 13 倍礁体高度,礁体顶面与计算域顶部的距离为 9 倍礁体高度,礁体中心与计算域两侧面的距离均为 5.5 倍礁体高度。

4 模拟结果与分析

对于 2 种不同来流速度大小(0.4 和 0.8 m/s),模拟得到了 6 种不同开口比下的正方体人工鱼礁绕流的三维水流场。在此基础上,分析揭示鱼礁开口比的变化对礁体周围流场效应的影响。

图 3 是来流速度为 0.4 m/s 时,不同开口比下的礁体绕流在 $y=0$ 截面(过礁体中心)上的速度矢量分布。从该图可以清晰看出,由于礁体的阻水作用,当水体绕鱼礁流动时,在礁体迎流面上方以及礁体顶面上方形成上升流,且上升流规模随开口比的增大而减弱。事实上,开口比越大,鱼礁的透水作用越强,而阻水作用越弱,从而导致上升流效应随开口比的增大而减弱。同样取水流的 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^[6,10]。

通过分析过礁体中心的铅垂线上的速度分布,得到当来流速度为 0.4 m/s 时,上升流最大速度($V_{\max}$)与来流速度(U)的比、上升流平均速度(V_a)与来流速度的比、上升流最大高度($H_{\max}$)与礁体高度(H)的比等上升流参数与礁体开口比的关系(见表 1)。从表 1 可以看出,由于孔隙的透水作用,在

变化趋势上,上升流最大速度与来流速度的比以及上升流平均速度与来流速度的比都随着开口比的增大而降低;而随着开口比的增大,上升流最大高度与礁体高度的比显著降低,例如当开口比为 0.1 时,上升流高度为礁体高度的 2.78 倍,而当开口比增大到 0.6 时,上升流高度降低到礁体高度的 1.47 倍。

从图 3 还可以清楚看出,礁体背流面后端的尾涡流随开口比的增大而明显减弱。当开口比为 0.1 和 0.2 时,在礁体背流面后端形成速度很小的大旋涡,而当开口比为 0.5 和 0.6 时,由于开口的透水作用几乎观察不到明显的背涡区。

图 4 是来流速度为 0.4 m/s 时,不同开口比下的礁体绕流在 $z = 1.5$ 截面上的速度矢量分布。从该图可以看出,当水体绕过礁体迎流面时,除形成上升流外(见图 3),还形成侧向流,且侧向流的规模随开口比的增加而显著减弱。

从图 4 也可以进一步看出,礁体背流面后端的背涡区长度和宽度也随开口比的增大而降低:当开

口比为 0.1 和 0.2 时,在礁体背流面后端形成区域较大而速度很小的尾涡区,而当开口比为 0.5 和 0.6 时,由于开口透水作用的加强,在礁体背流面后端已不存在明显的背涡区。

当来流速度为 0.8 m/s 时,不同开口比下的礁体绕流在 $y = 0$ 截面及 $z = 1.5$ 截面上的速度矢量分布形态与来流速度为 0.4 m/s 时的情况类似(以开口比为 0.1 和 0.6 为例,见图 5 和图 6)。同样通过分析过礁体中心的铅垂线上的速度分布,得到当来流速度为 0.8m/s 时,上升流最大速度与来流速度的比、上升流平均速度与来流速度的比、上升流最大高度与礁体高度的比同开口比的关系(见表 2)。对比表 1 和表 2,可以看出,上升流参数基本不受来流速度大小变化的影响。例如,在同一开口比下,两种不同来流速度时的上升流最大速度与来流速度的比、上升流平均速度与来流速度的比、上升流最大高度与礁体高度的比相差分别不超过 7.0%、12.5% 和 3.0%。

