

水流作用下粉砂海床上人工鱼礁局部冲刷的 模型试验与分析

丁玲¹, 王佳美^{1,4}, 唐振朝^{1,2*}, 陈海刚^{1,3}, 贾晓平¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东广州 510300;

2. 中国水产科学研究院海洋牧场技术重点实验室, 广东广州 510300;

3. 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东广州 510300;

4. 大连海洋大学海洋科技与环境学院, 辽宁大连 116023)

摘要: 海底条件的变化可能会加剧人工鱼礁的局部冲刷甚至产生掏空, 导致人工鱼礁倾覆或掩埋, 最终影响人工鱼礁的生态修复功能。为更好地了解人工鱼礁的冲刷特性, 明确冲刷地形的形成机制, 本研究首先采用物理模型试验的方法, 对放置在粉砂底质上的人工鱼礁在不同水流条件下的局部冲刷问题进行了研究, 并通过对原型流场进行数值模拟, 讨论分析了水流及礁体结构特征对局部冲刷形态的影响机制。模型试验结果显示, 0.11 m/s流速对试验选取的模型沙的影响不显著, 礁体模型背面冲刷坑的深度仅为0.5 mm, 两侧无明显冲刷坑, 当流速增加到0.22和0.27 m/s时, 沙床表面形成了均匀分布的沙鳞, 背面冲刷坑深度分别达到1.0和1.5 mm, 两侧冲刷坑的最大深度为4.5 mm, 宽度分别为4.0和7.5 cm; 流场数值模拟的分析结果显示, 原型条件下流场、沙床剪切力和涡量的高值区和模型试验中冲刷强区存在对应关系, 礁体的开孔和多柱支撑设计增大了局部冲刷强度。该研究表明, 在粉砂底质条件下人工鱼礁的局部冲刷程度随流速的增加而增强, 但总体冲刷不严重, 未出现掏空或掩埋现象; 礁体结构对局部冲刷有较大影响, 因此, 礁体设计与布局时应综合考虑流场效应、稳定性和冲刷形态等因素。

关键词: 人工鱼礁; 局部冲刷; 水槽试验; 数值模拟

中图分类号: S 931

文献标志码: A

人工鱼礁作为修复海洋生态环境的重要手段和海洋牧场建设的主要内容, 近年来在我国沿海地区得到了广泛地应用。人工鱼礁生态修复功能的正常发挥通常取决于以下几个方面: 人工鱼礁区的选址, 如良好的底质和水文条件; 人工鱼礁结构与礁区布局设计, 既能产生良好的水动力学效应, 又可在各种海况条件下保持礁体形态的完整性; 建立系统完善的礁区管理和开发机制。由于沿海地区的地质特征和水文特征差异明显, 建设实践中礁体在冲刷作用下沉陷或被泥沙掩埋的现象并不少

见, 为确保人工鱼礁投放后发挥良好的生态效应, 有必要在选址和设计阶段充分考虑不同底质条件、不同水文条件和不同礁体设计方案对人工鱼礁局部冲刷的影响。

目前, 国内外对人工鱼礁的研究主要集中在物理、生物、生态和管理等方面, 主要包括: (1) 人工鱼礁的水动力学特性及流场效应分析^[1-3]; (2) 人工鱼礁的生物附着和集鱼效果研究^[4-5]; (3) 人工鱼礁区生态系统的结构和功能评价^[6-7]; (4) 人工鱼礁的经济效果评价等^[8]。关于人工鱼礁局部冲刷的相关研究并不多见, 欧荣昌^[9]通过现场观

收稿日期: 2019-05-31 修回日期: 2019-08-04

资助项目: 防城港钢铁项目渔业生态保护修复工程(01-154); 公益性行业(农业)科研专项(201003068); 国家科技支撑计划(2012BAD18B02)

通信作者: 唐振朝, E-mail: tangzhenzhao@scsfri.ac.cn

测发现，海床底质的差异是影响礁体冲刷情况的主要因素。赖明贤^[10]采用物理模型实验研究得出礁体周围的冲刷现象与海床沉积物粒径及水体流速有关，认为冲刷作用是造成礁体过度下陷甚至掩埋的主因。李欣雨^[11]利用基于Flow-3D的泥沙冲刷模型，对2种不同开孔的人工鱼礁局部冲刷进行了数值模拟，得出开孔较小礁体的底部冲刷深度较大的结论。本研究对不同水流条件下人工鱼礁的局部冲刷进行了物理模型试验，并引入数值模拟方法对冲刷机制进行分析，以期为礁区选址和礁体优化设计提供一定的参考依据。

1 材料与方 法

1.1 试验水槽及模型参数

该试验是在中国水产科学研究院江苏如东试验基地进行。试验水槽(图1)由双向造流泵、变频器、造流管路、均流箱和计算机控制接口卡等组成。试验段尺寸：4.5 m×1 m×1.5 m，底部铺设0.4 m厚的泥沙，泥沙层表面到水面的深度为0.7 m。



图 1 试验水槽
Fig. 1 Experimental sink

试验礁体原型由钢筋混凝土制成，尺寸为3 m×3 m×4 m，由于人工鱼礁投放后受到水流的直接作用力，因此，重力相似和阻力相似准则是物理模型试验必须首先满足的相似准则。根据预试验结果确定原型流速分别选用0.5、1.0和1.2 m/s共3组条件，采用正态模型方法，根据Froude相似律设计水流、水深条件(表1)。按照长度比尺 $\lambda_L=20$ ，重量比尺 $\lambda_W=20^3$ 制作试验礁体模型，尺寸为0.15 m×0.15 m×0.2 m(图2)。由于原型沙含有极细颗粒可能发生絮凝沉降，导致模型沙难于选取，为保证泥沙颗粒加速度相似及泥沙颗

