

方型对角中连式礁体与方型对角板隔式礁体的稳定性

陶峰^{1,2}, 唐振朝¹, 陈丕茂¹, 贾晓平¹

(1. 中国水产科学研究院 南海水产研究所, 农业部南海渔业资源环境重点野外科学观测试验站, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300; 2. 上海海洋大学 海洋学院, 上海 201306)

摘要: 根据深圳杨梅坑人工鱼礁区海域的波流、水深等状况, 对方型角板中连式礁体和方型对角板隔式礁体进行了不同海流速度下的受力、抗翻滚系数及抗滑移系数的计算。计算结果表明, 2种方型礁体所受到的水流作用力随着水流速度的增加而增大, 方型对角中连式礁体发生滑移的临界受力为25 123 N, 发生翻滚的临界力矩为91 356 N·m; 方型对角板隔式礁体发生滑移的临界受力为46 801 N, 发生翻滚的临界力矩为170 186 N·m。研究结果显示, 2种礁体的抗滑移、抗翻滚性能均较好, 不会因为波流状况的突变而导致滑移、翻滚, 投放后能长期维持其功能稳定不变。[中国水产科学, 2009, 16(5): 773–780]

关键词: 人工鱼礁; 礁体稳定性; 深圳杨梅坑

中图分类号: S95

文献标识码: A

文章编号: 1005–8737–(2009)05–0773–08

人工鱼礁是人们在海中设置的构造物, 其目的是改善海洋环境, 为鱼类等游动生物提供繁殖、索饵、栖息等生息场所, 以达到保护、增殖渔业资源和提高渔获量的目的。利用人工鱼礁来改善渔场生态环境, 已成为目前世界沿海各国保护海洋渔业生产和渔业生态环境的一项战略性措施^[1–5]。

人工鱼礁投放后, 对其稳定性的基本要求是: 在海水中长期保持原有的形状, 不因波浪、潮流的冲击而损坏、移动, 使用年限长。有学者认为投放后的鱼礁在大风浪等恶劣条件下应不发生明显的移位或倾倒, 人工鱼礁的寿命应达到20年以上^[6–8]。关于人工鱼礁稳定性的研究可分为3个方面, 即化学稳定性、物理稳定性和生态稳定性。在大的时间尺度上, 海域的物理过程能深刻影响其中的化学过程和生物过程^[9–10], 而礁体的生态稳定性和化学稳定性又是影响鱼礁生物诱集和增殖功能的主要因素。国内学者在人工鱼礁生物效应方面已经开展了较多研究^[11–13], 但在人工鱼礁物理稳定性方面的定量研究相对较少^[14]。

杨梅坑人工鱼礁区位于深圳市龙岗区大亚湾海域, 建设面积2.65 km², 已投放4 m×4 m的10种不同类型礁体2 202个。本实验以深圳杨梅坑人工鱼礁区的实际波流情况为研究条件, 根据水动力学理论, 对方型对角中连式礁和方型对角板隔式礁进行力学计算和稳定性判定, 以期为人造鱼礁的建设和管理提供参考依据。

1 计算对象

为了更好地优化礁型, 本实验选取深圳杨梅坑已投放的2种方型礁体进行稳定性计算, 图1和图2为礁体构造图和迎流面视图, 表1为礁体物理参数。

2 计算方法

2.1 礁体在海水中流体作用力的计算

日本学者中村充^[15]对人工鱼礁礁体在波浪和潮流的共同作用下的流速及作用力进行了研究, 认为流速 u 是潮流速度 u_0 与波浪速度 u_1 的合成, 其计算公式如下:

收稿日期: 2009–03–13; 修订日期: 2009–05–12.

基金项目: 国家863计划项目(2006AA100303); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2007ZD03, 2007TS10和2007TS22).

