

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230417001

文章编号: 1672-9331(2023)04-0020-07

引用格式: 柳叶, 穆言, 李绍武. 礁冠对珊瑚礁不规则波演变影响的数值模拟研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(4): 20-26.

Citation: LIU Ye, MU Yan, LI Shaowu. Numerical study on the effect of reef crest on the evolution of irregular waves over coral reefs [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(4): 20-26.

礁冠对珊瑚礁不规则波演变影响的数值模拟研究

柳叶, 穆言, 李绍武

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:【目的】研究不规则波作用下珊瑚礁礁冠对波高及增水的影响规律。【方法】采用非静压数值波浪模型模拟不同礁坪静水深、波高、谱峰周期的多组工况, 对比礁冠存在与不存在时波浪空间演化的差异。【结果】礁冠存在时, 礁缘附近破波区变窄, 波浪破碎强度显著增强, 礁坪末端波高变小, 增水高度变大; 礁冠对礁坪末端波高和增水的影响随礁坪静水位的升高先增强后减弱, 礁坪静水位为低水位和高水位时礁冠的影响较小, 为中等水位时礁冠的影响较大; 礁冠存在时, 礁坪末端波高和增水高度随入射波波高及谱峰周期的增加而增大。【结论】礁冠通过改变礁缘附近波浪的破碎过程影响礁坪末端的波高与增水, 其影响程度与礁坪静水位密切相关。本文研究成果可为珊瑚礁海岸防灾减灾提供参考。

关键词: 珊瑚礁; 礁冠; 波浪破碎; 增水; 防灾减灾

中图分类号: P753

文献标志码: A

0 引言

珊瑚礁广泛分布于热带和亚热带海域, 是集生态资源、环境调节和国土安全于一体的重要海洋系统。波浪作为主要水动力因素, 在珊瑚生长、珊瑚砂运动、礁后陆域安全等方面有着重要的作用^[1-3]。

珊瑚礁海岸地形包括陡峭礁前坡和平缓礁坪, 礁上的波浪演变过程与大陆岸滩的差异较大^[4]。礁缘附近波浪剧烈破碎并耗散大量的能量, 破碎后的波浪在礁坪上向海岸传播一定距离后恢复到非破碎形态, 此时波高受礁坪平均水深的控制^[5]。虽然珊瑚礁对海岸起到了一定的掩护作用, 但礁上破波过程中产生的增水高度显著高于一般大陆岸滩的水位, 珊瑚礁海岸可能面临更为严重的洪涝灾害风险^[6-7]。

波浪演变规律是珊瑚礁水动力方向的研究热点。GOURLAY^[5, 8]以澳大利亚 Hayman 岛珊瑚礁为原型设计了物理模型试验, 研究了规则波的破

碎及传播特性, 提出了判断波浪破碎形态的无量纲参数和最大增水高度公式。张庆河等^[9]将珊瑚礁简化为台阶地形, 研究了水深陡变时的波浪破碎规律。诸裕良等^[10]探究了规则波在复合坡度珊瑚礁地形上的破碎特性, 并指出深水波高与礁边水深是影响波浪破碎形态、破碎位置及破波带宽度的主要因素。姚宇等^[11]通过开展波流模型试验, 总结了在潮汐流影响下珊瑚礁规则波增水高度的变化规律, 发现正向流使增水高度降低, 反向流使增水高度增加。李绍武等^[12]通过开展不规则波试验检验了基于规则波的 Gourlay 增水公式, 发现将有效波高和谱峰周期作为代表波要素时, 该公式能较好地预测礁坪最大增水高度。

以上研究普遍将珊瑚礁地形简化为由平直礁前坡和水平礁坪组成的概化地形。然而, 部分天然珊瑚礁在礁前坡和礁坪相接的礁缘处存在一个隆起的礁冠^[4]。国内仅姚宇等^[13-14]通过模型试验研究了礁冠对规则波的影响, 但尚未开展礁冠对不规则波影响的研究。

