

文章编号:1000-0615(2009)02-0229-08

人工鱼礁流场效应的模型实验

刘洪生¹, 马翔¹, 章守宇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:针对正方体、金字塔及三棱柱人工鱼礁模型,选取3个不同工况6 m/s、9 m/s和12 m/s,通过风洞实验研究不同类型人工鱼礁单体和不同组合正方体模型的流场效应。结果表明,模型迎流面和背流面分别产生上升流和背涡流,其规模随来流速度的增大而增大;相同来流速度下,同种模型空心模型的上升流和背涡流规模较实心模型小,空心模型背涡流回流速度随模型空隙率增大而减小;不同模型 z 方向的湍流强度均大于 x 方向。对于组合模型,随着来流速度的增大,中心点流速均逐渐增大;一定来流速度下,当模型间距在1~1.5倍模型尺度时,流场变化最大;且模型平行组合比垂直组合产生的流场效应更大。

关键词:人工鱼礁;流场;模型;上升流;背涡流

中图分类号:S 931

文献标识码:A

人工鱼礁是人为在水中设置的构造物,以改善、修复和优化水生生物栖息环境,为鱼类等生物提供索饵、繁殖和生长发育等场所,从而达到保护、增殖资源和提高渔获质量的目的^[1]。

目前国内外关于人工鱼礁的研究主要是围绕鱼礁的集鱼、避敌和产卵等效果以及鱼礁的生态效应来进行,研究手段上主要以现场调查分析为主,也进行一些水理模型实验^[2-10]。由于研究手段的限制,这些研究基本上是属于定性的,尤其是人工鱼礁对于生态环境变化的影响更是如此。如在鱼礁水域的三维流场研究方面(无论是现场实测还是水理实验)均无法弄清人工鱼礁产生上升流和背涡流的大小等,因而无法定量研究不同鱼礁尺寸、形状、结构以及不同鱼礁配置所产生的生态环境变化。事实上,正是人工鱼礁通过其流场效应所产生的上升流和背涡流,能促进上下层海水交换,加快营养物质循环速度,提高海域新生产力水平、改善海域生态环境,从而养护渔业资源^[11]。因此,研究不同尺寸、形状、结构的人工鱼礁所产生的上升流和背涡流规模,及其所引起的

其它生态环境要素(如营养盐等)变化之间的定量关系,将有助于提高人工鱼礁建设的效益。

本文针对不同人工鱼礁模型,通过风洞实验,定量探讨人工鱼礁单体与组合模型产生的上升流、背涡流规模和强度,以期从整体上把握人工鱼礁海域的流场效应,为今后定量评估人工鱼礁的生态效益提供依据。

1 材料与方法

1.1 模型类型及规格

模型类型分为正方体、金字塔及三棱柱3种(图1),每个类型模型又分为空心 and 实心两种。实心正方体和平顶金字塔模型为全封闭构造,其空心模型为框架构造,孔隙率^[12](材料中孔隙体积占材料总体积的比例)为0.7,金字塔模型顶面边长为底面边长的1/5;三棱柱模型为两端敞开的板式构造,其空心模型的迎流面和背流面镂有若干圆孔,孔隙率为0.5,而实心模型的迎流面和背流面均不透水。各模型规格均为30 cm×30 cm×30 cm,来流方向于图1中A指向B。

收稿日期:2007-11-07 修回日期:2008-02-26

资助项目:国家自然科学基金项目(30471332);国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA100303);上海市重点学科建设项目(T1101)