作者简介: 陶峰(1983–), 硕士研究生, 研究方向为渔业资源. E-mail: ddatf@163.com

通讯作者: 贾晓平, 研究员, 从事海洋渔业生态环境与渔业资源等方面研究. E-mail: jiaxiaoping53@163.com

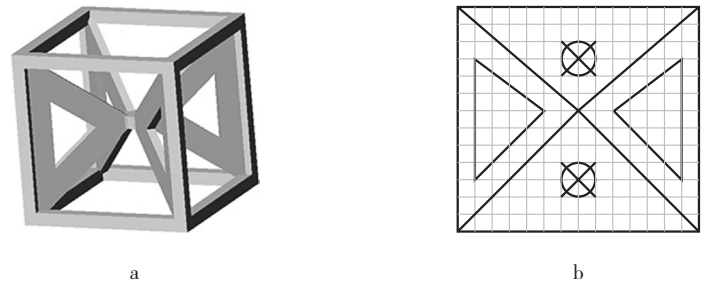


图1 方型对角中连式礁体构造图(a)与迎流面图(b)

Fig. 1 Cube-diagonal plate crossing reef's structural diagram (a) and incident face (b)

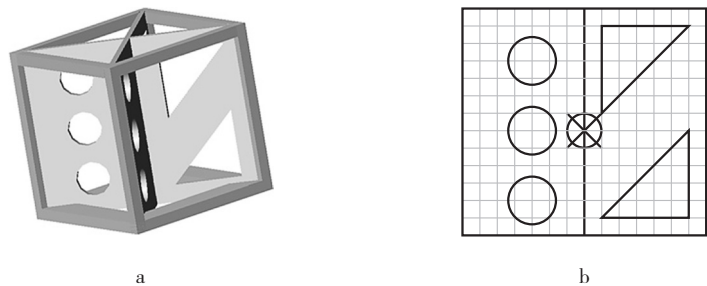


图2 方型对角板隔式礁体构造(a)和迎流面图(b)

Fig. 2 Cube-diagonal plate separating reef's structural diagram (a) and its incident face (b)

表1 礁体物理参数

Tab. 1 Physical parameters of reefs

参数 Parameter	方型对角中连式礁体 Cube-diagonal plate crossing reef	方型对角板隔式礁体 Cube-diagonal plate separating reef
尺寸 Size	4 m×4 m×4 m	4 m×4 m×4 m
实体体积/m ³ Real volume	3.16	5.88
迎流面积/m ² Incident area of the artificial reef	7.66	12.21
礁体质量/t Weight	7.9	14.71

$$u=u_0+u_1=u_0+u_m\sin\theta$$
 (1)

式中, u_m 为波幅(m/s); θ 为波向角; u_0 为潮流速度(m/s)。

$$u_m=\frac{\pi H}{T}\frac{\cosh(2\pi D/L)}{\sinh(2\pi h/L)}$$
 (2)

式中, H 为波高, h 为礁区水深, L 为波长, 通过 $L=(gh)^{1/2}T$ 来计算^[16], D 为鱼礁顶部至海底的高度(m), T 为波浪周期。 $\cosh$ 、 $\sinh$ 分别为双曲余弦函数、双曲正弦函数。

人工鱼礁礁体在流速 u 下的流体作用力 F 可分为拖拽力和附加质量力2部分^[17], 在数学形式上表示

成流速与流速导数的函数, 具体计算公式为:

$$F=\frac{1}{2}\rho C_d Au^2+C_m\rho V\frac{\partial u}{\partial t}$$
 (3)

式中, A 为礁体迎流面积(m²); V 为礁体体积(m³), C_d 为阻力系数, C_m 为附加质量力系数; ρ 为海水密度。将式(1)及(2)代入(3), 经求导运算可得:

$$F=C_d\frac{1}{2}\rho A(u_0+u_m\sin\theta)^2-\frac{2\pi C_m V\rho u_m}{T}\cos\theta$$
 (4)

令

$$F_d=C_d\frac{1}{2}\rho Au_m^2$$
 (5)

$$\alpha=\frac{u_0}{u_m} \tag{6}$$

$$S=\frac{M_1}{M_2}=\frac{(Wg-F_0)l_1}{F_{\max}\cdot l_{\max}}>1 \tag{10}$$

$$F_m=\frac{2\pi C_m V \rho u_m}{T} \tag{7}$$

式(4)简化为:

$$F=F_d(\alpha+\sin\theta)^2-F_m\cos\theta \tag{8}$$

式(8)为计算礁体作用力的通用公式。对于给定的礁体尺寸和指定海域的波、流状况,即可计算确定 F_d 、 F_m 、 α 。 F 只随波向角 θ 的变化而变化。 F 取得最大值,须满足 $\frac{dF}{d\theta}=0, \frac{d^2F}{d^2\theta}<0$ 。