非静压模型是近年来模拟珊瑚礁水动力时常

收稿日期: 2023-04-17; 修回日期: 2023-05-23; 接受日期: 2023-05-23

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(22JCQNJC00660); 国家自然科学基金资助项目(52201333)

通信作者: 柳叶(1990—)(ORCID: 0000-0001-8993-7315), 男, 副研究员, 主要从事珊瑚礁水动力方面的研究。

E-mail: liuye2009@tju.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

用的相位解析模型,这类模型分层求解雷诺时均方程,使用沿水深积分的连续性方程和运动学边界条件追踪自由表面,具有较高的模拟精度和计算效率。本文拟基于非静压数值波浪模型研究礁冠对不规则波波高和礁坪增水的影响,重点探讨在不同的礁坪静水深条件下礁冠影响程度的变化规律。

1 数值模型及验证

1.1 模型介绍

采用TU Delft开发的非静压模型SWASH^[15],将水压力分解为静水压力和非静水压力两部分,结合Keller-Box格式处理垂向压力梯度,使模型在较少垂向分层(1~3层)时即具有较高的色散和非线性精度。该模型已被广泛应用于珊瑚礁水动力模拟中^[16-18]。

垂向二维形式控制方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(p_h + p_{nh})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_{nh}}{\partial z} + \frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

式中: t 为时间; x 和 z 分别为水平、垂直方向坐标; u 和 w 分别为水平和垂向速度; ρ 为水体密度; p_h 和 p_{nh} 分别为静压和非静压项; τ 为紊动切应力。

1.2 模型验证

本文采用YAO等^[17]开展的规则波和柳叶^[16]开展的不规则波试验资料验证SWASH数值模型对波浪在珊瑚礁上传播变形的模拟能力。

1.2.1 规则波

YAO等^[17]在南洋理工大学波浪水槽中开展规则波模型试验,研究了礁冠的存在对波浪传播变形和礁坪增水的影响。该试验设置参数如下:礁前坡度为1:6,礁坪宽度为7.00 m,礁缘附近设置长0.50 m、高0.05 m的矩形礁冠,礁坪末端放置吸波箱避免岸线反射,如图1(c)所示。本研究选取YAO等^[17]公开展示的case2,其试验条件为:入射波波高为0.095 m,谱峰周期为1.25 s,礁坪静水深为0.10 m。

规则波数值模拟的地形参照上述物理模型设置,左边界使用弱反射边界条件,右边界设置海绵层。垂直方向将流体等分为两层, x 方向计算网格尺寸为0.02 m。

图1展示了在规则波作用下有效波高和增水的试验值与SWASH模型模拟值的对比情况。受礁冠的影响,礁前波浪反射显著,入、反射波面叠加后的波高呈空间规则波动形态。礁冠附近波浪剧烈破碎,波高快速衰减,同时平均水位迅速抬升。由于试验及数值模拟时波浪水槽空间封闭,礁坪增水必然引发礁前水位整体下降。破波后增水模拟值整体略低于试验值,这是因为非静压模型采用单值函数追踪自由表面,忽略了破波水滚,因而低估了波浪破碎过程中的辐射应力^[18]。在礁坪上,受高阶自由谐波和一阶谐波相位叠加的影响,波高沿礁波动,但增水高度保持稳定。总体而言,SWASH模型较为精确地再现了规则波的沿礁演变过程,在礁冠地形陡变处也具有较好的数值稳定性。