通讯作者:章守宇, Tel:13371935356, E-mail: syzhang@shou.edu.cn

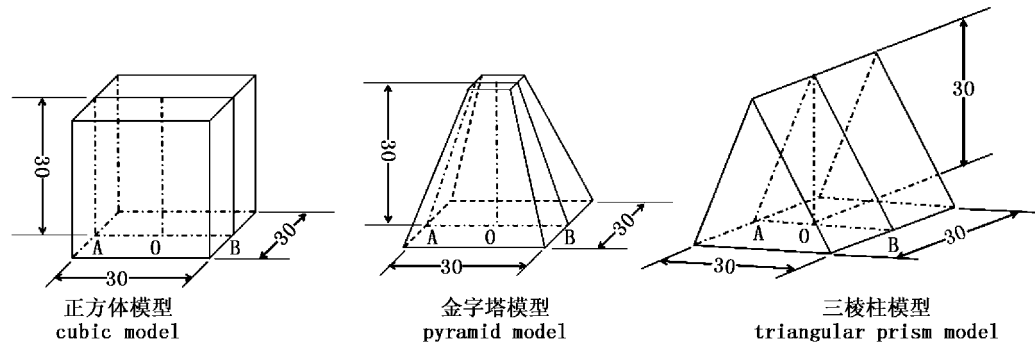


图1 模型类型及其规格

Fig.1 Types and specifications of the models

1.2 模型和测点布置

单体模型实验 单体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。

组合模型实验 组合模型和测点布局见图3。图中所示为模型中垂面剖面图,方块为模型。实验采用空心正方体模型, x 轴沿风洞纵向,并以气流方向为正, z 垂直向上。(1)~(4)模型中心连线沿 y 轴(简称垂直组合),其中(1)~(3)模型间距依次为0.5、1及1.5倍模型尺寸,测点在 y

方向上始终位于两模型正中间,而在 z 方向距风洞底面分别为15 cm、30 cm和45 cm;(4)模型间距为2倍模型尺寸,测点分布于模型连线的4等分点上,而在 z 方向分别为离风洞底面15 cm、30 cm和45 cm;实验(5)~(8)模型连线沿 x 轴(简称水平组合),测点分布于 x 轴,间距与实验(1)~(4)相同。

1.3 风洞、实验方法与工况条件

实验所用风洞总长为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。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。

