

大糙率礁面影响下珊瑚礁海岸附近规则波演化及爬高试验研究*

贾美军¹ 姚 宇^{1, 2①} 何天城¹ 郭辉群¹

(1. 长沙理工大学 水利工程学院 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室 长沙 410114)

摘要 本文通过波浪水槽试验研究了大糙率礁面影响下波浪沿礁的演化和爬高规律, 测试了一系列规则波工况并对比了光滑礁面和粗糙礁面的情况。结果分析表明: 二次谐波是礁坪上透射波的重要组成部分, 粗糙礁面使主频波和二次谐波减小, 对更高阶波的影响不显著; 相对礁坪水深是描述礁坪上波浪透射的关键参数, 礁面从光滑变为粗糙时海岸附近透射系数显著减小, 能量衰减系数平均增大了 8%, 但礁前反射系数与礁面糙率之间无明显关系; 礁后岸滩爬高随着透射波高的增大而增长, 最后拟合了本文试验条件下珊瑚礁大糙率礁面预测规则波爬高的关系式。

关键词 糙率; 高次谐波; 波浪爬高; 规则波; 珊瑚礁

中图分类号 TV139.2 **doi:** 10.11693/hyhz20200100022

珊瑚礁作为一种独特的生物海岸地貌形态, 主要由靠近外海的礁前斜坡和与海岸相连的水平礁坪组成。当波浪由远海传播至珊瑚礁面, 由于礁前斜坡处地形的急剧变化, 波浪发生浅水变形作用, 波形变陡, 波高增大, 在礁缘附近发生波浪破碎, 破碎在礁坪上持续一段距离后重新生成稳定的波浪向海岸传播(姚宇, 2019)。珊瑚礁礁面糙率比沙质岸滩高出 1—2 个数量级(Lowe *et al.*, 2005), 重新生成的波浪由于摩擦而持续衰减, 到达海岸线附近的波浪几乎可以忽略不计, 因此珊瑚礁是保护海岸线的天然屏障。同时, 相关研究表明, 波浪在珊瑚礁地形上发生浅化作用和破碎的同时, 波浪能量分别向高频和低频区间转移, 导致礁坪上的波谱变宽, (Brander *et al.*, 2004)。

目前, 国内外有关波浪与珊瑚礁地形相互作用问题的物理模型试验研究中, 珊瑚礁礁面大多采用概化的光滑材料制成。文献中仅有 Quiroga 等(2013)通过在概化的珊瑚礁光滑表面添加均匀长方体木条来模拟粗糙工况, 研究了礁面糙率对孤立波沿礁的

传播、破碎、能量衰减以及在礁坪上产生涌波的影响。Buckley 等(2016)在物理模型试验中采用在礁面上布置均匀小方块体的方法来模拟礁面粗糙度, 探讨了粗糙礁面对波浪增水的影响。陈洪洲等(2018)通过在礁坪上涂抹粗化剂来模拟粗糙的珊瑚礁面, 研究了珊瑚礁粗糙表面对波浪非线性特征的影响。Yao 等(2018)和姚宇等(2019)采用不同排列和密度的圆柱体阵列来模拟不同礁面粗糙度, 分别研究了礁面糙率影响下珊瑚礁海岸附近孤立波和不规则波的传播变形以及在礁后岸滩上爬高的变化规律。

从目前国内外的研究现状可知, 以往的试验研究中并没有分析粗糙礁面存在下珊瑚礁海岸附近规则波的运动和礁后岸滩爬高的规律。因此本文拟通过波浪水槽试验, 采用 Yao 等(2018)使用的圆柱体阵列来模拟礁面的粗糙度, 重点探讨大糙率礁面影响下高频波的产生以及波浪的反射、透射以及能量的衰减规律。本文的成果可为进一步研究珊瑚礁海岸附近基础设施的防灾减灾问题提供一定的理论参考。

* 国家自然科学基金项目, 51979013 号, 51679014 号; 湖南省教育厅项目, 18A116 号。贾美军, 硕士研究生, E-mail: jiameijun0818@163.com

