



珠海外伶仃人工鱼礁稳定性的理论预测与分析

陈钰祥¹, 袁华荣¹, 佟飞¹, 陈丕茂^{1,2}

1 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000

1. 引言

人工鱼礁对投放海域的生态具有重大而深远的影响,为探明不同外观结构礁体的稳定性和沉降量,根据珠海外伶仃海域的水文、地质条件,选取了两种礁体开展研究工作,一种为箱型框架结构(3.0 m×3.0 m×4.0 m),另一种为梯形框架结构,横截面为梯形(上底宽0.5 m、下底宽3.5 m),底面为正方形(3.5 m×3.5 m)。在4种流速(0.4、1.2、1.5、2.0 m s⁻¹)条件下,对两种礁体的水动力、抗滑抗倾稳定性、地基承载力和沉降量等特性进行了计算。结果表明,在流速1.2 m s⁻¹时,两种礁体的抗滑移和抗倾覆系数分别为1.57、4.10和2.19、5.72,均不会发生滑移和倾覆翻滚,地基承载力和沉降量也满足要求,能发挥应有的效果;当礁体水下质量相当时,外观结构对礁体抗滑移和抗倾覆有着重要影响,梯形框架结构礁体虽然受到的水动力较大,但却能提供比箱型框架结构礁体更高的稳定性以及更强的流场效应。

2. 研究方法

2.1 礁体设计与选取

人工鱼礁礁体的设计与选取应能最大限度地适应当地海域底质、海况以及生态特点,同时也要兼顾材料的环保与性价比等因素,礁体在设计及选取时需要遵循以下原则:

人工鱼礁流场效应;人工鱼礁生物效应;人工鱼礁遮蔽效应;礁体的高度必须考虑投放海域的水深、底质,并确保船舶的航行安全;礁体制作材料应当环保无污染,制造相对简单,耐久性好,强度高,成本较低。

综合考虑上述原则,本次选取了2种鱼礁单体:GDS05箱型框架结构礁体(1号礁体)、梯形框架钢混藻礁(2号礁体)。礁体结构如图所示。

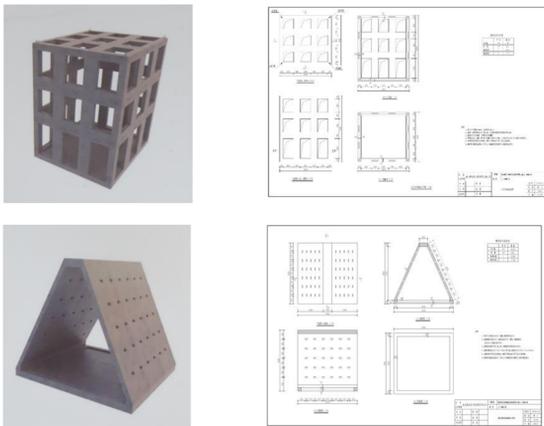


图1 1号礁体(上)和2号礁体(下)

2.2 礁体结构计算方法

1. 礁体水动力计算

人工鱼礁水流力的计算根据《港口工程荷载规范》相关内容进行计算:

$$F_{\omega} = C_{\omega} \rho V^2 A \quad (1) \quad F_{\omega} = n_1 m_2 C_{\omega} \rho V^2 A \quad (2)$$

公式(2)中增加的系数是综合考虑了人工礁区礁群的平面布局和礁区水深的影响。

2. 礁体抗滑移稳定性计算

人工鱼礁单体抗滑移稳定性按照以下公式计算:

$$\gamma_0 \gamma_{\omega} F_{\omega} \leq (\gamma_G G - \gamma_u P_u) f \quad (3)$$

3. 礁体抗倾覆稳定性计算

人工鱼礁礁体抗倾覆稳定性可以按照以下公式计算:

$$\gamma_0 (\gamma_{\omega} M_{\omega} + \gamma_u M_u) \leq \frac{1}{\gamma_d} \gamma_G M_G \quad (4)$$

公式(4)中, $M_{\omega} = F_{\omega} l$, 是礁体受到水动力而产生的倾覆力矩。

4. 地基承载力计算

参考《建筑地基基础设计规范》,地基承载力应满足下述条件:

$$p_k \leq f_a \quad (5)$$

公式(5)中 f_a 则是地基承载力特征值,单位kPa;

$$p_k = \frac{F_k + G_k}{A} \quad (6)$$

公式(6)中, F_k 是对应标准组合时,礁体结构传至顶面的垂向力值,单位kN; G_k 是礁体自重,单位kN; A 是底部接触面积,单位m²。

5. 礁体沉降量计算

参考《建筑地基基础设计规范》,礁体最终沉降量按照以下公式进行计算:

$$s = \psi_s s' = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{P_{oi}}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (7)$$