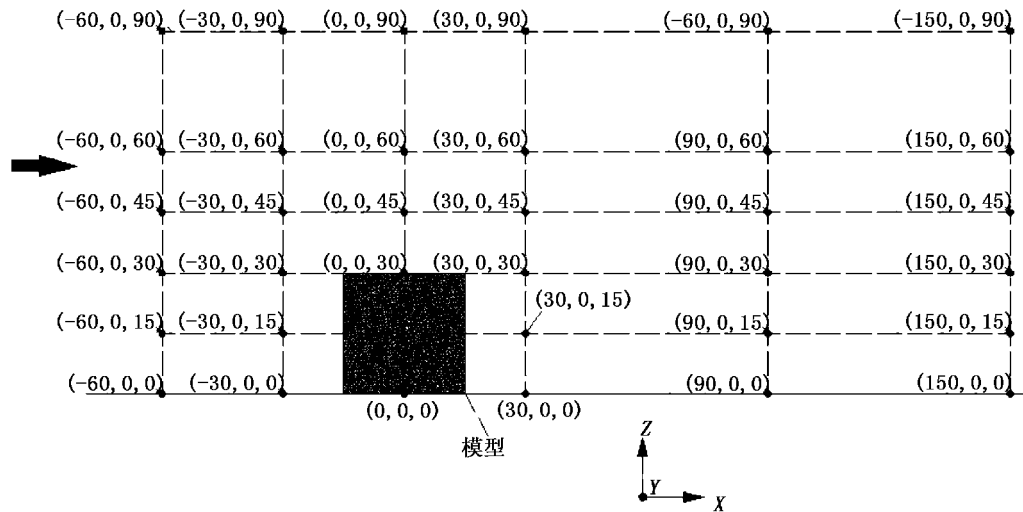


图2 单体模型和测点布局剖面图

Fig.2 The profiles of single model and distribution of measuring points

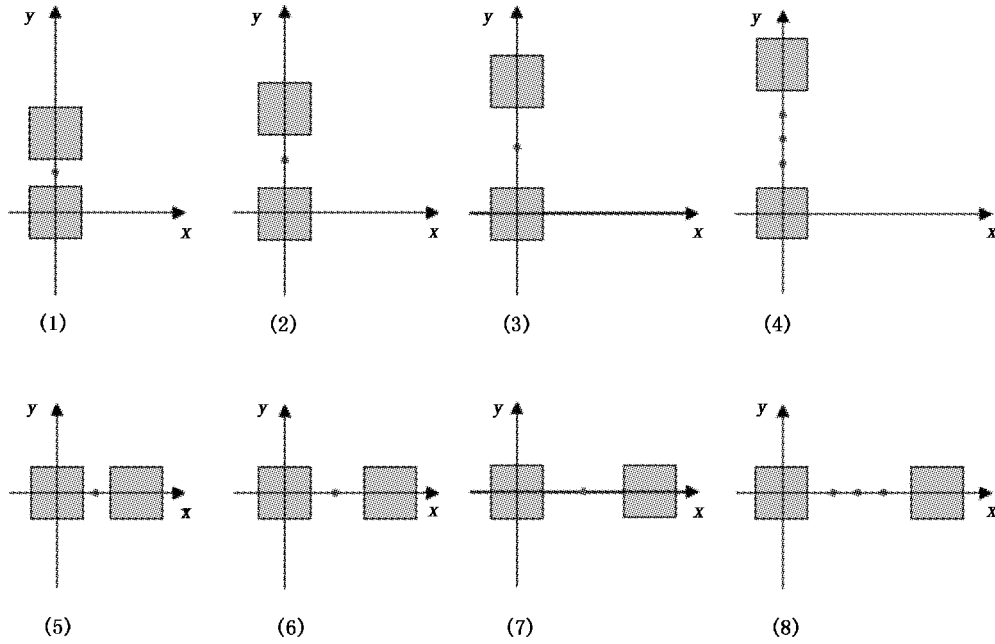


图3 组合实验模型和测点分布平面图

Fig. 3 The plans of compound models and distribution of survey stations

根据流体力学相似性原理:当两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。因此本实验中由无量纲数雷诺数 Re (Reynold's number)^[13] 相等推导出风洞工况风速计算公式(2)

$$Re = \frac{UL}{\gamma} \quad (1)$$

$$U_m = U_r \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{\gamma_a}{\gamma_w} \quad (2)$$

其中, U_m 和 U_r 分别为风洞工况风速和鱼礁海域海水流速, L_m 和 L_r 分别为鱼礁模型和实物的尺度, $\gamma_a \approx 1.57 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[14], 为空气运动粘性系数, 据叶安乐等^[15] 及现场海域海水运动特点, 海水运动湍流粘性系数取 $\gamma_w \approx 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。实验中各模型规格均为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, 模拟人工鱼礁实体的规格为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 结合人工鱼礁建设海域特征流速, 根据公式(2)选定风洞3个工况为 6 m/s 、 9 m/s 和 12 m/s , 依次相当于人工鱼礁建设海域海水流速 0.4 m/s 、 0.6 m/s 和 0.8 m/s 。

单体模型实验中用毕托管测出各测点的纵向流速 U (x 方向) 和垂向 (z) 流速 W , 同时采用热线/热膜风速测量仪连续观测人工鱼礁模型迎流面、正上方及背流面上部三个代表性测点: $(-30, 0, 30)$ 、 $(0, 0, 45)$ 及 $(30, 0, 60)$ 在 6 m/s 和 9 m/s 两

个工况速度下(由于条件限制, 12 m/s 工况速度未观测) U 和 W 瞬时速度。并根据公式(3)和公式(4)式计算平均速度和湍流强度:

$$\begin{cases} U = \bar{U} + U' \\ W = \bar{W} + W' \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} TU' = \sqrt{U'^2} \\ TW' = \sqrt{W'^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中, U 和 W 分别为 x 和 z 方向的瞬时速度, U' 和 W' 分别为 x 和 z 方向的脉动速度, TU' 和 TW' 分别为 x 和 z 方向的湍流强度。

组合模型实验用毕托管测出所有测点处沿来流方向的瞬时速度(即 x 方向流速)。

2 结果与讨论

2.1 上升流

在定常流海域投放人工鱼礁, 主要有两方面的流场作用, 即迎流面产生上升流, 背流面产生涡流。图4、图5和图6依次为正方体、金字塔及三棱柱空心模型和实心模型在3个工况流速下的流场分布, 工况速度由上而下依次为 6 m/s 、 9 m/s 及 12 m/s 。由图可见, 在相同工况速度下, 各种模型的上升流分布和规模基本相似, 上升流范围从模型迎流面前方的分离点(separation point)起, 通过模型上方向下游区延伸, 其水平和垂直跨

度随来流速度增大而逐渐增加,当来流速度从6 m/s 增加到9 m/s 再到12 m/s,上升流的垂直跨度分别约增加25%、50%。表1为不同模型在不同工况下的 z 方向上的最大和平均流速 W_{\max} 和 \bar{W} ,不同礁体产生的最大上升流流速为来流速度的1/3,平均上升流最大为来流速度的0.3;比较可知,随着流速的增大, W_{\max} 和 \bar{W} 也逐渐增大,因此,随来流速度的增大,上升流域的规模和强度均增大。同一类型模型的 W_{\max} 和 \bar{W} 对比,实心模型较空心模型的大,原因是空心模型迎流面受空隙渗流影响,削弱了模型上方的流管效应,因而上升流分布较实心模型的均匀,而强度有所减弱。