粒在水流作用下受力的一致性，本研究参考相关文献^[12-14]采用了与原型沙相同的天然粉砂为模型沙，其粒径介于0~2 mm之间，其中0~0.004 mm颗粒含量为2.19%，0.004~0.063 mm颗粒含量为48.26%，0.063~0.25 mm颗粒含量为40.96%，0.25~2 mm颗粒含量为8.59%，泥沙中值粒径 $d_{50}=0.063$ mm，其粒径级配曲线见图3。

表 1 原型参数与试验参数

Tab. 1 Prototype and experimental parameters

	流速/(m/s) flow velocity			水深/m water depth
	0.50	1.00	1.20	14.00
原型参数 prototype parameters				
试验参数 experimental parameters	0.11	0.22	0.27	0.70

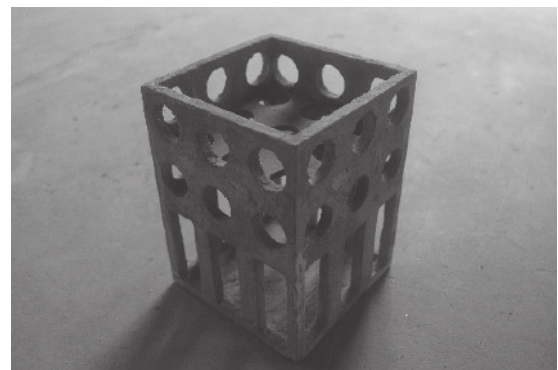


图 2 礁体模型
Fig. 2 The reef model

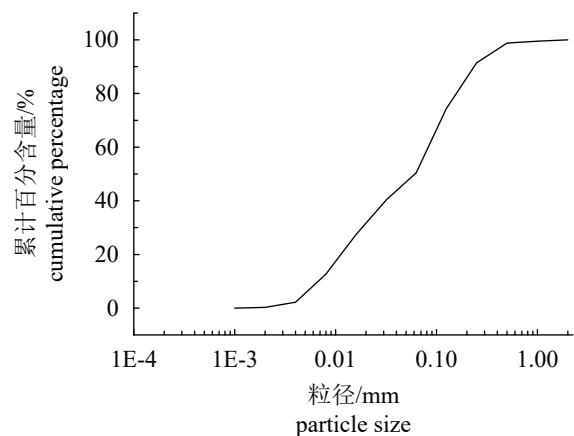


图 3 试验沙粒径级配曲线
Fig. 3 The grain size gradation curve

1.2 试验方法

(1) 冲刷试验前，按照给定的流速计算出流量所需电流值，输入计算机，经过反复采样修

正得到模型设计要求的流速。

(2) 将试验用沙放入水槽内, 加水充分浸泡后抹平, 加水至试验水深。

(3) 待水静止后, 将礁体模型缓慢放置于水槽内的泥沙表面。

(4) 礁体完全浸泡后, 启动造流系统对其进行冲刷。

(5) 每组流速冲刷24 h, 冲刷时间连续作用累计每6 h用测针仪进行数据采集并对冲刷情况拍照。

(6) 进行下一个流速试验时, 重整地形, 重复以上试验步骤。

1.3 数据采集与分析

流速测量采用LGY-II智能流速仪, 测量范围为1~300 cm/s, 精度为±1 cm/s, 地形则采用测针仪对冲刷形成的地形如冲刷坑等进行测量, 精度为±0.5 mm。结合地形测量的结果, 采用泥沙冲刷理论和数值模拟两种方法对局部冲刷地形的形成机理进行分析。

2 结果

2.1 模型试验结果

初始阶段在不给流的情况下, 鱼礁模型在泥沙表面静置12 h, 礁体下陷约0.5 mm。在0.11、0.22和0.27 m/s的水流作用下, 冲刷24 h后发现, 当水流速度为0.11 m/s时, 泥沙堆积现象比冲刷现象明显。礁体的迎流面中间两柱体处形成两个弧形堆积, 堆积高度最大为6.5 mm。迎流面两个尖角处的冲刷深度仅为1 mm左右。在礁体的两侧面相邻两孔之间分别形成流线型堆积, 堆积的高度最大分别为5和7 mm。在礁体的背流面对应三个孔的位置形成三个冲刷坑, 冲刷坑内泥沙有粗化现象, 坑的深度为0.5 mm。冲刷坑与礁体之间形成弧形堆积, 堆积高度最大为6 mm, 弧形堆积与礁体底板间的距离与底板的厚度相当。距离礁体1倍礁宽处, 在顺流方向泥沙表面上有长尾形沉积现象发生, 长度约为4倍礁高(图4-a)。

当水流速度为0.22和0.27 m/s时, 冲刷后在泥沙表面形成均匀分布的沙鳞, 且0.27 m/s流速下沙波的体积大于0.22 m/s流速下的沙波体积, 高度约为1 cm。随着冲刷的进行, 沙波向后移动, 在礁体背流面的泥沙表面形成较大的长条



(a)



(b)



(c)

图4 不同流速下的冲刷地形

(a)0.11 m/s流速下的冲刷地形; (b)0.22 m/s流速下的冲刷地形; (c)0.27 m/s流速下的冲刷地形

Fig. 4 The scour topography at different flow velocity (a)the scour topography at flow velocity of 0.11 m/s; (b)the scour topography at flow velocity of 0.22 m/s; (c)the scour topography at flow velocity of 0.27 m/s

形堆积。礁体迎流面前方区域的冲刷程度最小, 冲刷小坑出现在对应3个孔的位置, 最大深度分别为1.0、1.5 mm。在礁体的两侧面无泥沙堆积, 冲刷程度较严重, 冲刷坑的宽度分别约为4.0、7.5 cm, 最大冲刷深度分别为4.5、4.5 mm。礁体背流面的冲刷最严重, 冲刷范围约为底边长的一半, 最大冲刷深度分别为4.5、6.0 mm。在冲刷坑与礁体之间, 距离礁体约5 mm处形成长条形堆积, 宽度约为礁体底板的厚度, 高度分别为4.5、4.0 mm(图4-b, c)。