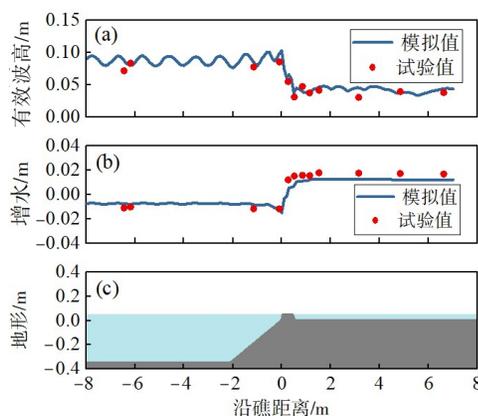


图1 规则波试验验证SWASH模型

Fig. 1 Validation of SWASH model against the regular-wave experiment

1.2.2 不规则波

柳叶^[16]在天津大学波流水槽中开展了不规则波模型试验,研究了礁坪上海堤越浪的规律。该试验设置礁前坡度为1:5,礁坪宽度为6.00 m,如图2(c)所示。该试验分为礁坪末端放置海堤和吸波箱两个系列,后者的主要任务是获取堤前入射波浪的条件。由于本文研究暂不涉及珊瑚礁海岸或海堤的影响,所以采用礁坪末端放置吸波箱的一组试验资料,该试验条件为:Jonswap谱有效

波高为 0.06 m, 谱峰周期为 1.5 s, 礁坪静水深为 0.045 m。

不规则波数值模拟的地形参照上述物理模型设置, 左边界使用弱反射边界条件和二阶非线性造波, 右边界设置海绵层和辐射边界条件。垂直方向将流体等分为两层, x 方向的计算网格尺寸为 0.02 m。采用谱方法计算有效波高 H_s , 计算式如下:

$$H_s = 4 \sqrt{\int_0^{\infty} P(f) df} \quad (4)$$

式中: $P(f)$ 为波谱密度; f 为频率。

图 2 展示了在不规则波作用下波高和增水的试验值与 SWASH 模型模拟值的对比情况。由图 2 可以看出, 模拟值与试验值吻合良好, 表明 SWASH 模型可以精确地模拟不规则波在礁前坡的浅化, 以及在礁坪上破波能量的耗散过程。

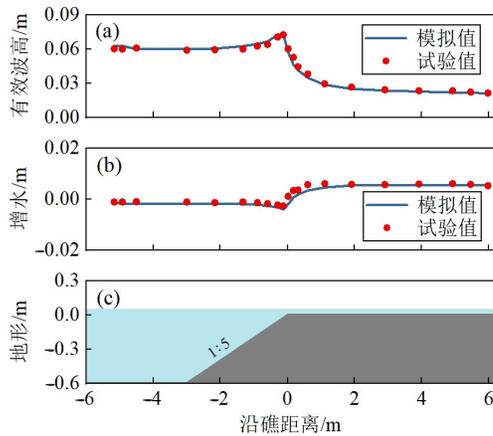


图 2 不规则波试验验证 SWASH 模型

Fig. 2 Validation of SWASH model against the irregular-wave experiment

2 模型应用

2.1 模型设置

参照姚宇等^[14]开展的试验, 本研究模型设置如下: 礁前坡度为 1:6, 礁坪宽度为 7.00 m, 礁冠宽为 0.50 m、高为 0.05 m, 将礁前水深调整到 1.00 m, 如图 3 所示, 图中 h_r 为礁坪静水深。造波边界采用弱反射边界条件和非线性造波, 礁坪末端设置海绵层和辐射边界条件。与模型验证时设置一致, 垂向等分为两层, x 方向网格尺寸为 0.02 m。

本研究数值模拟考虑三个组次(表 1), 组次 A

对比在不同礁坪静水深条件下礁冠的存在与否对波高、增水的影响; 组次 B 和 C 研究礁冠存在且礁坪静水深 $h_r=0.10$ m 时, 礁坪末端 ($x=7.00$ m) 波高和增水随入射有效波高 H_s 、谱峰周期 T_p 的变化。入射波采用 Jonswap 谱型, 谱峰因子为 3.3。每次模拟 550 个波, 取后 500 个波进行分析。