2.2 背涡流

背涡流形成于人工鱼礁模型的背流面,亦称“尾涡(wakes)”,其特征是在模型背流面下游海底附近形成回流区(recirculation)。根据图4、图5及图6可知,背涡流的影响范围最多可达礁体长度的2~3倍,广东的刘同渝也曾做过这方面的

研究^[16]。在相同工况速度下,同类型的空心模型与实心模型的背涡流表现出明显不同,空心模型背流面的渗流流出一定程度上抵消了背涡流的回流作用,也就是说回流区的交互作用,降低了回流区内的回流速度,最大回流速度较同类型的实心模型减少了近50%,导致背涡流规模减小;另外,回流区长度比(x/h , x 为回流区最远点与模型最右侧的水平距离, h 为模型高)和高度比(z/h , z 为回流区的垂直高度, h 为模型高),空心模型较同一类型实心模型减小了50%,这个结果与吕珍谋等^[17]的研究结果一致。不同类型模型的背涡流分布和规模差异较大,空心三棱柱模型孔隙率较小(约0.5),其背涡流的回流较强,空心正方体和金字塔模型孔隙率较大(约0.7),其背涡流的回流较弱,回流速度较空心三棱柱减少了近40%;对于实心模型,从图中可以看出背涡流的水平和垂直跨度大致为:三棱柱模型>金字塔模型>正方体模型。