人工鱼礁的局部冲刷形态与以往研究中方柱体和水下生产设施基础的局部冲刷形态相似但也有很大的不同^[15-17]。相似之处在于冲刷较严重的区域位于结构物迎流面尖角处和两侧, 不同之处在于受礁体开孔和多支撑柱结构的影响,

局部冲刷形态相对复杂。同时礁体周围的泥沙堆积随流速的增大而减小,冲刷作用随流速的增大而增强。

2.2 理论分析

根据窦国仁^[18]的细颗粒泥沙起动流速公式:

$$V_c = 0.32 \left(\ln 11 \frac{h}{K_s} \right) \left[\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \times gD + 0.19 \times \left(\frac{\varepsilon_k + gh\delta}{D} \right) \right]^{0.5}$$

式中 δ 、 ε_k 根据交叉石英丝试验成果 $\delta=0.213 \times 10^{-4}$ cm、 $\varepsilon_k=2.56$ cm²/s²; D 为泥沙中值粒径(mm); K_s 为床面粗糙高度,对于平整河床,当 $D \leq 0.5$ mm时, $K_s=0.5$ mm; 当 $D > 0.5$ mm时, $K_s=D$; h 为水深; g 为重力加速度; γ_s 、 γ 分别为泥沙颗粒和水的容重。计算出原型水深即14 m时泥沙的起动流速为1.03 m/s, 试验水深为0.7 m时泥沙的起动流速为0.27 m/s, 泥沙起动流速比尺 λ_{v0} 为0.27/1.03=0.26, 通过Froude相似律计算出流速比尺 λ_v 为0.22。根据海岸与河口泥沙模拟技术规程^[19], 起动流速比尺基本满足泥沙起动相似准则。

当试验流速为0.11 m/s时, 远小于泥沙的起动流速, 只有少量泥沙被冲起, 但由于礁体柱状结构和底板厚度的阻挡作用, 泥沙在礁体周围的减速区域沉降淤积。当试验流速为0.22、0.27 m/s时, 分别接近和超过了泥沙的起动流速, 此时泥沙以推移质运动形式为主, 床面形成均匀分布的沙鳞, 并向后移动, 是推移质运动的主要形态。推移质运动的同时水体中含有大量的悬移质, 两者之间存在着交换, 当水流较弱时, 悬移质转变为推移质, 当水流较强时, 推移质转变为悬移质^[20]。在礁体两侧面和背流面靠近底部的开孔处水流较强, 底沙转变成悬沙, 形成冲刷坑。在背流面两脚处存在流速低值区, 推移质运动到此发生堆积, 悬移质在此发生沉降, 因此在两脚处发生条形堆积。堆积的迎水面受水流冲刷逐渐下移, 背水面淤积逐渐向后延伸, 从而堆积向后移动与礁体分离, 同时受限于两侧流速高值区, 继续向后移动到约1倍礁宽处的尾涡流速低值区。

2.3 数值模拟

采用计算流体动力学(CFD)方法建立数值模型, 分析了不同入流条件下礁体周围的速度

场、流场和涡量场。由于试验参数设计时采用的是Froude相似准则, 对应的鱼礁原型尺寸为3 m×3 m×4 m, 为满足礁体受力及稳定性的相似性, 数值模型(图5)也采用了原型礁的尺寸, 计算区域的范围设定为29 m×20 m×14 m, 计算区域网格划分大部分采用六面体网格, 鱼礁周围采用四面体网格, 网格最小尺寸为0.1 m, 整个计算区域的网格单元总数为1 139 928个。数值计算中控制方程采用定常、不可压缩流动下的连续性方程和N-S方程, 而湍流模型则选择标准k- ε 模型, 计算湍动能k和湍动耗散率 ε 时, 流体密度为1 025 kg/m³, 特征长度为4 m, 动力黏度为0.001 003 kg/ms。

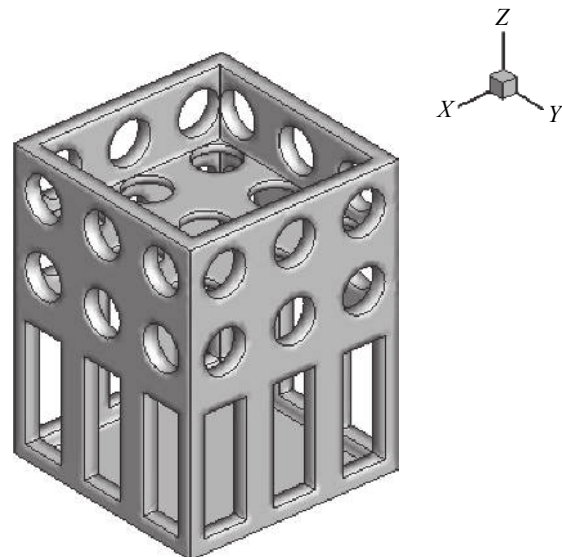


图5 数值模型简图

Fig. 5 Diagram of the 3D numerical model

速度场 3种流速条件下0.1倍礁高处的速度等值线图结果显示, 水流速度为0.5 m/s时, 礁体两侧面是流速低值区, 泥沙容易沉降淤积(图6-a)。礁体背流面柱体后方位置是速度低值区, 孔的位置是速度相对高值区, 流场分布特征与冲刷试验中礁体背流面的冲刷淤积地形存在对应关系。礁体背流面开孔处的垂向流场分布则显示, 底板的厚度造成礁体背流面靠近底板的区域流场变弱, 礁体后方因此出现长条形的泥沙淤积(图7)。

水流速度为1.0 m/s时, 礁体内部有高速水流通过侧面孔的位置向外扩散, 速度低值区范围减小, 礁体侧前方的速度高值区加剧了地形被冲刷的程度(图6-b)。礁体背流面孔的位置流速大