2.2 鱼礁不产生滑动的条件

郭维东等^[18]认为礁体最大静摩擦力需大于流体的作用力,才能保证礁体不发生滑动,即满足

$$S=\frac{(Wg-F_0)\mu}{F_{\max}}>1 \tag{9}$$

式中, W 为鱼礁自重, F_0 为礁体所受浮力, μ 为摩擦系数, S 表示抗滑移系数。

2.3 鱼礁不产生翻滚的条件

吴子岳等^[19]在对十字型礁体的研究中发现,礁体在波流作用下不翻滚的条件为礁体的重力和浮力的合力矩 M_1 大于波流最大作用力矩 M_2 。由于礁体的内腔结构一般都较为复杂,难以准确求出 M_2 值。为简化计算,一般将波流最大力矩的计算简化为 $M_2=F_{\max}\cdot l_{\max}$ 。

式中, R 为抗翻滚系数, l_1 表示竖直方向的力臂, $l_{\max}$ 表示水平方向的最大力臂, F_0 表示礁体的浮力。

3 结果与分析

3.1 计算条件

深圳杨梅坑人工鱼礁区水深 $h=15$ m,海水密度 $\rho=1\,025\text{ kg/m}^3$ ^[20],年平均波高 $H=0.825$ m,平均周期 $T=5.78$ s,正常的潮流速度通常在 $4\sim 36$ cm/s,台风时的最大波高 $H_{\max}=4.6$ m,最大周期 $T_{\max}=11.1$ s,底层海流速度 $u=0.39$ m/s^[16-18]。

计算中参考吴子岳等^[19]和史红卫等^[21]的研究,阻力系数 C_d 取值为1.25,附加质量系数 C_m 取值为1;抗滑移、抗翻滚的安全系数取值为1,鱼礁与海床间的摩擦系数 μ 参考了南海水产研究所模型试验的结果,取值为0.55^[6,22]。

3.2 计算结果

3.2.1 礁体的水流阻力 根据深圳杨梅坑人工鱼礁区的水文特征计算得到波长 L 为70.1 m,共选取9个流速值进行礁体受力比较。

首先计算得到方型对角中连式礁体的 u_m 为0.267 m/s, F_d 为349.83 N, F_m 为938.7 N;方型对角板隔式礁体的 u_m 为0.267 m/s, F_d 为557.62 N, F_m 为1 748.41 N。将各参数代入式(8),可计算出波向角 θ 的正弦值、余弦值及礁体在不同波流状况下所受最大作用力 $F_{\max}$ (表2)。

表2 不同流速下礁体所受最大阻力
Tab. 2 Maximum force of artificial reef under different current velocities

流速/(m·s ⁻¹) u	方型对角中连式礁体 Cube-diagonal plate crossing reef			方型对角板隔式礁体 Cube-diagonal plate separating reef		
	$\sin\theta$	$\cos\theta$	$F_{\max}/\text{N}$	$\sin\theta$	$\cos\theta$	$F_{\max}/\text{N}$
0.04	0.316	− 0.949	967.4	0.239	− 0.971	1782.2
0.08	0.491	− 0.871	1037.4	0.418	− 0.908	1875.8
0.12	0.599	− 0.801	1137.3	0.533	− 0.846	2018.1
0.16	0.672	− 0.741	1261.9	0.614	− 0.789	2201.9
0.20	0.725	− 0.689	1427.0	0.676	− 0.737	2422.4
0.24	0.765	− 0.644	1575.1	0.719	− 0.696	2676.9
0.28	0.797	− 0.605	1761.0	0.752	− 0.659	2963.3
0.32	0.820	− 0.572	1965.2	0.784	− 0.620	3280.3
0.36	0.842	− 0.539	2187.9	0.809	− 0.589	3627.1