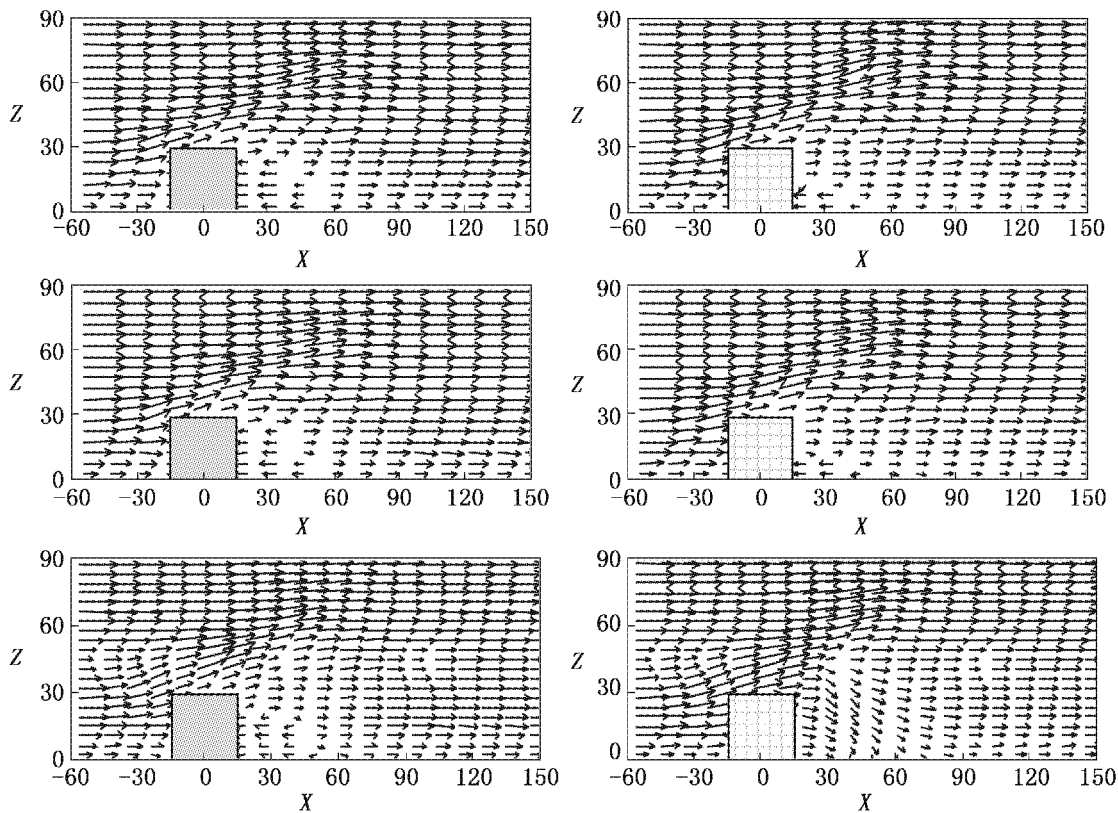


图4 正方体空心(右)和实心模型(左)流场

Fig.4 Flow fields of hollow model (right) solid model (left) of cube

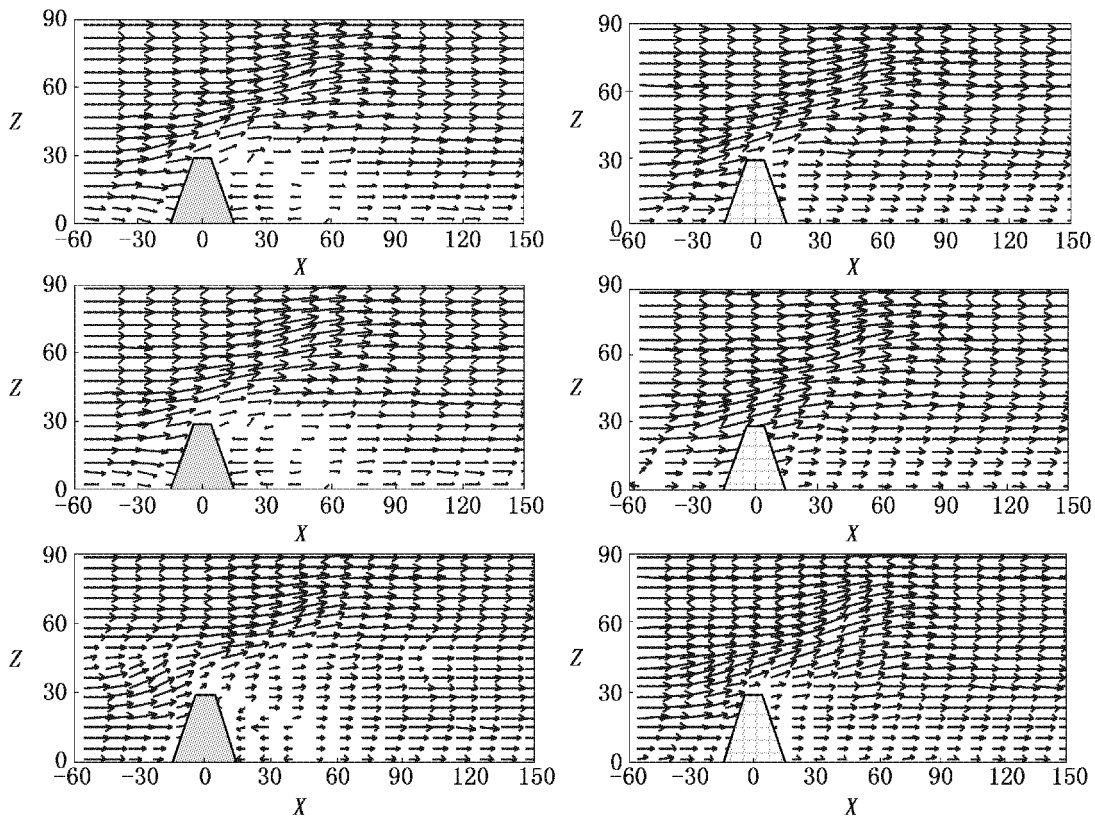


图5 金字塔形空心(右)和实心模型(左)流场
Fig.5 Flow fields of hollow model (right) solid model (left) of pyramid