① 通信作者: 姚 宇, 硕士生导师, 副教授, E-mail: yaoyu821101@163.com

收稿日期: 2020-01-16, 收修改稿日期: 2020-05-12

1 试验设置

本物理模型试验在长沙理工大学水沙科学与水灾害防治重点实验室小波浪水槽中进行, 水槽长 $\times$ 宽 $\times$ 高分别为 $40\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.8\text{m}$, 如图 1a 所示。水槽的一端设置有推板式造波机, 另一端布置坡度为 1:8 的礁后岸滩斜坡。参考 Hench 等(2008)现场观测的原型, 采用重力相似准则, 选取几何比尺 1:20 设计概化珊瑚岸礁模型。珊瑚礁模型采用厚度 1cm 的 PVC 板搭接而成(图 1b): 礁前斜坡采用坡度为 1:6 的斜面模拟并设置在距离造波机 27.2m 处, 斜坡后接长度为 8m、距水槽底高度为 0.35m 的水平平台模拟礁坪, 整个物理模型宽度与水槽宽度保持一致。为了保证试验结果

的精确性, 用玻璃胶密封模型与水槽的间隙。

本试验参考 Yao 等(2018)使用的圆柱体木条阵列模拟生长鹿角珊瑚的珊瑚礁礁面, 整个粗糙礁面由礁前斜坡和礁坪组成, 总长 10.1m(图 1c)。单个糙率单元(圆柱体木条)直径 d 为 1cm, 高为 3.5cm, 固定于 PVC 板上预制的孔深为 1cm 的孔洞中, 故礁坪表面的实际物理糙率高度为 2.5cm, 根据试验比尺原型糙率高度为 50cm, 与 Lowe 等(2005)现场观测相符合。木条阵列采用串联的方式排列, 糙率元素间距 S 为 2.5cm, 如图 1d 所示。珊瑚礁表面粗糙度 ϕ 由柱体的分布密度来表示, 即控制体中圆柱体木条体积 V_s 占控制体总体积 V 的比例, $\phi = V_s / V$, 对于本试验设置为 $\phi = 0.126$ 。