礁体受力随着水流速度的变化而改变,同时礁体结构的差异导致其所受水平阻力变化的幅度不同。本研究对2种礁体所受阻力随流速变化而增加的幅度进行了计算与分析,结果如图3所示。随着流

速增幅的增加,2种礁体最大流体作用阻力的增幅也相应增大。在同一流速增幅下,方型对角板隔式礁体的阻力增幅比方型对角中连式礁体更大。

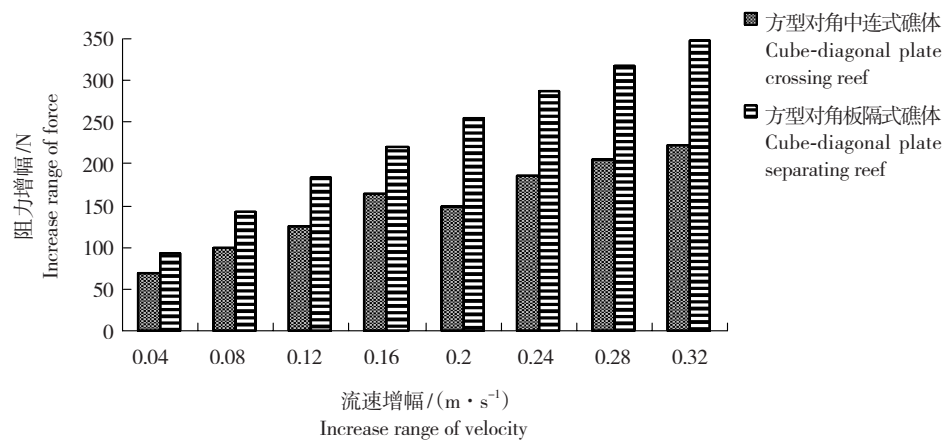


图3 2种礁体最大流体作用阻力随流速变化的增幅
Fig. 3 Increase range of the two reefs' maximum forces with the increase of velocity

3.2.2 抗滑移安全系数的计算 鱼礁不发生滑移的条件是鱼礁与海底的最大静摩擦力大于流体的作用阻力。将各计算参数代入式(9)得出2种礁体的抗滑移性能(表3、表4)。结果显示,方型对角中连式礁体和方型对角板隔式礁体在计算条件下所受静摩擦

力均为所受水平阻力的20~30倍,表明这2种礁体在正常情况下不会发生滑移,且方型对角板隔式礁体的抗滑移性能比方型对角中连式礁体稍好。方型对角板隔式礁体和方型对角中连式礁体抗滑移所能承受最大作用力分别为46 801 N和25 123 N。

表3 方型对角中连式礁体在不同流速下的抗滑移系数(S_I)
Tab. 3 The anti-slide coefficient (S_I) of cube-diagonal plate crossing reef under different velocities

流速/(m·s ⁻¹) <i>u</i>	<i>F</i> _{垂直} /N	<i>F</i> _{水平} /N	摩擦系数 <i>μ</i>	抗滑移系数 <i>S_I</i>	是否滑移 Slide or not
0.04	45678	967.4	0.55	25.97	no
0.08	45678	1 037.4	0.55	24.22	no
0.12	45678	1 137.3	0.55	22.09	no
0.16	45678	1 261.9	0.55	19.91	no
0.20	45678	1 427.0	0.55	17.61	no
0.24	45678	1 575.1	0.55	15.95	no
0.28	45678	1 761.0	0.55	14.27	no
0.32	45678	1 965.2	0.55	12.78	no
0.36	45678	2 187.9	0.55	11.48	no

注: 方型对角中连式礁体抗滑移所能承受最大作用力 $F_{\max}' = F_{\text{垂直}} \cdot \mu = 25\,123\text{ N}$
Note: The maximum anti-slide force of the cube-diagonal plate crossing reef $F_{\max}' = F_{\text{垂直}} \cdot \mu = 25\,123\text{ N}$

表4 方型对角板隔式礁体在不同流速下的抗滑移系数 (S_2)

Tab. 4 The anti-slide coefficient (S_2) of cube-diagonal plate separating reef under different velocities