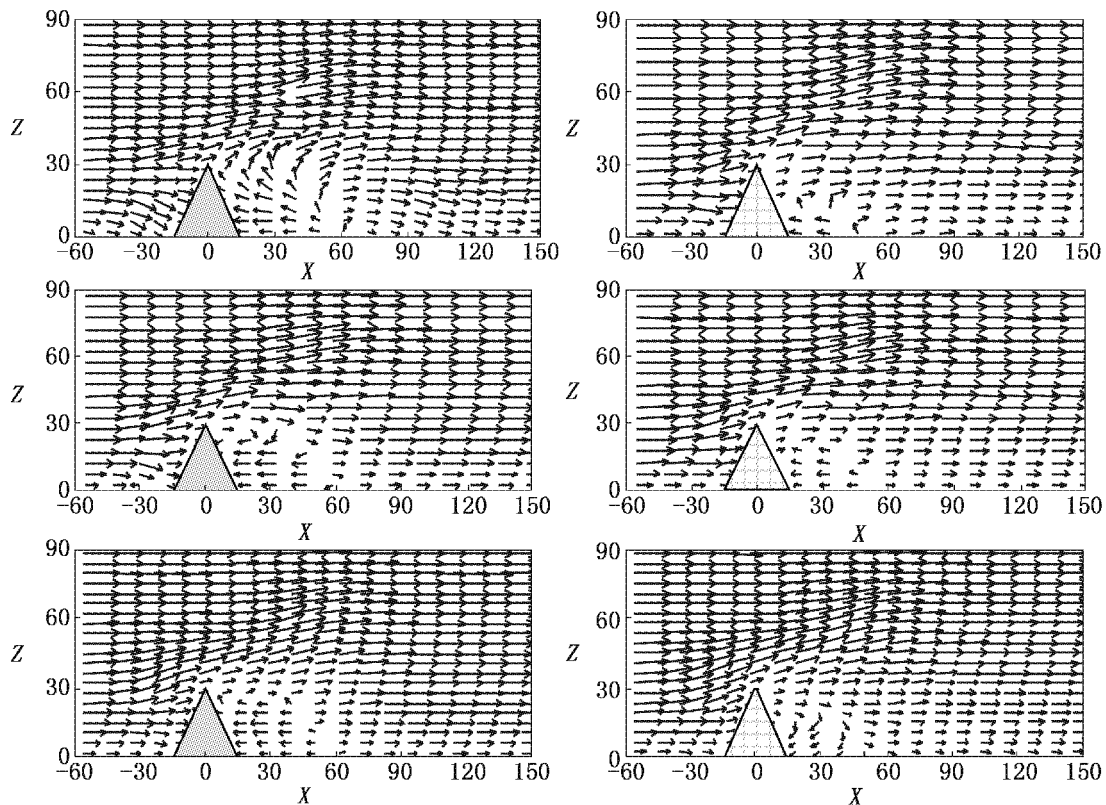


图6 三棱柱形空心(左)和实心模型(右)流场
Fig.6 Flow fields of hollow model (left) solid model (right) of triangular prism

2.3 湍流强度

根据实验结果,分别计算不同模型在不同来流条件下 x 和 z 方向的湍流强度。计算结果见表 2 所示,表中 ZK、ZS、JK、JS、SK 及 SS 依次代表正方体空心、正方体实心、金字塔空心、金字塔实心、三棱柱空心及三棱柱实心模型。由表可见,各

模型 z 方向的湍流强度(TW')均大于 x 方向的湍流强度(TU'),相同来流速度下,各点的平均 TW' 比平均 TU' 大一倍左右。工况速度由 6 m/s 增至 9 m/s 时,迎流面、正上方及背流面湍流强度依次增加 39%、17.2% 及 16.8%,因此,湍流强度均随工况速度增大而增大。

表 1 不同模型在不同流速下的 W_{\max} 和 \bar{W}

Tab.1 W_{\max} and \bar{W} of different models under different conditions

模型	model	W_{\max} (m/s)	\bar{W} (m/s)	模型	model	W_{\max} (m/s)	\bar{W} (m/s)
JK6		1.93	1.86	JS6		1.99	1.89
JK9		2.90	2.60	JS9		2.92	2.61
JK12		4.03	3.55	JS12		4.30	3.62
SK6		1.74	1.00	SS6		1.87	1.42
SK9		2.52	2.20	SS9		2.57	2.30
SK12		3.77	2.88	SS12		3.97	2.95
ZK6		1.90	1.68	ZS6		2.10	1.73
ZK9		2.72	2.37	ZS9		2.89	2.49
ZK12		3.14	2.99	ZS12		4.30	3.32

表 2 人工鱼礁不同部位湍流强度比较

Tab.2 Comparison of turbulence intensity on different parts of artificial reefs

模型	点 point(-30,0,30)				点 point(0,0,45)				点 point(30,0,60)			
	6 m/s		9 m/s		6 m/s		9 m/s		6 m/s		9 m/s	
model	TU' (%)	TW' (%)	TU' (%)	TW' (%)	TU' (%)	TW' (%)	TU' (%)	TW' (%)	TU' (%)	TW' (%)	TU' (%)	TW' (%)
ZK	4.9	11.7	5.1	13.5	3.7	12.7	4.7	13.1	4.6	8.0	5.0	14.4
ZS	6.8	12.0	6.5	14.5	4.7	14.3	5.1	12.0	3.4	14.7	4.2	15.8
JK	5.4	12.7	6.3	15.5	4.3	11.7	5.1	15.3	4.0	8.7	4.9	8.1
JS	4.5	12.9	8.9	10.7	4.5	13.2	5.4	14.3	5.1	10.7	5.4	14.6
SK	4.4	15.3	7.0	14.1	4.0	14.8	4.5	14.8	4.0	11.6	4.6	12.4
SS	4.1	13.9	6.6	15.9	3.6	14.9	4.2	14.9	3.6	14.4	4.5	14.7