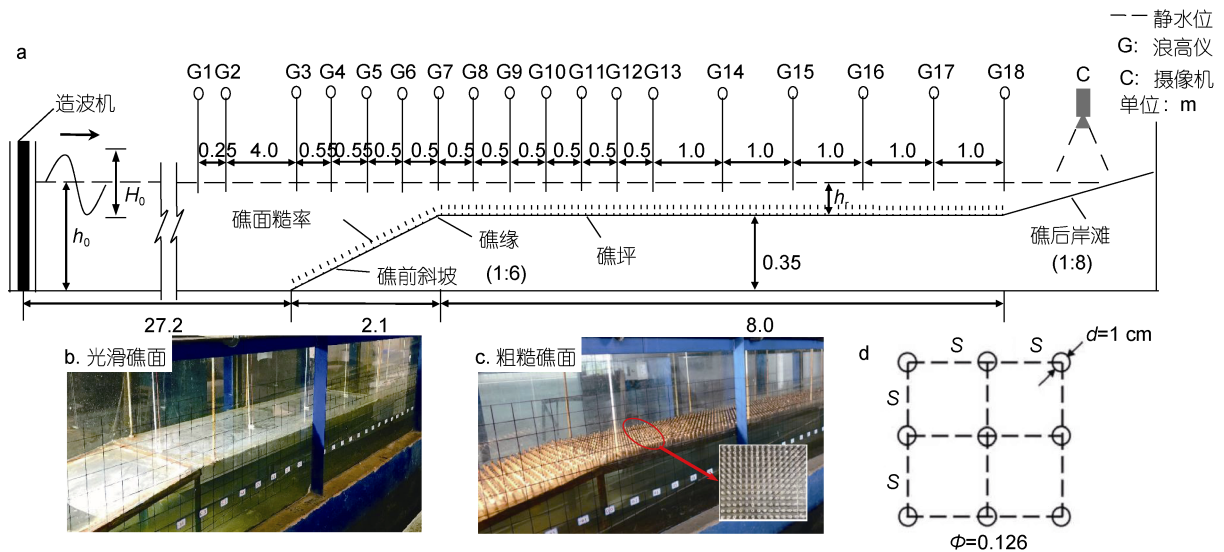


图 1 试验设置

Fig.1 The experimental setup

注: a: 总体布置图; b: 光滑礁面; c: 粗糙礁面; d: 糙率单元的排列方式; d : 圆柱体的直径; S : 圆柱体之间的间距;
 ϕ : 珊瑚礁表面粗糙度

本试验共采用 18 个电阻式浪高仪(G1—G18)来测量自由液面的沿礁变化, 具体位置如图 1 所示。其中, G1—G2 设置在礁前斜坡离岸一侧, 用于分离珊瑚礁模型前的入射波和由礁体造成的向外海传播的反射波; G3—G6 设在礁前斜坡上, 用来记录由于斜坡上的浅水效应引起的波形变化过程; G7—G18 布置在礁坪上, 用于监测波浪从礁缘到海岸线的传播变形过程。在试验过程中, 所有浪高仪同步采集数据, 采样频率设为 50Hz。为保证水槽中的波浪场达到相对稳定的状态, 采样时长为自造波机启动后连续 8min。同时, 在岸滩上方布置 1 个高速相机记录波浪

爬坡的全过程, 波浪在礁后岸滩上的爬高由斜坡上带有刻度的薄片来测定。

试验对光滑礁面($\phi=0$)和粗糙礁面($\phi=0.126$), 分别测试了 2 个礁坪水深($h_r=0.05, 0.10\text{m}$)、3 个波浪周期($T=1, 1.5, 2\text{s}$)和 5 个入射波高($H_0=0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12\text{m}$)共计 30 种组合的规则波工况。根据相似准则和前述的几何比尺 1:20(相应的时间比尺为 1:4.5), 得到岸礁原型的礁坪宽度为 160m, 相关波浪要素为 $h_r=1\text{—}2\text{m}$, $H_0=0.8\text{—}2.4\text{m}$, $T=4.5\text{—}9\text{s}$, 与现场报道(Hench *et al*, 2008)的波况范围符合。

2 结果与分析

2.1 高频波的沿礁变化

与台阶式地形类似,波浪由深海传播至浅水礁坪的过程中,由于礁前斜坡地形的剧烈变化,发生浅水变形,产生高频波。高次谐波可采用快速傅里叶变换方法(Fast Fourier Transform, FFT)对所测量的液面时间序列进行谐波分析得到。图2和图3分别展示了两种礁坪水深($h_r=0.05\text{m}$ 和 $h_r=0.10\text{m}$)下典型波况($H_0=0.08\text{m}$, $T=1.5\text{s}$)与光滑和粗糙礁面作用时总波幅(a_1)以及一到五阶各次谐波振幅(a_1-a_5)的变化规律。

图2和图3表明总波幅 a_1 沿光滑礁面和粗糙礁面变化趋势基本一致:由于波浪在礁前斜坡上的浅化作用,波形变陡, a_1 达到最大,波浪在礁缘外海一侧破碎;波浪在破碎带内能量消耗迅速,因此 a_1 沿程急剧减小,直到破碎过程结束后, a_1 在礁坪上逐渐保持不变(重新生成了行进波)。当礁面从光滑变为粗糙时,沿礁耗损的波能更多,总波幅有所降低。同时,波浪与礁前斜坡相互作用,入射波的能量明显由1阶主频波向2—5阶高次谐波转移,各次谐波的波幅(a_1-a_5)沿礁逐渐增加,并在波浪破碎点处达到最大值,此处二次谐波振幅(a_2)约为主频波幅(a_1)的一半。在破碎带内, a_1 由于能量剧烈耗散迅速降低,而2—5阶高次谐波波幅(a_2-a_5)仅略微减小。在破碎结束后的礁坪再生波带中,高次谐波特别是二次谐波的波幅在