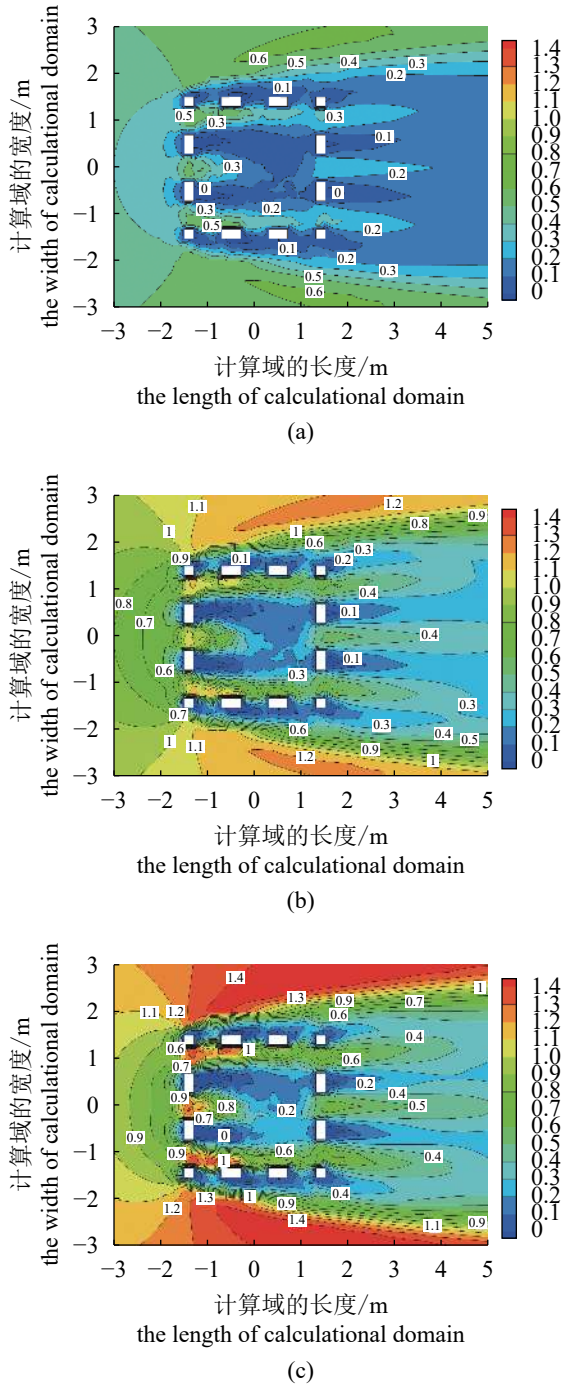


图6 0.1倍礁高处速度等值线图

(a)水流速度为0.5 m/s, (b)水流速度为1.0 m/s, (c)水流速度为1.2 m/s; 下同

Fig. 6 Velocity contour map in the plane at tenth of the reef height

(a)flow velocity is 0.5 m/s, (b)flow velocity is 1.0 m/s, (c)flow velocity is 1.2 m/s; the same below