流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) u	$F_{\text{垂直}}/\text{N}$	$F_{\text{水平}}/\text{N}$	摩擦系数 μ	抗滑移系数 S_1	是否滑移 Slide or not
0.04	85 093	1 782.2	0.55	26.26	no
0.08	85 093	1 875.8	0.55	24.95	no
0.12	85 093	2 018.1	0.55	23.19	no
0.16	85 093	2 201.9	0.55	21.25	no
0.20	85 093	2 422.4	0.55	19.32	no
0.24	85 093	2 676.9	0.55	17.48	no
0.28	85 093	2 963.3	0.55	15.80	no
0.32	85 093	3 280.3	0.55	14.27	no
0.36	85 093	3 627.1	0.55	12.90	no

注: 方型对角板隔式礁体抗滑移所能承受最大作用力 $F_{\text{max}}' = F_{\text{垂直}} \cdot \mu = 46\,801\text{ N}$
Note: The maximum anti-slide force of the cube-diagonal plate separating reef $F_{\text{max}}' = F_{\text{垂直}} \cdot \mu = 46\,801\text{ N}$

3.2.3 抗翻滚安全系数的计算 由公式(10) 计算得到2种礁体的抗翻滚系数(表5、表6)。结果表明, 2种礁体的抗翻滚性能良好。 R_1 在不同的流速下比 R_2 略低,说明方型对角板隔式礁体比方型对角板中

连式礁体的抗翻滚性能稍好。且可由此推算出方型对角中连式礁体抗翻滚所能承受的最大作用力矩为 $91\,356\text{ N} \cdot \text{m}$,方型对角板隔式礁体抗翻滚所能承受最大作用力矩为 $170\,186\text{ N} \cdot \text{m}$

表5 方型对角中连式礁体在不同流速下的抗翻滚系数 (R_1)

Tab. 5 The anti-rolling coefficient (R_1) of cube-diagonal plate crossing reef under different velocities

流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) u	$F_{\text{垂直}}/\text{N}$	l_1/m	$F_{\text{水平}}/\text{N}$	l_{max}/m	抗翻滚系数 R_1	是否翻滚 Rolling or not
0.04	45 678	2	967.4	4	23.61	no
0.08	45 678	2	1 037.4	4	22.02	no
0.12	45 678	2	1 137.3	4	20.08	no
0.16	45 678	2	1 261.9	4	18.10	no
0.20	45 678	2	1 427.0	4	16.00	no
0.24	45 678	2	1 575.1	4	14.50	no
0.28	45 678	2	1 761.0	4	12.97	no
0.32	45 678	2	1 965.2	4	11.62	no
0.36	45 678	2	2 187.9	4	10.44	no

注: 方型对角中连式礁体抗翻滚所能承受最大作用力矩 $M_{\text{max}}' = F_{\text{垂直}} \cdot l_1 = 91\,356\text{ N} \cdot \text{m}$
Note: The maximum anti-rolling torque of the cube-diagonal plate crossing reef $M_{\text{max}}' = F_{\text{垂直}} \cdot l_1 = 91\,356\text{ N} \cdot \text{m}$

表6 方型对角板隔式礁体在不同流速下的抗翻滚系数 (R_2)

Tab. 6 The anti-rolling coefficient (R_2) of cube-diagonal plate separating reef under different velocities

流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) u	$F_{\text{垂直}}/\text{N}$	l_1/m	$F_{\text{水平}}/\text{N}$	l_{max}/m	抗翻滚系数 R_2	是否翻滚 Rolling or not
0.04	85 093	2	1 782.2	4	23.87	no
0.08	85 093	2	1 875.8	4	22.68	no
0.12	85 093	2	2 018.1	4	21.08	no
0.16	85 093	2	2 201.9	4	19.323	no
0.20	85 093	2	2 422.4	4	17.56	no
0.24	85 093	2	2 676.9	4	15.89	no
0.28	85 093	2	2 963.3	4	14.36	no
0.32	85 093	2	3 280.3	4	12.97	no
0.36	85 093	2	3 627.1	4	11.73	no

注: 方型对角板隔式礁体抗翻滚所能承受最大作用力矩 $M_{\text{max}}' = F_{\text{垂直}} \cdot l_1 = 170\,186\text{ N} \cdot \text{m}$
Note: The maximum anti-rolling torque of the cube-diagonal plate separating reef $M_{\text{max}}' = F_{\text{垂直}} \cdot l_1 = 170\,186\text{ N} \cdot \text{m}$