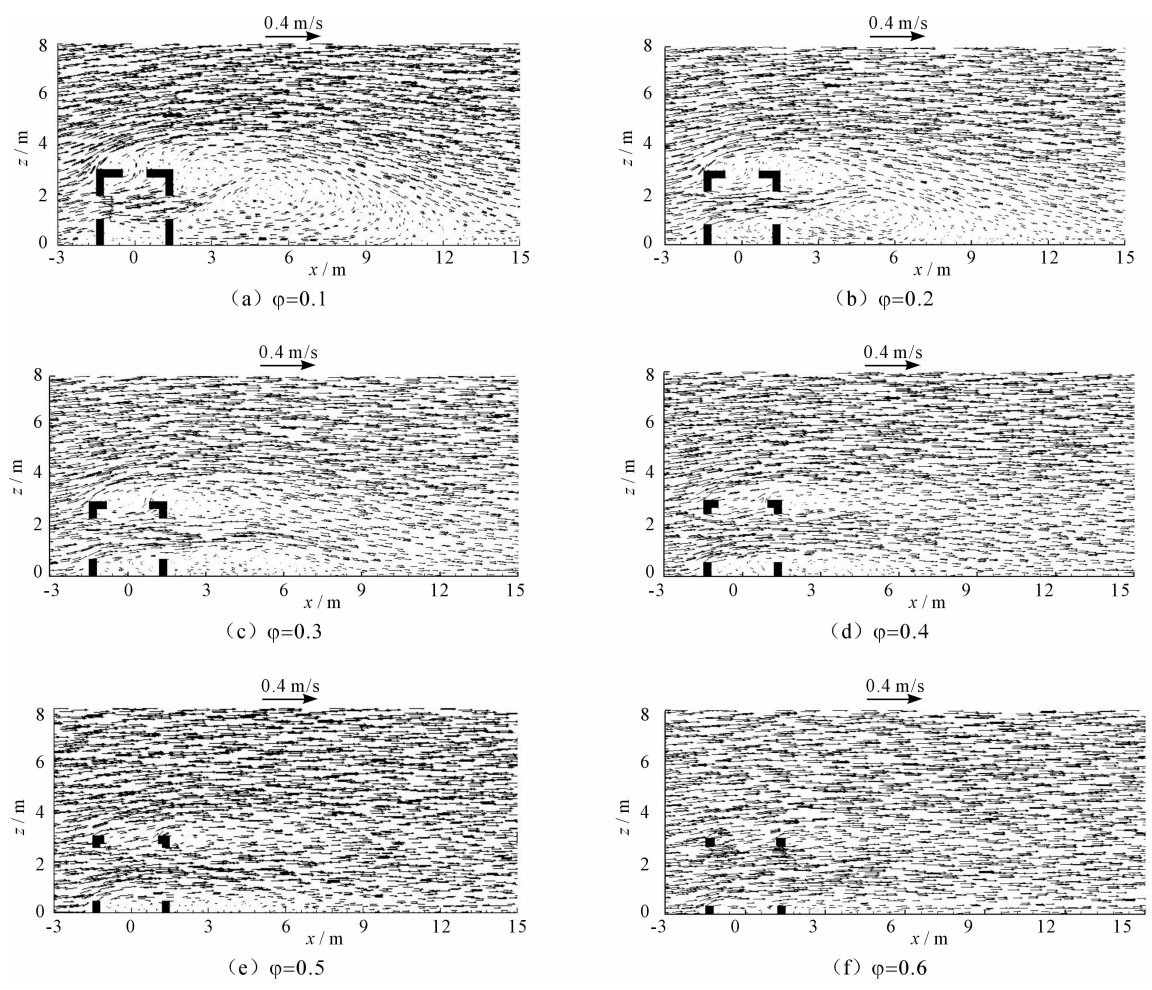


图 3 6 种不同开口比下 $y = 0$ m 平面上的速度矢量分布(来流速度为 0.4 m/s)