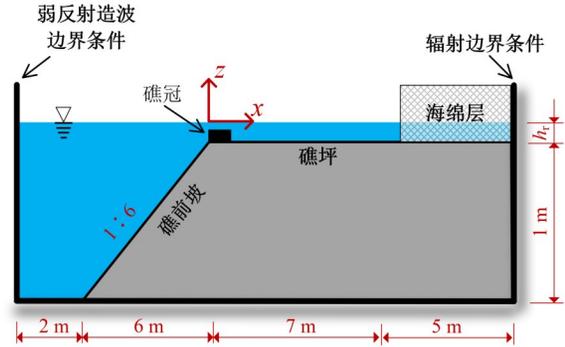


图 3 数值模拟区域

Fig. 3 Sketch of the numerical domain

表 1 数值模拟方案

Table 1 Test conditions of the numerical simulations

组次	h_r/m	有无礁冠	H_s/m	T_p/s
A	0.05~0.20	无	0.10	1.5
	0.05~0.20	有	0.10	1.5
B	0.10	有	0.06~0.14	1.5
C	0.10	有	0.10	1.0~2.0

2.2 模拟结果分析

2.2.1 不同水位时礁冠的影响

图 4 对比了 4 种礁坪静水深 ($h_r=0.05$ 、0.10、0.15、0.20 m) 条件下, 礁冠对有效波高和增水沿礁变化的影响, 图 4(i)~4(l) 为珊瑚礁地形。其中, $h_r=0.05$ m 时静水位与礁冠顶高程一致, 造波过程中, 礁坪增水导致礁前平均水位下降, 礁冠前沿实际静水位低于礁冠顶高程, 造成了较强的波浪反射, 如图 4(a) 所示, 并引起礁冠顶部壅水, 如图 4(e) 所示。相较于无礁冠的情形, 当 $h_r=0.05$ m 时礁冠造成破波区宽度显著下降, 波浪破碎仅发生在礁冠上方且更为剧烈, 但礁冠对破波后的波高与增水影响较小。

随着礁坪静水深的增大 ($h_r=0.10$ 、0.15 m), 有礁冠的珊瑚礁破波区宽度未见明显变化, 破波过程仍局限于礁冠区域, 波浪离开礁冠后进入水深更大的礁坪时停止破碎。相较于无礁冠的情况,

礁冠使礁坪波高变小,增水高度变大。当 $h_r=0.15$ m时礁冠对波高的影响程度较大,但当 $h_r=0.10$ m时礁冠对增水的影响程度更大。随着礁坪静水深进一步增大($h_r=0.20$ m),礁冠对波高和增水的影响相应减弱。

图5汇总了 h_r 为0.05~0.20 m(组次A)且礁冠

存在时礁坪末端波高和增水相较于无礁冠的变化情况。由图5可知,礁坪静水位为低水位和高水位时,礁冠对波高和增水的影响都比较小,为中等水位时礁冠的影响最大。另外,礁冠对波高影响最大的水位与对增水影响最大的水位并不一致,在相对较低水位条件下,礁冠对波高的影响更大。