2.4 组合效应

根据实验数据,作出不同测速点的流速图,图 7 为在不同模型间距下模型中心点沿来流方向的流速,其中图 7-a ~ c) 为模型垂直组合,图 7-d ~ f) 为模型平行组合,工况速度由上而下依次为 6 m/s、9 m/s 及 12 m/s。

对于垂直组合,当模型间距一定时,模型中心点流速随观测点高度增加而增大;当测点高度一定时,各工况下中心点速度随模型间距增大而先增后减,最大值出现于 1 ~ 1.5 倍间距处,表明此时模型协同效应最强。

对于平行组合,在 $z=45$ cm 时各工况下中心点速度接近来流速度,与模型间距关系不大,也就是说 $z>45$ 的位置的流场已经不受鱼礁作用的影响;当 $z=15$ cm 和 $z=30$ cm 时,由于模型绕流作

用,中心点流速远小于来流速度,并在 1 ~ 1.5 倍模型间距时出现明显回流现象,表明此时模型协同效应最强。实验表明通过模型组合尤其模型平行组合产生的湍流更强、范围更大,从而形成的生态效应会更好。因此在实际应用中,可以并行排放一系列鱼礁,这样会产生一系列涡流叠加,从而增加人工鱼礁的生态效应。

3 结论

根据风洞实验结果,通过分析不同工况下 2 种单体模型,以及正方体组合模型周围速度场的测试结果,得到以下结论:

(1) 对于同种模型而言,无论空心模型还是实心模型,随着流速的增大,上升流的规模和强度均逐渐增大;相同来流速度下空心模型上升流分

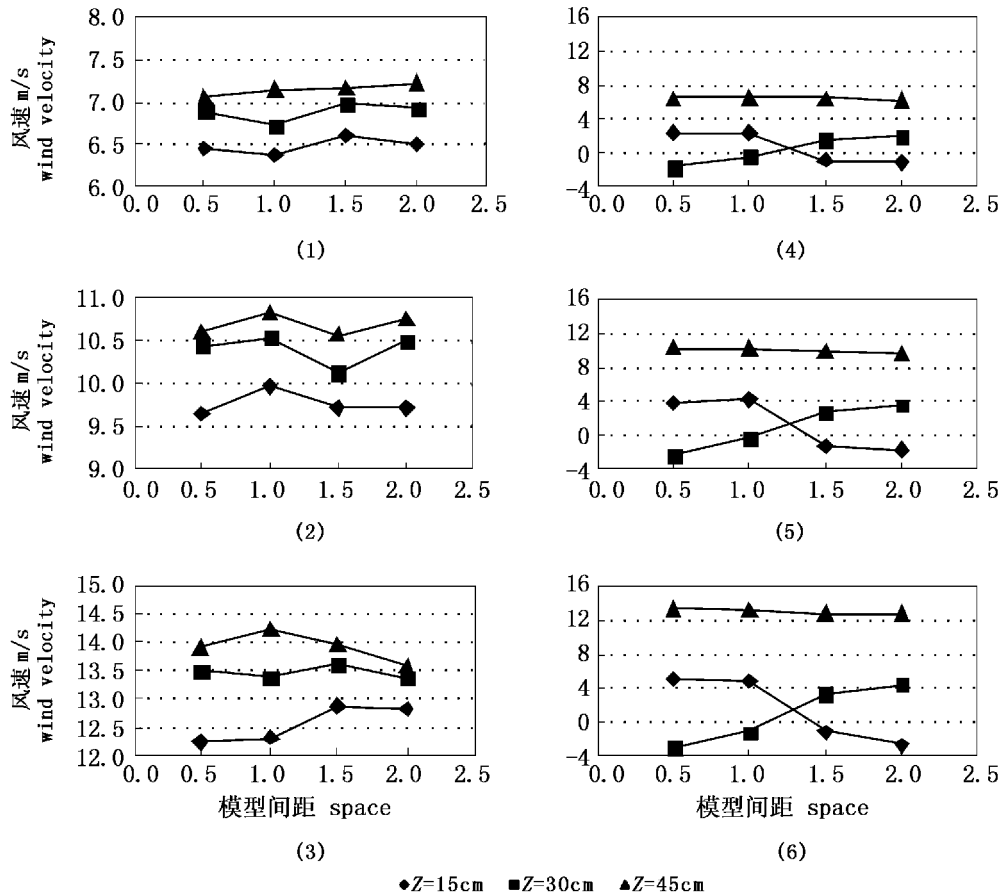


图7 不同模型间距时模型中心点流速分布

Fig.7 The distribution of flow velocity on center point under different spacings

布较实心模型的均匀,而强度略有减弱;不同礁体产生的最大上升流流速为来流速度的 $1/3$,平均上升流最大为来流速度的 0.3 。

(2)在相同来流速度下,相同种类的空心模型与比实心模型的背涡流规模小,最大回流速度减少了近 50% ,回流区长度比和高度比减小了 50% ;对于空心模型,由于空隙率的影响在相同来流速度下,正方体和金字塔模型回流速度较三棱柱减少了近 40% ;对于实心模型,背涡流的水平和垂直跨度为:三棱柱模型 > 金字塔模型 > 正方体模型。

(3)各模型湍流强度均随工况速度增大而增大;相同来流速度下, z 方向的湍流强度比 x 方向的湍流强度大一倍左右。

(4)对于组合模型,当模型间距一定时,模型中心点流速随观测点高度增加而增大;当测点高度一定时, $1 \sim 1.5$ 模型间距处流场变化最大,模型协同效应最强。

本文通过风洞实验对人工鱼礁流场效应作了初步研究,尽管实验材料、方法和数据处理等方面可能还存在着一些问题,但还是发现了一些规律。今后的课题将在此基础上对不同海域、不同水深、不同来流速度、不同礁体模型以及多个模型不同组合等情况下,结合数学模型定量研究鱼礁对流场的流态、流速影响,结合现场调查数据评估鱼礁的生态效应。

参考文献:

- [1] 王波,武建平,高峻,等.关于青岛建设人工鱼礁改善近海生态和渔业环境的探讨[J].海岸工程,2004,23(4):66-73.
- [2] 陈勇,于长清,张国胜,等.人工鱼礁的环境功能与集鱼效果[J].大连水产学院学报,2002,17(1):64-69.
- [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] 张 虎. 海州湾人工鱼礁养护渔业资源效果初探[J]. 海洋渔业, 2005, 27(1): 38-42.
- [5] 吴 静. 人工鱼礁集鱼效果的初步研究[D]. 上海: 上海水产大学, 2005.
- [6] 章守宇. 海州湾人工鱼礁海域生态环境的变化[J]. 水产学报, 2006, 30(4): 475-482.
- [7] Miguel N S, Carlos C M. The Olhao artificial reef system (south Portugal): Fish assemblages and fishing yield[J]. Fisheries Research, 1997, (30): 33-41.
- [8] Shai E, Amir P, Oded B S, *et al.* Effects of artificial reefs on fish grazing [J]. Marine Environmental Research, 2006, (61): 110-119.
- [9] William S Jr. Artificial reef evaluation[M]. USA: CRC Press, 2002: 83-86.
- [10] Shao K, Chen L. Evaluating the effectiveness of the coal ash artificial reefs at Wan-Li, northern of Taiwan [J]. Journal of the Fisheries Society of Taiwan, 1992, 19(4): 239-250.
- [11] 林 军, 章守宇. 人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究进展[J]. 海洋渔业, 2006, 18(3): 257-260.
- [12] 苏达根. 土木工程材料[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [13] 黄卫星, 陈文梅. 工程流体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 144.
- [14] 张也影. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 28.
- [15] 叶安乐, 李凤歧. 物理海洋学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992: 233.
- [16] 刘同渝. 人工鱼礁的流态效应[J]. 水产科技, 2003, 6: 43-44.
- [17] 吕珍谋, 赖泉基, 李明静, 等. 透水与非透水结构物附近流场比较与分析[J]. 台湾水利, 2005, 53(4): 46-52.

Research on model experiments of effects of artificial reefs on flow field

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

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. The South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Effects of artificial reefs (AR) and their compounds on flow field have been studied through wind tunnel experiments under conditions of 6 m/s, 9 m/s and 12 m/s, on such single AR models with different shapes of cube, pyramid and triangular prism. As conclusions, it was found that the ranges of upwelling and wake increased with the increase of water speed; the distribution and range of upwelling and wake of the hollow models were smaller than the solid models under the same water speed, the reflux velocity of hollow models decreased with the increase of porosity of AR models; the turbulence intensity in z direction was stronger than x direction of all models. For compound cubic models, the speed of the center points increased with the increase of water speed, and the flow field has the biggest change when the distance between 1 to 1.5 times of model size at the same water speed; effects on flow field of the parallel compound models were bigger than the vertical compound models.

Key words: artificial reefs; flow field; models; upwelling; wakes