3.3 计算结果分析

在定常波流条件下,2种方型礁体受到的最大作用力随着流速的增大而增大,其中方型对角板隔式礁体的迎流面积较大,因此礁体所受水平阻力随着流速的

增大,其增加较迅速;而方型对角中连式礁体所受水平阻力的增幅较为平缓(图4)。结果表明,方型对角板隔式礁体的稳定性能比方型对角中连式礁体的稍好,进一步说明了礁体的稳定性与迎流面积及自重均有关。

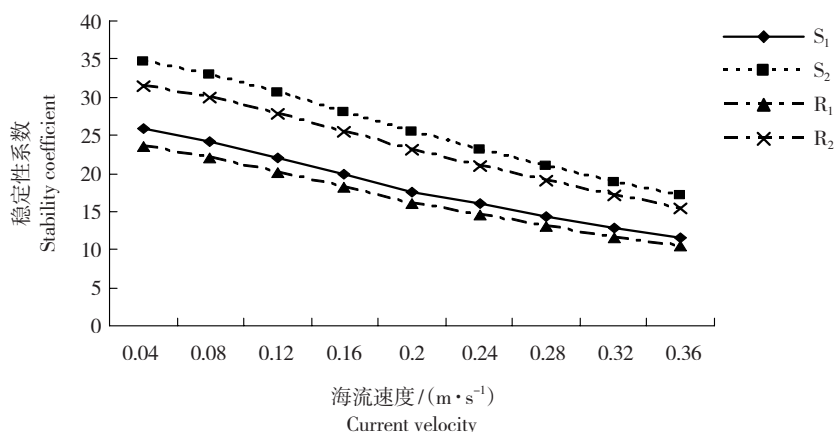


图4 2种礁体抗滑移系数和抗翻滚系数

S_1 、 R_1 表示方型对角中连式礁体的抗滑移系数和抗翻滚系数; S_2 、 R_2 表示方型对角板隔式礁体的抗滑移系数和抗翻滚系数。

Fig. 4 Anti-slide coefficients (S_1 and S_2) and anti-rolling coefficients (R_1 and R_2) of the two reefs

S_1 , R_1 mean anti-slide and anti-rolling coefficients of cube-diagonal plate crossing reef; S_2 , R_2 mean anti-slide and anti-rolling coefficients of cube-diagonal plate separating reef.

由于实际海流随着时间和地点在不断变化,礁体受力也在改变,因此有必要研究礁体受力的临界状态。临界状态下抗滑移和翻滚的系数接近1,礁体的状态将趋于不稳定。根据深圳杨梅坑台风资料^[16,23-24],台风状态下 $H_{\max}$ 为4.6 m,最大周期 $T_{\max}$ 为11.1 s,海流速度 u 为0.39 m/s,波长 L 为134.58 m。应用公式(2)~(8)对礁体在这种状况下所受到的流体作用力进行计算,方型对角中连式礁体所受到的最大作用力为22 252 N,其抗滑移系数和抗翻滚系数分别为1.13和1.03;方型对角板隔式礁体所受到的最大作用力为35 994 N,其抗滑移系数和抗翻滚系数分别为1.30和1.20。结果表明,台风暴潮侵袭深圳杨梅坑海域时,方型对角中连式礁体和方型对角板隔式礁体的抗滑移、抗翻滚系数均大于1;但方型对角中连式礁体的抗滑移系数和抗翻滚系数已经接近1,其抗滑移和抗翻滚的能力已接近极限。由此可见,方型对角板隔式礁体的抗滑移系数和抗翻滚系数明显高于方型对

角中连式礁体,其抗滑移、抗翻滚的优势更加突出。

4 讨论

4.1 礁体的特点

本实验研究的2种方型礁体均为钢筋混凝土礁体,已经在深圳杨梅坑礁区进行了投放。2种礁体的共同特点是制作简单,空方比大,内部结构复杂。投放后跟踪调查表明,2种礁体的聚鱼效果和生物附着效果良好。方型对角板隔式礁体的稳定性相对较好,但耗费材料多,在礁体制作和投放方面操作性相对较差,成本也高出许多。