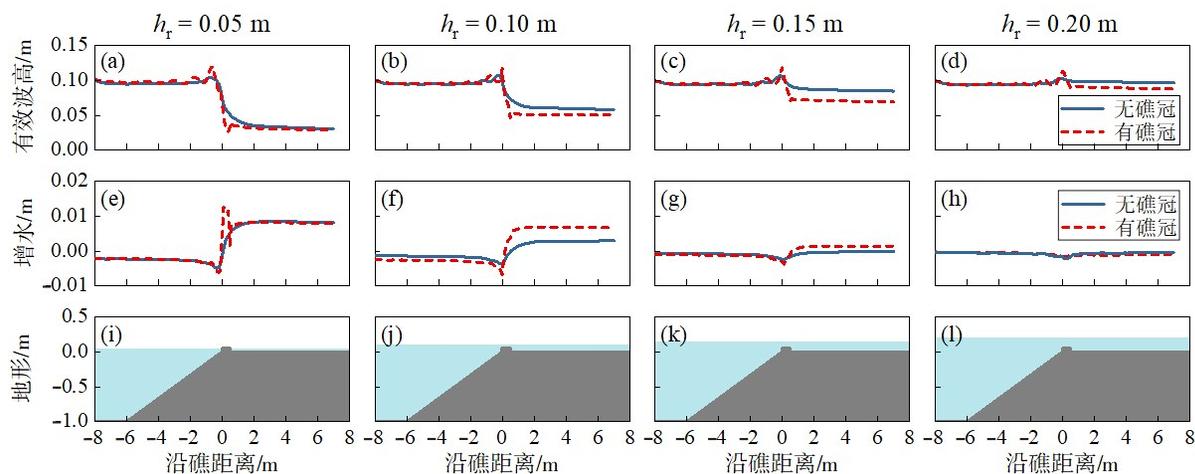


图4 不同礁坪静水深条件下礁冠对波高、增水沿礁变化的影响

Fig. 4 Influences of the reef crest on cross-reef variations of wave height and setup under different still water depths over the reef flat

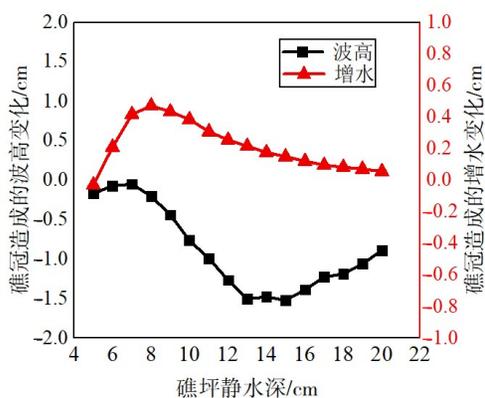


图5 不同礁坪静水深时礁冠对礁坪末端波高和增水的影响

Fig. 5 Changes of the wave height and setup at the reef end induced by the presence of the reef crest under different still water depth conditions

2.2.2 礁坪波高、增水随入射波波况的变化

图6展示了组次B的模拟结果,在礁坪静水深 $h_r=0.10$ m、谱峰周期 $T_p=1.50$ s的条件下,带礁冠的珊瑚礁礁坪末端($x=7.00$ m)波高和增水随入射波波高的增大而增大。图7展示了组次C的模拟结果,礁坪末端波高和增水随入射波周期的增加而变大。这是因为入射波波能流正比于 $H_s^2 T_p$ 。图6、图7结论与姚宇等^[14]规则波的试验结果一致。

2.2.3 增水无量纲分析

姚宇等^[14]指出,规则波条件下礁坪最大增水高度 $\bar{\eta}_r$ 受礁冠的淹没深度 h_c 的控制,并发现相对增水高度 $\bar{\eta}_r/T\sqrt{gH_0}$ 与礁冠相对淹没深度 $(h_c + \bar{\eta}_r)/H_0$ 呈线性关系,其中 H_0 、 T 分别为规则波波高与周期, g 为重力加速度。

图8展示了本研究礁冠地形上增水模拟值的无量纲分析结果(图中圆圈中的数据为偏离拟合直线的数据)。其中,相对增水高度和礁冠相对淹没深度计算中采用了有效波高 H_s 和谱峰周期 T_p ,即相对增水高度为 $\bar{\eta}_r/T_p\sqrt{gH_s}$,礁冠相对淹没深度为 $(h_c + \bar{\eta}_r)/H_s$ 。从波能流的角度,不规则波的均方根波高 H_{rms} 与规则波波高 H_0 等价。假定礁前入射波波高服从瑞利分布,即 $H_s=1.414H_{rms}$,采用 H_s 的分析结果不失一般性。由图8可知,当礁冠相对淹没深度为0.4~1.1时,相对增水高度与礁冠相对淹没深度呈线性关系,这与姚宇等^[14]的研究结果一致。但当礁冠相对淹没深度小于0.4时,相对增水高度有所下降,这可能与在礁坪静水深较浅时矩形礁冠显著增大礁前波浪反射率有关^[8]。在礁