在计算礁体稳定性时,利用公式(3)和(4)来计算,我们定义公式的右式/左式=S,那公式(3)和(4)可以变形为如下公式:

$$S_m = \frac{(\gamma_G G - \gamma_u P_u) f}{\gamma_0 \gamma_{\omega} F_{\omega}} \quad (8) \quad S_o = \frac{\frac{1}{\gamma_d} \gamma_G M_G}{\gamma_0 (\gamma_{\omega} M_{\omega} + \gamma_u M_u)} \quad (9)$$

3. 结果分析

3.1 水动力计算结果

根据珠海外伶仃海域的建设条件及可能出现的极端情况和《广东省人工鱼礁建设技术规范(试行)》,使用25年一遇1%波高产生的流速:表层最大流速约为2.0 m s⁻¹,中层流速约为1.5 m s⁻¹,底层流速约为1.2 m s⁻¹,平常风浪情况下潮流站最大流速可约为0.4 m s⁻¹。因此设置了四组流速条件(0.4、1.2、1.5、2.0 m s⁻¹)来进行接下来的研究工作。

在四组不同的流速条件下,礁体受到的水动力也是不同的,流速越大,礁体受到的水动力也越大。当流速达到2.0 m s⁻¹时,两种礁体受到的水动力也达到最大,最大水动力值约38287 N。在相同流速的情况下,2号礁体受到的水动力均大于1号礁体。

3.2 抗滑移稳定性计算结果

两种礁体的抗滑移系数是随着流速的增大而减小。在流速小于1.5 m s⁻¹时,两种礁体的抗滑移系数均大于1,这说明两种礁体均不会发生滑移;但当流速达到2.0 m s⁻¹时,两种礁体的抗滑移系数都要小于1,这说明礁体在此时的流速条件下是会移动。对比相同流速的情况下结果可以发现,2号礁体的抗滑移系数均要大于1号礁体,这说明2号礁体的整体抗滑移能力是要强于1号礁体的。

3.3 抗倾覆稳定性计算结果

与抗滑移结果相同的是,两种礁体的抗倾覆系数也都是随着流速的增大而减小。不同的是,在四组流速情况下两种礁体的抗倾覆系数都大于1,这说明本文选取的两种礁体,在2.0 m s⁻¹流速的极端情况下会发生移动,但是不会发生倾覆、翻滚的情况。同样的,在相同流速的情况下,2号礁体的抗倾覆系数均要大于1号礁体,这说明不管在什么情况下2号礁体的抗倾覆能力均要强于1号礁体。

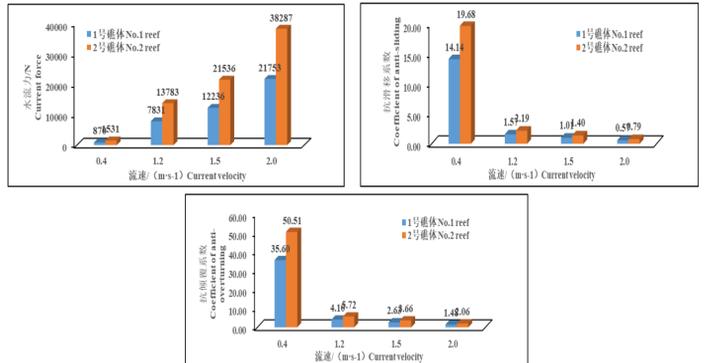


图2 四种流速条件下水动力、抗滑移和抗倾覆稳定性结果对比

3.4 礁体稳定性分析

本文采用了一种箱型框架结构礁体(1号礁体)和一种梯形框架结构礁体(2号礁体),在珠海外伶仃海域开展了本次的研究工作,计算结果与陈勇康在珠海万山海域的3种框架箱型结构的结果进行了比较分析。