在不同海域进行人工鱼礁建设,应在建礁之前对拟建礁区进行系统的本底调查,根据礁区海洋环境和生物环境状况,结合模拟实验和数值计算进行礁体结构设计,并对不同结构的礁体进行集鱼效果的验证,以提高人工鱼礁建设的生态效应。

4.2 礁体的稳定性

迎流面积大的礁体所受水平阻力大,随着海流

速度的增大其增加幅度也较大,容易导致礁体的不稳定。礁体物理稳定性不但与迎流面积有关,还与自重有关。在国内关于礁体稳定性方面的研究中,吴子岳等^[19]针对连云港投放礁体海域的波流状况、水深等设计了十字型礁体,并根据波流动力学理论计算了此礁体受到的最大作用力;钟术求等^[7]针对浙江省台州大陈海域的波流状况、水深等设计了钢制四方台型礁体,并对礁体的稳定性进行了研究,根据波流动力学理论对礁体在实际投放海域中所受到的最大作用力、抗滑移系数以及抗翻滚系数等进行了计算。以上的研究中都提到迎流面积和礁体自重是判定礁体稳定性的关键要素,本研究结果同样体现了这一点,即方型对角板隔式礁体的迎流面积大,所受的水流阻力就大,当海流流速增大,水流阻力增大也较为迅速,但因为自身在水流中的质量较大,所以其抗滑移性能和抗翻滚性能比方型对角中连式礁体好。

根据深圳杨梅坑人工鱼礁区的波流状况,本研究利用抗滑移、抗翻滚全系数对礁体的临界状况进行了估算。方型对角中连式礁体在波流共同作用下的最大受力为25 123 N,最大力矩为91 356 N·m;方型对角板隔式礁体在波流共同作用下的最大受力为46 801 N,最大力矩为170 186 N·m。研究中选用的礁体其材料为钢筋混凝土,而投放海域底质是硬质泥沙底,根据2种鱼礁单体抗滑移抗翻滚的计算数据判断,这2种礁体构型具有较好的抗滑移抗翻滚性能,适合深圳杨梅坑人工鱼礁区的水文特点。此外,计算中进一步引入了波浪因素,并以深圳杨梅坑人工鱼礁区海域定常波流下的流速为计算条件,具有一定的工程意义,可为下一步人工鱼礁的礁体设计提供量化数据。

鱼礁材料因和海水发生化学反应而产生腐化,往往会导致鱼礁材料解体而使人工鱼礁失去效用,同时礁体周围物理环境也会引起礁体发生失稳。当海流遇到礁体阻挡,除了产生上升流外,还会有部分下降流,通过上升流和下降流不断循环,产生对礁体底部泥沙的涌升和下沉作用,从而改变礁体底部环境,最终导致礁体被掩埋或沉陷^[25-26]。今后,本课题

组拟在人工鱼礁研究中采用礁体的模型试验和数值模拟技术,对礁体的材料和礁体周边物理环境的造成展开进一步研究。

参考文献:

- [1] 章守宇,张焕君,林军,等. 嵊泗县人工鱼礁建设一期工程项目可行性研究报告[R]. 上海: 上海水产大学,2003: 1-7.
- [2] Charbonnel E, Serre C, Rutton S, et al. Effects of increased habitat complexity on fish assemblages associated with large artificial reef units (French Mediterranean coast)[J]. ICES J of Mar Sci, 2002,59: 208-213.
- [3] 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.
- [4] Wolanski E, Hamner W M. Topographically controlled fronts in the ocean and their biological influence [J]. Science,1998,241: 177-181.
- [5] Sheng Y P. Effects of hydrodynamic processes on phosphorus distribution in aquatic ecosystems [C]. // Reddy K R, O' Connor G A, Schelske C L. Phosphorus biogeochemistry in subtropical ecosystems. Boca Raton: Lewis Publishers,1999: 377-402.
- [6] 杨咨,刘同渝,黄汝堪. 中国人工鱼礁理论与实践[M]. 广州: 广东科技出版社,2005.
- [7] 钟术求,孙满昌,章守宇,等. 钢制四方台型人工鱼礁礁体设计及稳定性研究[J]. 海洋渔业,2006,28(3): 234-240.
- [8] 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,2006,28(3): 257-262.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 吴静,张硕,孙满昌,等. 不同结构的人工鱼礁模型对牙鲆的诱集效果初探[J]. 海洋渔业,2004,26(4): 271-276.
- [12] 张虎,朱孔文,汤建华. 海州湾人工鱼礁养护资源效果初探[J]. 海洋渔业,2005,27(1): 38-43.
- [13] 张伟,李纯厚,贾晓平,等. 人工鱼礁附着生物影响因素研究进展[J]. 南方水产,2008,4(1): 64-68.
- [14] 陶峰,贾晓平,陈丕茂,等. 人工鱼礁礁体设计的研究进展[J]. 南方水产,2008,4(3): 64-69.
- [15] 中村充. 水产土木工程[M]. 东京: 工业时事出版社,1991: 462-469.
- [16] 李少英. 大亚湾的波浪[J]. 南海研究与开发,1991,4: 25-31.
- [17] 黄祥鹿,陆鑫森. 海洋工程流体力学及结构动力响应[M]. 上海: 上海交通大学出版社,1992: 37-41.

- [18] 郭维东,李文果,杨丽萍,等. 水力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2005: 60-65.
- [19] 吴子岳,孙满昌,汤威. 十字型人工鱼礁礁体的水动力计算[J]. 海洋水产研究,2003,24(4): 32-35.
- [20] Finnemore E J, Franzini J B. Fluid Mechanics with Engineering Applications [M]. McGraw-Hill,2002.
- [21] 史红卫. 正方体人工鱼礁模型试验与礁体设计[D]. 青岛: 中国海洋大学,2000.
- [22] 南海水产研究所. 南海水产研究所进行鱼礁模型试验[Z]. 人工鱼礁动态,1985,8: 11.
- [23] 黄方,叶春池. 广东海岛海洋水文[M]. 广州: 广东科技出版社 1995.
- [24] 郑淑卿,李立,曾刚. 大亚湾大鹏澳海流速概率分布[J]. 台湾海峡,1993,12(4): 242-247.
- [25] Tian W. Burial mechanism of artificial reefs; a geotechnical point of view [R]. Proceedings,16th Conference on Ocean Engineering. 1994: 79-94.
- [26] 王素琴. 人工鱼礁的受力分析与设计要点[J]. 大连水产学院学报,1987,6(1): 55-62.

Stability of cube-diagonal plate crossing reef and cube-diagonal plate separating reef

TAO Feng^{1,2}, TANG Zhen-zhao¹, CHEN Pi-mao¹, JIA Xiao-ping¹

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Key Field Scientific Experimental Station of South China Sea Fishery Resource and Environment, Ministry of Agriculture; Key Laboratory of Fishery Ecology Environment, Guangzhou 510300, China; 2. College of Marine Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on the wave conditions, current conditions and water depth of Yang-Meikeng artificial reef area of Shenzhen, the maximum resistance forces, anti-rolling coefficients and anti-slide coefficients of cube-diagonal plate crossing reef and cube-diagonal plate separating reef which have been deployed in the area are computed. The results show that the resistance force of the two reefs increases with sea flow velocity and the increase amplitude of force of cube-diagonal plate separating reef is larger than that of cube-diagonal plate crossing reef. The maximum anti-slide force and the anti-rolling torque of cube-diagonal plate crossing reef are 25 123 N and 91 356 N · m, respectively. The maximum anti-slide force and the anti-rolling torque of cube-diagonal plate separating reef are 46 801 N and 170 186 N · m, respectively. The investigation results show that the anti-rolling and anti-slide performances of the two reefs will be good enough, and the artificial reefs will keep stable and well functioning for a long time even when wave and sea current conditions go worse suddenly. [Journal of Fishery Sciences of China,2009,16(5): 773-780]

Key words: artificial reef; reef stability; Yang-Meikeng of Shenzhen

Corresponding author: JIA Xiao-ping. E-mail: jiaxiaoping53@163.com