小是0.5 m/s时的2倍, 速度相对高值区范围增大, 低值区范围减小, 致使冲刷程度增加, 淤积现象减少。水流速度为1.2 m/s时, 礁体侧前方

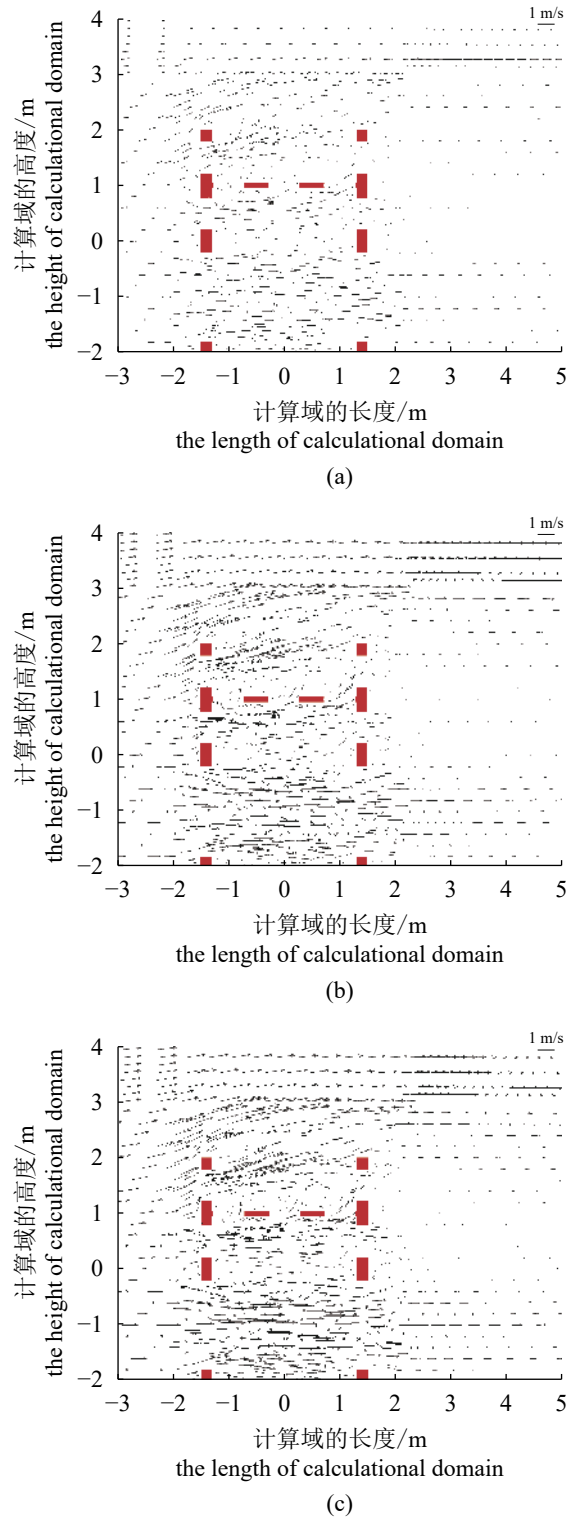


图7 背流面开孔处垂向流场图

Fig. 7 Vertical flow field at the behind opening

的水流速度是底沙起动流速的2倍, 底沙大量被起动, 地形冲刷严重(图6-c)。礁体背流面水流速度高于前两种流速情况, 泥沙堆积最少, 地形冲刷最严重。

床面剪切力 床面剪切力是指底部水流对床面的剪切拖曳力,是影响床面冲淤变化的重要因素之一。当床面剪切力大于床面泥沙临界起动剪切力时,泥沙起动,对于细颗粒泥沙来说,泥沙起动后即可悬扬,床面冲刷;当床面剪切力小于泥沙临界止悬剪切力时,水体中的细颗粒泥沙沉降于床面,形成淤积^[21]。

3种流速条件下床面剪切力的分布结果显示,礁体迎流面前方小范围区域内床面剪切力相对较小,礁体两侧相对较大,礁体背流面尾流内床面剪切力最小。最大值出现在礁体两侧前方两脚处,剪切力高值区沿流方向延伸,同时剪切力高值区也是冲刷试验中冲刷最严重的区域(图8)。这与吴建等^[22]研究得到结果一致,即床面剪切力的分布在礁体迎水面两侧出现峰值区域,该区域为局部冲刷最严重的区域,也是最先开始冲刷的区域。

比较3种流速条件下床面剪切力大小,可以得出流速较大时床面剪切力也比较大。流速比较大时,垂线上流速增加比较快,导致剪切力变形比较大,剪切力增大^[23]。床面剪切力不仅反映了床面对水流的阻力大小,同时也反映了水流对床面冲刷能力的强弱,剪切力越大,水流对床面的冲刷能力越强。因此,1.2 m/s水流作用下,礁体周围的冲刷程度最严重,冲刷坑的发展也比较快。

涡量场 涡旋是结构物局部冲刷的主要动力因素,由于受到结构物的阻碍,水流在柱体结构的表面以较快速度向下运动,形成二次流,进而形成涡旋。当床面泥沙颗粒的重力或颗粒间黏结力无法抵御涡旋对其施加的作用力时,泥沙就会起动^[24]。

3种流速条件下0.1倍礁高处垂向涡量场的分布情况显示,涡量较大值主要集中在分布在礁体柱状结构的周围,且涡量值随流速的增大而增大(图9)。礁体周围涡量场主要是由柱状结构的阻流作用形成的垂向流速梯度造成的,柱状结构附近的涡量值大于其他区域的涡量值。礁体两侧的涡量值较高,对应物理模型冲刷试验中冲刷最严重的区域。虽然礁体内部和迎流面开孔处的涡量值较高,但由于礁体模型底部是实心底板,所以该区域没有造成泥沙冲刷,如礁体底板为开孔设计,则可能在这些位置形成严重冲刷甚至掏空。