坪静水位为高水位时($\bar{\eta}_y/T_p\sqrt{gH_s}>1.2$),礁上相对增水高度很小,且偏离了所拟合的直线。

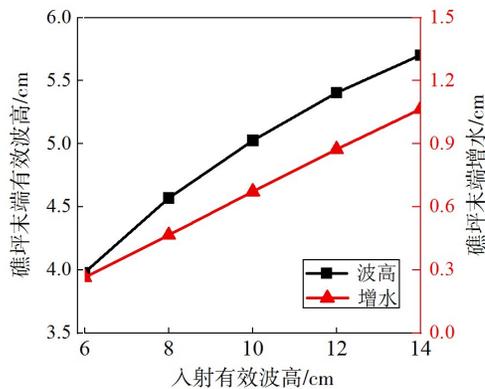


图6 礁冠存在时礁坪末端($x=7.00$ m)波高和增水随入射波波高的变化

Fig. 6 Variations of the significant wave height and setup at the reef end ($x=7.00$ m) with respect to significant wave height of the incident waves with the presence of a reef crest

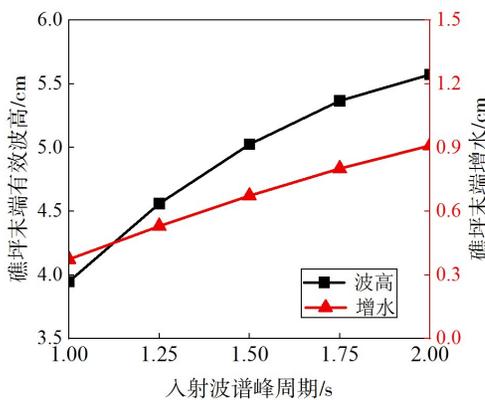


图7 礁冠存在时礁坪末端($x=7.00$ m)波高和增水随入射波周期的变化

Fig. 7 Variations of the significant wave height and setup at the reef end ($x=7.00$ m) with respect to the peak period of incident waves with the presence of a reef crest

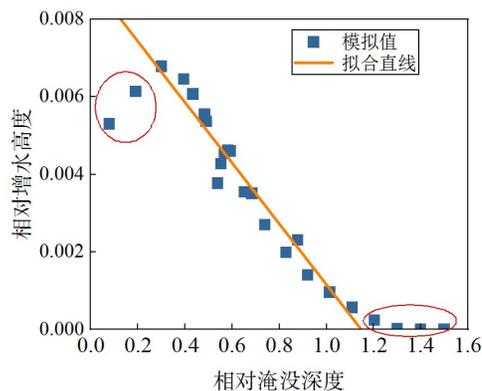


图8 礁冠存在时相对增水高度随礁冠相对淹没深度的变化

Fig. 8 Variations of relative wave setup with relative submergence of the reef-crest

3 讨论

本研究采用非静压数值模拟方法,在姚宇等^[13-14]规则波模型试验的基础上,进一步研究礁冠对不规则波演变的影响,重点关注不同礁坪静水深下礁冠对波高、增水沿礁变化的影响程度。

与姚宇等^[13-14]的研究结果一致,礁冠降低了礁坪末端波高,同时抬升了增水高度。本研究进一步发现,在礁坪水位为中等时礁冠对波高、增水的影响最大,在礁坪为浅水或深水时礁冠的影响较小,这可能与礁冠对礁缘附近波浪破碎过程的作用相关。礁坪静水深较大时,礁冠高度相对于礁坪静水深较小,从而对波浪传播的影响也较小。礁坪静水深较小时,波浪在礁冠上剧烈破碎,离开礁冠进入礁坪,礁坪水深增大,此时波高仍然大于礁坪上允许的最大波高,波浪将进一步在礁坪上衰减,最终礁坪波高由当地礁坪水深决定,与无礁冠的情况类似,因而礁冠的影响较小。礁坪静水深为中等水位时,波浪离开浅水礁冠进入水深相对较深的礁坪时,波高可能已经小于礁坪允许的最大波高,波浪停止破碎,此时礁坪波高受礁冠顶部水深的控制,礁冠的影响比较显著。