五种礁体对比,本文2号礁体受到的水动力是最大的,但抗滑移和抗倾覆系数也比较大。本文1号礁体的水动力结果与陈勇康的2号礁体的结果相近,两种礁体设计结构相似水下重量也相当,但本文1号礁体的稳定性结果比他的2号礁体的结果偏小一些,是因为本文1号礁体高了0.5 m。他的另外两种礁体内部结构相对复杂,水下重量也较大,所以稳定性结果相对更好一些,复杂的内部结构有利于生物的附着和栖息,但制作也相对复杂、制作成本和难度较高,不利于大规模推广。

本文的两种礁体虽然整体结构不同,但水下质量相差不多(7%)。在相同流速情况下,2号礁体的迎流面积较大,水动力要明显大于1号礁体,但2号礁体的抗滑移系数和抗倾覆系数均要大于1号礁体,这得益于其独特的梯形结构。

1号礁体设计高大,为沉降预留了高度,同时礁体结构复杂内部空间较大,可在内部形成复杂的流态,为鱼类等停留、栖息、避敌等提供了较大的空间,2号礁体独有的梯形结构虽然减小了空方量,但带来了较高的稳定性和较强的流场效应,同时还能用于藻类移植,为其他生物提供饵料和庇护场所。

两种礁体在功能定位上各有优劣,但可以优势互补,在外伶仃海域选择这两种礁体混合投放可以增加投放人工鱼礁的类型和数量,增大礁群的密度,同时也会让礁区流态更加复杂,提高集鱼效果。

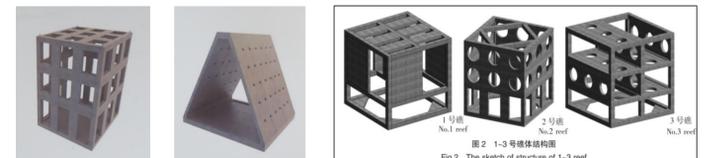


图3 1-3号礁体结构图

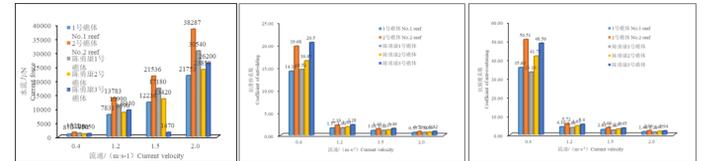


图4 3种礁体计算结果对比

3.5 地基承载力、沉降分析

为了减小礁体底面压力,本文两种礁体底面除了四周的梁柱为20 cm×20 cm,其他部分全部为10 cm厚的钢筋混凝土板(减轻水下重量),礁体底面还加设了混凝土板(增大底面积),以便降低礁体的沉降量。计算结果(表1)表明本文两种礁体的地基承载力和沉降量均满足要求且小于陈勇康的结果。

礁体参数	水下重量/N	地基承载力/kPa	沉降量/mm
1号礁体	65520	7.28	109
2号礁体	60883	4.97	74
陈勇康1号礁体	79810	17.8	320
陈勇康2号礁体	70640	15.6	280
陈勇康3号礁体	96680	21.3	380

4. 结论

对于形状相似的礁体,水动力和礁体水下重量对礁体的抗滑移和抗倾覆性能有着重要的影响:减小礁体迎流面积,可以减小其受到的水动力,但减小太多到影响礁体自重时,可能会影响礁体在极端情况下的抗滑移和抗倾覆能力,增大礁体自重可以提高其稳定性,但也意味着沉降风险增加。

当礁体水下质量相当时,梯形框架结构礁体虽然受到的水动力较大,却能提供比箱型框架结构礁体更高的稳定性以及更强的流场效应,箱型框架结构礁体能够提供更大的内部空间,为生物提供更多栖息和避难的场所。

在流速达到1.5 m s⁻¹的极端情况下,礁体的抗滑移系数最小为1.01,抗倾覆系数最小为2.63,礁体在实际投放后均会发生不同程度的沉降,这会进一步提高礁体的稳定性。

致谢

本研究由南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)项目(SML2023SP237)、广东省重点领域研发计划项目(2020B1111030002)、中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2023TD06)资助,对所有提供支撑和帮助方均表示感谢。

展望

本文两种礁体的稳定性、地基承载力及最终沉降量计算结果均能满足外伶仃海域的投放需求,但这些结果是基于理论公式和勘察报告中的采样点的数据计算得来,并不能代表整个投放海域的实际情况,再加上礁体受到波浪和潮汐的往复作用,会导致理论计算结果与海域实际情况存在较大的差异。下一步的研究将参考相关文献开展人工鱼礁物理模型试验,以便对本文计算结果进行验证和修正。