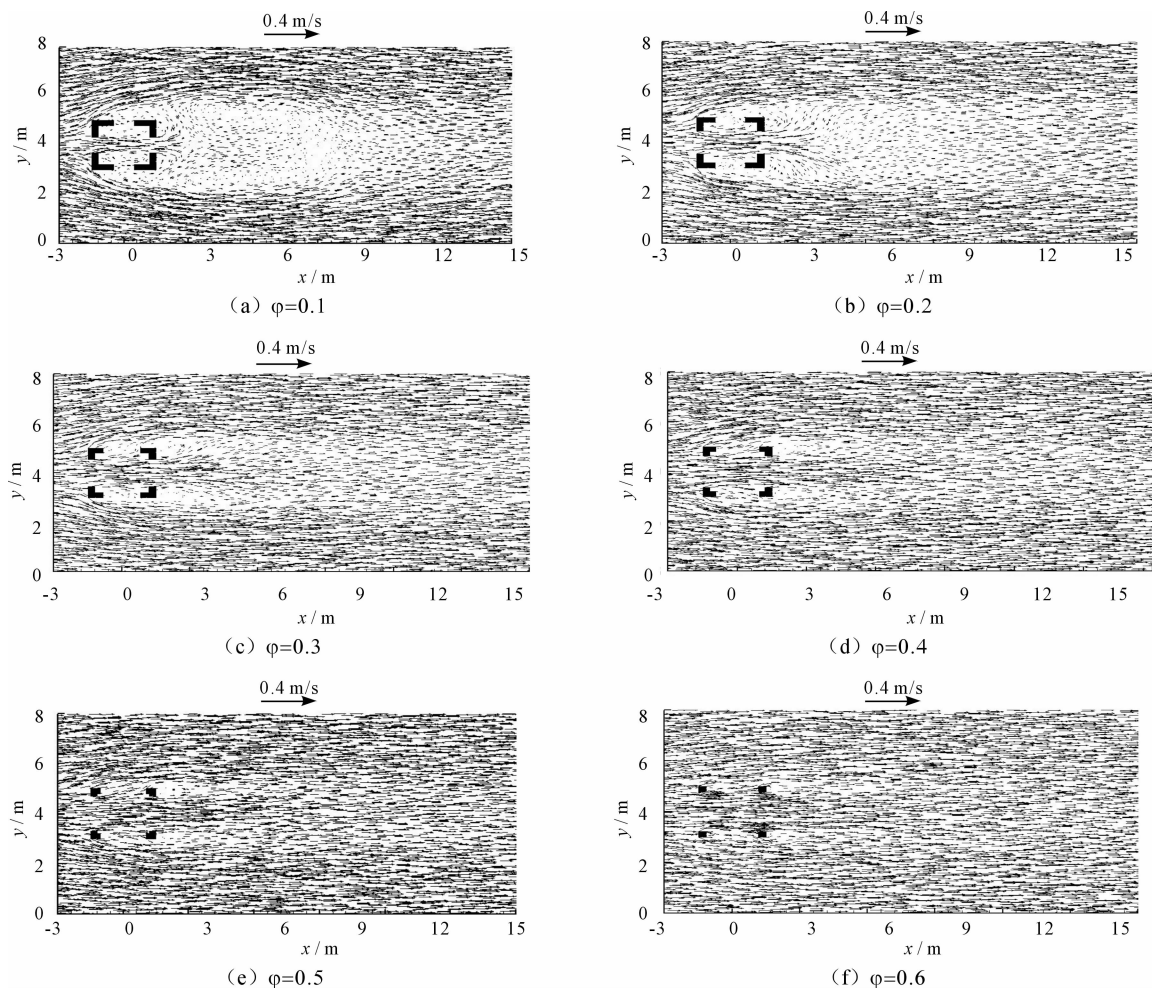


图4 6种不同开口比下 $z = 1.5\text{ m}$ 平面上的速度矢量分布(来流速度为 0.4 m/s)

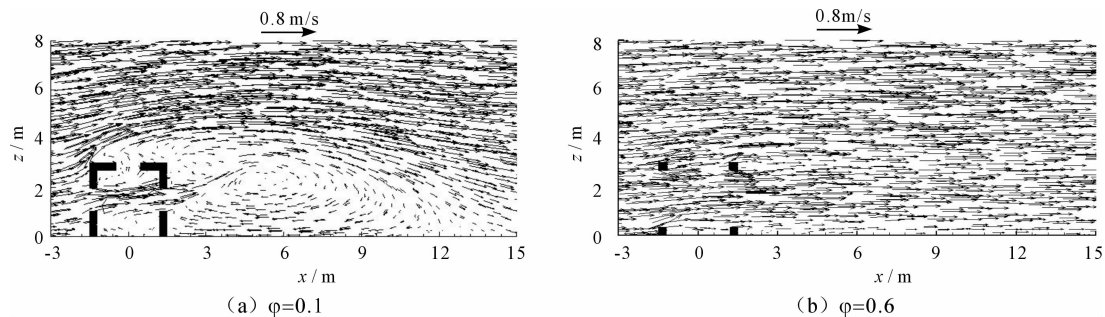


图5 不同开口比下 $y = 0\text{ m}$ 平面上的速度矢量分布(来流速度为 0.8 m/s)