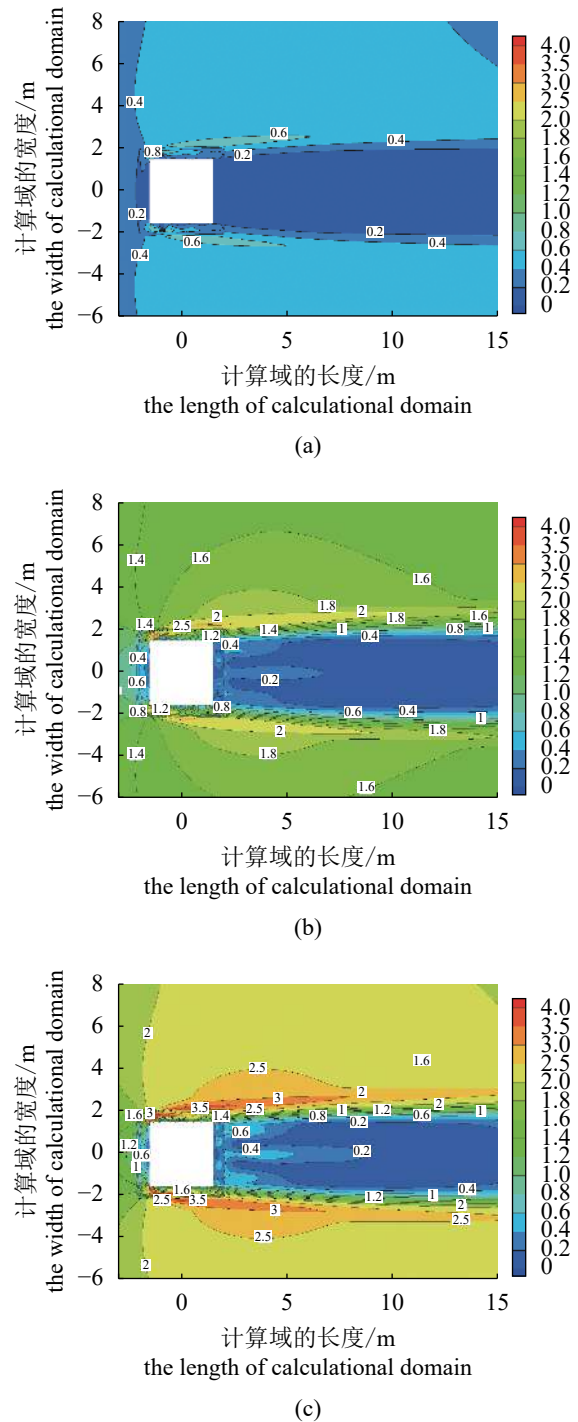


图8 床面剪切力分布图

Fig. 8 Bed shear force distribution

3 讨论

3.1 水流对冲刷的影响

在底床为粉砂质的试验条件下,人工鱼礁的局部冲刷程度随来流速度增大而增大。当来流速度为0.11 m/s时,未达到模型沙起动速度,

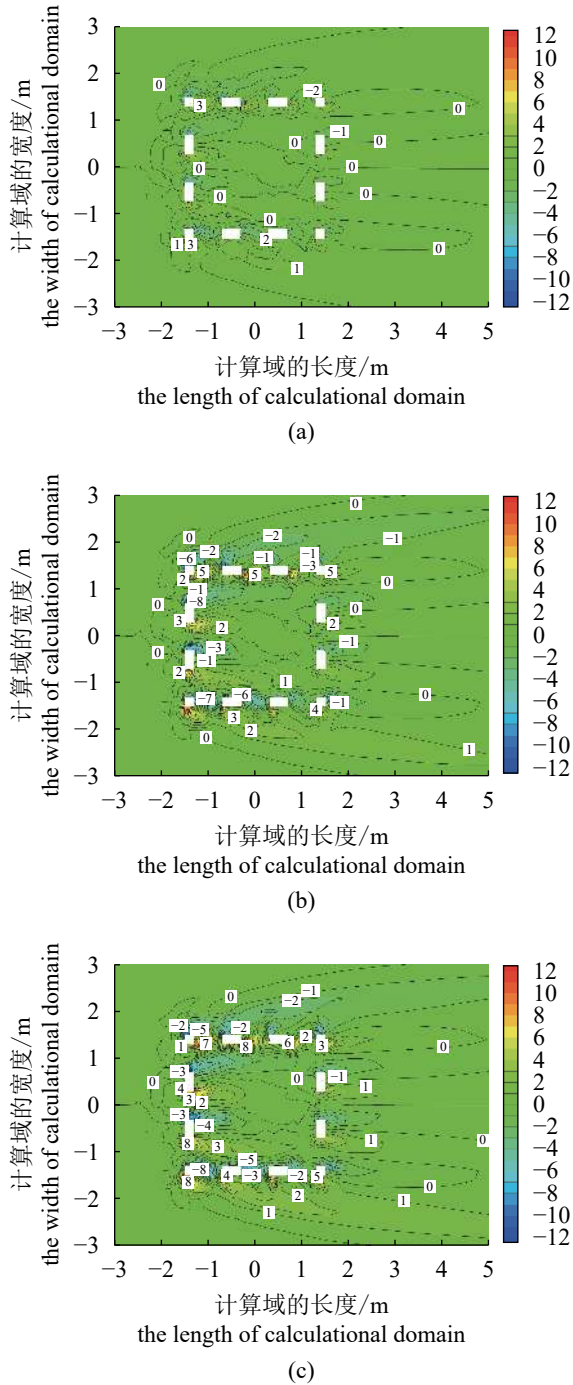


图9 0.1倍礁高处的垂向涡量场

Fig.9 Vertical vorticity field in the plane at tenth of reef height

泥沙扰动小, 床面平整, 礁体周围局部冲刷小, 主要表现为浮沙淤积; 当来流速度分别增加至0.22和0.27 m/s时, 泥沙起动后床面出现沙波, 礁体周围冲刷形态更为明显, 但整体冲刷程度较弱, 未出现掏空现象。以试验礁为例, 根据试验结果可选择水流相对缓慢且海床底质

组成以粉砂为主的海域作为投礁区域, 能有效减轻礁体周围的局部冲刷。因此, 在人工鱼礁建设选址时应首先通过现场采样、理论分析及物理模型试验的方法确定拟选址区域的泥沙性质、泥沙起动速度和水文条件, 以获取更好的人工鱼礁建设效果。

3.2 礁体结构对冲刷的影响

数值模拟获取的流场、床面剪切力及流量场高值区与试验结果得到的冲刷强区位置基本对应, 主要是由于礁体迎流面的开孔和多柱支撑结构的阻流作用增大了迎流面两侧和背流面开孔处的流速, 在礁体内部形成多涡旋的复杂流态, 进而增强了部分区域的冲刷程度。因此, 在对人工鱼礁结构进行设计优化时, 可考虑通过改进礁体迎流面、多柱支撑和底板的设计以降低局部区域的冲刷强度。

另一方面, 流场的数值模拟显示, 礁体尾流区域特别是礁后1~3倍礁宽处流速小, 泥沙易沉降淤积, 这一分析与模型试验所得礁体后方的长条形沙堆现象吻合。已有关于人工鱼礁流场效应的研究表明礁体组合的最优礁间距为礁体尺寸的1~1.5倍^[25], 主要是相关研究是以人工鱼礁形成的流场效应为研究主体, 未考虑泥沙冲刷的因素。

基于模型试验、理论分析和数值分析, 可知礁体设计和布设时不仅需优化流场, 还应研究冲刷淤积现象对礁体、礁群稳定性的影响, 综合评价流场效应和泥沙冲刷程度后提出礁体结构优化、礁体布设及礁群配置模式。在已建礁区的后期管理及维护中, 则可参考其他海底构筑物如坐底式平台的防冲刷方案, 在掌握礁型局部冲刷形态的基础上, 采用投放沙包或人工海草等方法针对性的进行防护^[26]。

4 不足与展望

因该物理模型试验的设计受试验条件限制, 采用的是单向水流进行泥沙冲刷, 而现场潮流为往复流或旋转流, 因此, 结果与现场实际冲刷形态存在一定差异, 为减少差异, 今后的试验研究应借助试验水池开展。此外, 本次试验仅研究了粉砂底质条件在水流作用下的冲刷表现, 有必要在将来引入不同的底质条件和礁型开展相关研究工作, 从而尽可能全面的对底质、水流和礁体结构在冲刷过程中的影响进