虽然礁冠降低了礁坪波高,但也抬升了礁坪的平均水位。因此,礁冠的存在是否降低了珊瑚礁海岸洪涝灾害的风险,还有待进一步研究。

4 结论

本文通过非静压数值模型SWASH研究了珊瑚礁礁冠附近波浪传播变形特征及礁冠对礁坪末端波高、增水的影响规律,得出以下结论:

1) 受礁冠的影响,珊瑚礁前反射波更为显著,与入射波叠加后的波高沿程波动,礁冠增强了波浪破碎程度,但减小了破波区宽度。

2) 礁冠存在时,礁坪末端波高降低、增水高度增加;礁冠的影响与礁坪静水深有关,在礁坪静水深为中等水位时礁冠的影响较大,为低水位和高水位时礁冠的影响较小。

3) 礁冠存在时,礁坪末端波高和增水高度随入射波波高和周期的增大而增大。

[参考文献]

- [1] STORLAZZI C D, OGSTON A S, BOTHNER M H, et al. Wave- and tidally-driven flow and sediment flux across a fringing coral reef: southern Molokai, Hawaii [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24 (12): 1397-1419. DOI: 10.1016/j.csr.2004.02.010.
- [2] HOEKE R K, MCINNES K L, KRUGER J C, et al. Widespread inundation of Pacific Islands triggered by distant-source wind-waves [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 108: 128-138. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.06.006.
- [3] GAO J L, ZHOU X J, ZANG J, et al. Influence of offshore fringing reefs on infragravity period oscillations within a harbor [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 158: 286-298. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.006.
- [4] 姚宇. 珊瑚礁海岸水动力学问题研究综述[J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 139-152. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.01.014.
YAO Yu. A review of the coral reef hydrodynamics [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 139-152. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.01.014.
- [5] GOURLAY M R. Wave transformation on a coral reef [J]. *Coastal Engineering*, 1994, 23 (1-2): 17-42. DOI: 10.1016/0378-3839(94)90013-2.
- [6] KAWASAKI K, KIKU M, SASADA Y. Numerical and experimental study on wave deformation and overtopping around vertical seawall in coral reef sea area [C]// *Proceedings of the Eighteenth (2008) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Canada: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2008: 698-705.
- [7] LIU Y, LI S W, LIAO Z L, et al. Physical and numerical modeling of random wave transformation and overtopping on reef topography [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 108390. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108390.
- [8] GOURLAY M R. Wave set-up on coral reefs. 1. Set-up and wave-generated flow on an idealised two dimensional horizontal reef [J]. *Coastal Engineering*, 1996, 27 (3/4): 161-193. DOI: 10.1016/0378-3839(96)00008-7.
- [9] 张庆河, 刘海青, 赵子丹. 波浪在台阶地形上的破碎 [J]. *天津大学学报*, 1999, 32(2): 204-207.
ZHANG Qinghe, LIU Haiqing, ZHAO Zidan. Wave breaking on a submerged step [J]. *Journal of Tianjin University*, 1999, 32(2): 204-207.
- [10] 诸裕良, 宗刘俊, 赵红军, 等. 复合坡度珊瑚礁地形上波浪破碎的试验研究 [J]. *水科学进展*, 2018, 29(5): 717-727. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.05.012.
ZHU Yuliang, ZONG LiuJun, ZHAO Hongjun, et al. Experimental study of waves breaking over coral reef topography of a composite slope [J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29 (5): 717-727. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.05.012.
- [11] 姚宇, 唐政江, 杜睿超, 等. 潮汐流影响下珊瑚岛礁附近波浪传播变形和增水试验 [J]. *水科学进展*, 2017, 28 (4): 614-621. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.04.016.
YAO Yu, TANG Zhengjiang, DU Ruichao, et al. Laboratory study of wave transformation and wave-induced setup over reef islands under the effect of tidal current [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(4): 614-621. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.04.016.
- [12] 李绍武, 胡传越, 柳叶. 不规则波在岸礁地形增水变化规律试验 [J]. *水科学进展*, 2019, 30(4): 581-588. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.04.013.
LI Shaowu, HU Chuanyue, LIU Ye. Experimental investigation on set-up of irregular waves over fringing reef flat [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(4): 581-588. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.04.013.
- [13] 姚宇, 杜睿超, 蒋昌波, 等. 礁冠宽度对珊瑚礁坪波浪增水影响的实验研究 [J]. *海洋通报*, 2017, 36 (3): 340-347. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2017.03.013.
YAO Yu, DU Ruichao, JIANG Changbo, et al. Experimental study of the effect of reef-crest width on wave-induced set-up over the reef flat [J]. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36 (3): 340-347. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2017.03.013.
- [14] 姚宇, 袁万成, 杜睿超, 等. 岸礁礁冠对波浪传播变形及增水影响的实验研究 [J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(6): 19-25. DOI: 10.11978/2015031.
YAO Yu, YUAN Wancheng, DU Ruichao, et al. Experimental study of reef crest's effects on wave transformation and wave-induced setup over fringing reefs [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34 (6): 19-25. DOI: 10.11978/2015031.
- [15] ZIJLEMA M, STELLING G, SMIT P. SWASH: an operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters [J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(10): 992-1012. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2011.05.015.
- [16] 柳叶. 珊瑚礁地形上波浪传播及直立堤越浪研究 [D]. 天津: 天津大学, 2019. DOI: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2019.000051.
LIU Ye. Study on wave transformation and overtopping at vertical seawalls on coral-reef topography [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. DOI: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2019.000051.
- [17] YAO Y, HUANG Z H, MONISMITH S G, et al. 1DH Boussinesq modeling of wave transformation over