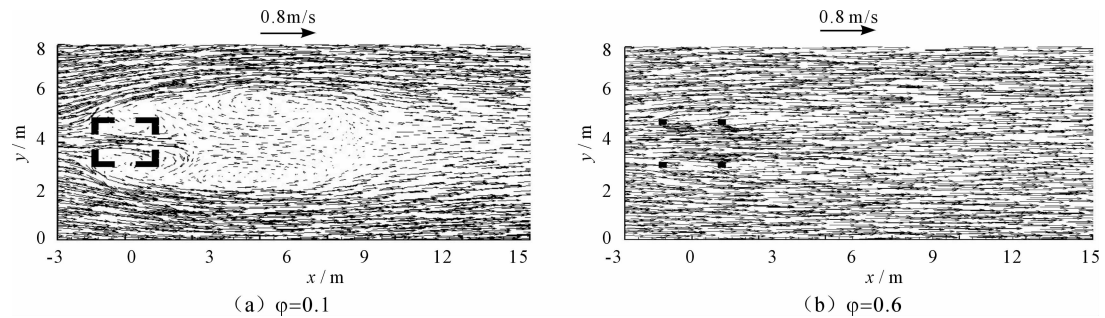


图6 不同开口比下 $z = 1.5\text{ m}$ 平面上的速度矢量分布(来流速度为 0.8 m/s)

表 1 不同开口比下的上升流特性参数
(来流速度为 0.4 m/s)

φ	$V_{\max}/U$	V_a/U	$H_{\max}/H$
0.1	0.26	0.12	2.78
0.2	0.19	0.10	2.43
0.3	0.15	0.10	2.21
0.4	0.15	0.08	1.98
0.5	0.12	0.08	1.77
0.6	0.10	0.06	1.47

表 2 不同开口比下的上升流特性参数
(来流速度为 0.8 m/s)

φ	$V_{\max}/U$	V_a/U	$H_{\max}/H$
0.1	0.26	0.12	2.84
0.2	0.20	0.10	2.46
0.3	0.15	0.10	2.21
0.4	0.16	0.09	1.98
0.5	0.12	0.08	1.82
0.6	0.10	0.06	1.47

5 结 语

采用 CFD 技术,数值仿真了无底、空心、多孔方型人工鱼礁(边长为 3 m)周围的三维水流场。模拟中考虑了 2 种不同来流速度(0.4 和 0.8 m/s)以及 6 种不同的鱼礁开口比(0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6)。通过速度场模拟结果分析,揭示出开口比对人工鱼礁的流场效应具有显著影响:①上升流最大速度与来流速度的比、上升流平均速度与来流速度的比,以及上升流的最大高度与礁体高度的比,均随开口比的增大而降低;②背涡区的尺度随开口比的增大而显著降

低,当开口比为 0.1 和 0.2 时,在礁体背流面后端形成尺度较大而速度很小的背涡流,而当开口比为 0.5 和 0.6 时背流面后端已无明显旋涡区生成。此外模拟结果也揭示出上升流特性参数和速度场分布图案几乎不受来流速度大小变化的影响。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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验证[J]. 中国水产科学,2009,16(3):365 – 371.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 吴建,拾兵,杨立鹏,等. 多孔方形鱼礁对水动力环境影响的试验研究[J]. 海洋湖沼通报,2011(2):147 – 152.

[10] 邓济通,黄远东,姜剑伟. 布设间距对三棱柱形人工鱼礁绕流影响的数值模拟[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):98 – 102 + 108.