行分析,为礁区选址中的底质条件和水文条件筛选及礁型的设计优化提供科学依据。

感谢中国水产科学研究院如东试验基地的鲁桂荣、王占行、李为民等各位老师 in 实验过程中给予的悉心指导和热心协助。

参考文献:

- [1] 郑延璇,梁振林,关长涛,等.三种叠放形式的圆管型人工鱼礁流场效应数值模拟与PIV试验研究[J].*海洋与湖沼*,2014,45(1):11-19.
Zheng Y X, Liang Z L, Guan C T, *et al.* Numerical simulation and experimental study on flow field of artificial reefs in three tube-stacking layouts[J].*Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(1): 11-19(in Chinese).
- [2] 邵万骏,刘长根,聂红涛,等.人工鱼礁的水动力学特性及流场效应分析[J].*水动力学研究与进展*,2014,29(5):580-585.
Shao W J, Liu C G, Nie H T, *et al.* Analysis of hydrodynamic characteristics and flow field around artificial reefs[J].*Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2014, 29(5): 580-585(in Chinese).
- [3] 赵林,邓超,于振江,等.组合式金字塔型人工鱼礁水动力学分析[J].*渔业现代化*,2018,45(6):53-59.
Zhao L, Deng C, Yu Z J, *et al.* Hydrodynamic analysis of combined pyramidal artificial reef[J].*Fishery Modernization*, 2018, 45(6): 53-59(in Chinese).
- [4] 张伟,李纯厚,贾晓平,等.大亚湾混凝土鱼礁和铁质鱼礁附着生物群落结构的季节变化[J].*南方水产科学*,2015,11(1):9-17.
Zhang W, Li C H, Jia X P, *et al.* Seasonal variation of biofouling communities on concrete and steel reefs in Daya Bay[J].*South China Fisheries Science*, 2015, 11(1): 9-17(in Chinese).
- [5] 李磊,陈栋,彭建新,等.3种人工鱼礁模型对黑棘鲷的诱集效果研究[J].*海洋渔业*,2018,40(5):625-631.
Li L, Chen D, Peng J X, *et al.* On the attractive effects of three artificial reef models for *Sparus macrocephalus*[J].*Marine Fisheries*, 2018, 40(5): 625-631(in Chinese).
- [6] 杨进,李纯厚,贾晓平,等.大亚湾杨梅坑人工鱼礁区生态系统健康评价[J].*生态科学*,2011,30(4):399-405,410.
Yang J, Li C H, Jia X P, *et al.* Ecosystem health assessment of artificial reef area in the Yangmei Delve of Daya Bay[J].*Ecological Science*, 2011, 30(4): 399-405, 410(in Chinese).
- [7] 吴忠鑫,张秀梅,张磊,等.基于Ecopath模型的荣成俚岛人工鱼礁区生态系统结构和功能评价[J].*应用生态学报*,2012,23(10):2878-2886.
Wu Z X, Zhang X M, Zhang L, *et al.* Structure and function of Lidao artificial reef ecosystem in Rongcheng of Shandong Province, East China: an evaluation based on Ecopath model[J].*Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10): 2878-2886(in Chinese).
- [8] 尹增强,章守宇.东海区资源保护型人工鱼礁经济效果评价[J].*资源科学*,2009,31(12):2183-2191.
Yin Z Q, Zhang S Y. A preliminary study on the economic impact evaluation of the protective artificial reef in the east China Sea on the basis of financial indices[J].*Resources Science*, 2009, 31(12): 2183-2191(in Chinese).
- [9] 欧荣昌.人工鱼礁工程行为与箱网锚碇装置之研究[D].高雄,中国:国立中山大学,2002:149-154.
Ou R C. Engineering behavior of artificial benthic habitats and analysis and design of anchoring devices for farming cages[D]. Gaoxiong, China: National Sun Yat-Sen University, 2002: 149-154 (in Chinese).
- [10] 赖明贤.台湾西南海域人工鱼礁礁体工程行为分析[D].高雄,中国:国立中山大学,2000:42-46.
Lai M X. The engineering behavior of artificial reefs off southwestern coast of Taiwan[D]. Gaoxiong, China: National Sun Yat-Sen University, 2000: 42-46 (in Chinese).
- [11] 李欣雨.人工鱼礁在波浪作用下的流场效应及其局部冲刷数值模拟[D].天津:天津大学,2016:42-48.
Li X Y. Numerical simulation on wave-affected flow field and local scour of artificial reefs[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016: 42-48 (in Chinese).
- [12] 王兆印,张新玉.水库粘性淤积物泄空冲刷的模型试验研究[J].*泥沙研究*,1989(2):62-68.
Wang Z Y, Zhang X Y. Model test study on venting of viscous sludge in reservoir[J].*Journal of Sediment Research*, 1989(2): 62-68(in Chinese).
- [13] 李文杰,杨胜发,李斌强,等.基于原型沙的三峡库区细颗粒泥沙冲淤模型试验研究[J].*泥沙研究*,2016(3):17-23.