- fringing reefs[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 47: 30–42. DOI:10.1016/j.oceaneng.2012.03.010.
- [18] LOWE R J, ALTOMARE C, BUCKLEY M L, et al. Smoothed particle hydrodynamics simulations of reef surf zone processes driven by plunging irregular waves [J]. *Ocean Modelling*, 2022, 171: 101945. DOI: 10.1016/j.ocemod.2022.101945.

Numerical study on the effect of reef crest on the evolution of irregular waves over coral reefs

LIU Ye, MU Yan, LI Shaowu

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: [Purposes] An investigation of the influences of reef crest on the wave height of irregular waves and wave setup over the reef flat is reported in this paper. [Methods] A non-hydrostatic numerical wave model was used to simulate a series of test cases under different still water depths over the reef flat, wave heights, and wave periods, and to compare the difference of wave evolution process in the presence and absence of a reef crest. [Findings] Results showed that, the depth reduction under the presence of reef crest caused significant enhancement to the wave breaking intensity at the reef edge while shortening the width of the surf zone; the reef crest caused a decrease in the wave height and an increase in the wave-induced setup at the reef end; the effects of the presence of a reef crest to the wave height and wave-induced setup at the reef end first increase and reaches a maximum with increasing reef flat water depth, before begin to decrease; with the presence of reef crest, the wave height and setup at the end of the reef increased with incident wave height and spectral period. [Conclusions] The reef crest influences the wave height and setup at the end of the reef flat by altering the wave-breaking process near the reef edge, and the degree of influence is closely related to the still water depth (tide level) of the reef crest; the results of this paper can provide a reference for coral reef coastal disaster prevention and mitigation.

Key words: coral reef; reef crest; wave breaking; wave-induced setup; disaster prevention and mitigation

Manuscript received: 2023-04-17; **revised:** 2023-05-23; **accepted:** 2023-05-23

Foundation item: Project (22JCQNJC00660) supported by the Natural Science Foundation of Tianjin; Project (52201333) supported by the National Natural Science Foundation of China

Corresponding author: LIU Ye (1990—) (ORCID: 0000-0001-8993-7315), male, associate research fellow, research interest: hydrodynamic of coral reefs. E-mail: liuye2009@tju.edu.cn

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:许从昊)