- Li W J, Yang S F, Li B Q, *et al.* Physical model study on fine sediment transport in the Three Gorges Reservoir based on prototype sand[J]. *Journal of Sediment Research*, 2016(3): 17-23(in Chinese).
- [14] 汪求顺. 近岸海床细泥沙输移及冲刷防护研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 83-87.
- Wang Q S. Study of fine sediment transport and scour protection in coastal waters[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015: 83-87 (in Chinese).
- [15] Khosronejad A, Kang S, Sotiropoulos F. Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers[J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 37: 73-85.
- [16] Burkow M, Griebel M. A full three dimensional numerical simulation of the sediment transport and the scouring at a rectangular obstacle[J]. *Computers & Fluids*, 2016, 125: 1-10.
- [17] 于春洁, 吴非, 王丽勤. 水下生产设施基础冲刷模型试验与数值模拟分析[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(4): 145-151.
- Yu C J, Wu F, Wang L Q. Test with a scour model and numerical simulation on the foundation of subsea production systems[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(4): 145-151(in Chinese).
- [18] 窦国仁. 全沙模型相似律及设计实例[J]. *水利水运科技情报*, 1977(3): 1-20.
- Dou G R. A similarity theory concerning the design of total sediment transport models with reference to a particular project[J]. *Hydro-Science Information*, 1977(3): 1-20(in Chinese).
- [19] 中华人民共和国交通运输部. JTS/T 231-2-2010海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTS/T 231-2-2010 Technical regulation of modelling for tidal current and sediment on coast and estuary[S]. Beijing: China Communications Press (in Chinese).
- [20] 刘青泉. 床面附近泥沙运动的力学特性[J]. *应用基础与工程科学学报*, 1997, 5(1): 56-66.
- Liu Q Q. The mechanics properties of sediment movement in layers close to the bed[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 1997, 5(1): 56-66(in Chinese).
- [21] 孔令双, 曹祖德, 顾峰峰, 等. 淤泥质河床冲淤分析计算[J]. *浙江水利科技*, 2014(5): 52-56.
- Kong L S, Cao Z D, Gu F F, *et al.* Study on the erosion and deposition of the muddy sea bed[J]. *Zhejiang Hydrotechnics*, 2014(5): 52-56(in Chinese).
- [22] 吴建, 刘德飞, 拾兵. 可实现k-ε模型在人工鱼礁流场分析中的模拟研究[J]. *中国水运*, 2013, 13(1): 99-100.
- Wu J, Liu D F, Shi B. Simulation study of k-ε model in artificial fish reef flow field analysis[J]. *China Water Transport*, 2013, 13(1): 99-100(in Chinese).
- [23] 张丛丽, 喻国良, 谢锦波. 单向流定床床面上水平管道周围流场与切应力分布特性[J]. *海洋科学*, 2009, 33(3): 27-30.
- Zhang C L, Yu G L, Xie J B. The characteristics of the shear stress and flow field around a pipeline on fixed-bed with different gap-ratios in unidirectional flows[J]. *Marine Sciences*, 2009, 33(3): 27-30(in Chinese).
- [24] 孙宁松, 孙永福, 宋玉鹏. 海洋平台桩基冲刷及影响因素分析[J]. *海岸工程*, 2004, 23(4): 38-44.
- Sun N S, Sun Y F, Song Y P. Scour around pile foundation of offshore platform and analysis of affecting factors[J]. *Coastal Engineering*, 2004, 23(4): 38-44(in Chinese).
- [25] 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, 11(2): 59-65.
- Cui Y, Guan C T, Wan R, *et al.* Numerical simulation on influence of disposal space on effects of flow field around artificial reefs[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2011, 11(2): 59-65(in Chinese).
- [26] 赵静, 王世澎, 袁振宇, 等. 坐底式平台基础冲刷的模型试验研究[C]//第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议文集(上册). 舟山: 中国力学学会, 2013: 547-554.
- Zhao J, Wang S P, Yuan Z Y, *et al.* Study on scour experiment of bottom-supported platform[C]//Proceedings of the 25th National Conference on Hydrodynamics & 12th National Congress on Hydrodynamics. 2013: 547-554 (in Chinese).

Experimental study and analysis of local scouring of artificial reef on silty sand bed under steady currents

DING Ling¹, WANG Jiamei^{1,4}, TANG Zhenzhao^{1,2*}, CHEN Haigang^{1,3}, JIA Xiaoping¹

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;

2. Key Laboratory of Marine Ranch Technology, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;

3. Guangdong Provincial Key Lab. of Fishery Ecology and Environment, Guangzhou 510300, China;

4. College of Marine Sci-Tech and Environment, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: Artificial reefs (ARs) are an important part of marine ranching, which are installed in seabed to protect and cultivate marine life systems. After ARs are deployed, changes in seabed conditions may intensify local scouring of seabed nearby ARs and influence the stability of ARs. Therefore, it is necessary to investigate the scouring characteristics. In this study, a physical model experiment was conducted in an experimental sink to investigate the local scouring of an artificial reef at different water flow velocities, which was placed on silty sand bed. The experiment results show that the scouring response of the silty bed to the 0.11 m/s flow velocity is not significant. The depth of the scouring hole behind the reef model is 0.5 mm, and there is no obvious scouring hole on both sides. When the flow velocity increases to 0.22 and 0.27 m/s, sand scales are uniformly distributed on the surface of sand bed. The depth of the scouring hole behind is 1.0 and 1.5 mm respectively. The maximum depth of the scouring holes on both sides is 4.5 mm and the width is 4.0 cm and 7.5 cm respectively. Combined with the experiment results, the numerical simulation method was introduced to analyse the mechanism of scouring phenomenon nearby ARs. According to the simulation, the flow field, shear force and vortex distribution are similar to the scouring pattern of silty sand bed in the experiments. The numerical simulation results show that the holes in the surface and multi-legs of reef increase the flow and scouring strength. The high value area of above three parameters corresponds to the area with stronger scouring. It is concluded that the scouring strength of ARs in the silty sand bed increases with flow velocity, but it is not strong enough to influence the stability of reef model. The structure of ARs does have effects on the local scouring. Flow field, stability and scouring pattern should be taken into consideration during the design of ARs.

Key words: artificial reef; local scouring; experimental sink; numerical simulation

Corresponding author: TANG Zhenzhao. E-mail: tangzhenzhao@scsfri.ac.cn

Funding projects: Fishery Protection and Ecological Restoration of Fangchenggang Iron and Steel Project (01-154); Special Fund for Agroscentific Research in the Public Interest (201003068); National Science and Technology Ministry (2012BAD18B02)