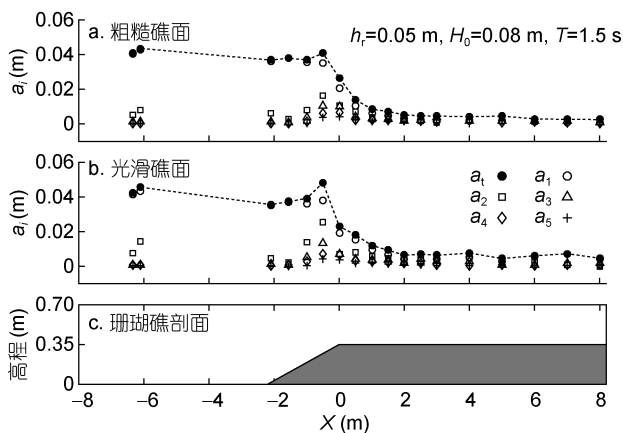


图2 光滑和粗糙礁面存在下礁坪水深 $h_r=0.05\text{m}$,入射波高 $H_0=0.08\text{m}$,波浪周期 $T=1.5\text{s}$ 时谐波振幅的沿礁变化

Fig.2 Variation in harmonic wave amplitude across both the smooth and rough reef profiles under $h_r=0.05\text{m}$, $H_0=0.08\text{m}$, $T=1.5\text{s}$

注: X 表示离礁缘的距离; a_i 为第 i 阶谐波的振幅, $i=1-5$;图3同

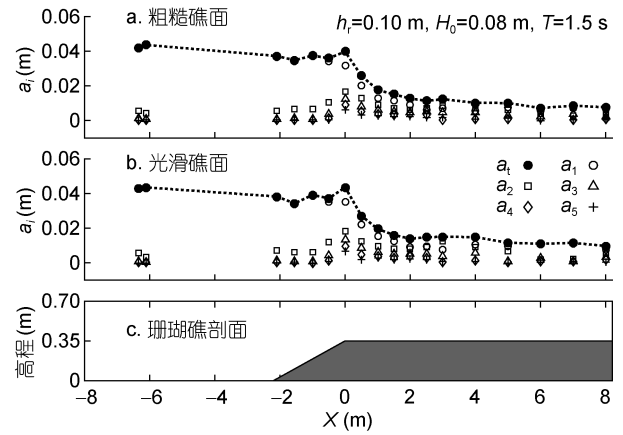


图3 光滑和粗糙礁面存在下 $h_r=0.10\text{m}$, $H_0=0.08\text{m}$, $T=1.5\text{s}$ 时谐波振幅的沿礁变化

Fig.3 Variation in harmonic wave amplitude across both the smooth and rough reef profiles under $h_r=0.10\text{m}$, $H_0=0.08\text{m}$, and $T=1.5\text{s}$

礁坪透射波中仍然是相当重要的成分。同时,对比图2和图3发现,礁坪水深增大时,礁坪上的总波幅和各次谐波的波幅均增加,这是因为水深增大减弱了礁坪上由于波浪破碎和底部摩擦损耗的能量。对于任意 h_r ,相对于光滑礁面,粗糙礁面的存在降低了礁坪上主频波和二次谐波,对更高阶波的影响不显著。

2.2 透射系数、反射系数和能量耗散系数

2.2.1 计算方法

波浪与结构物相互作用时的波浪反射和透射特征分别可以采用反射系数 K_R 和透射系数 K_T 来表述,其表达式为

$$K_R = H_R / H_I, \quad K_T = H_T / H_I, \quad (1)$$

式中, H_I 和 H_R 分别为结构物外海侧入射和反射波高, H_T 为结构物后方的透射波高。对于本试验,水槽中形成了不完全驻波,这是由于波浪在造波机、礁前斜坡和礁后岸滩间发生了多重反射造成。本文基于在G1和G2处测得的波面时间序列,通过两点法(Goda, 2000)分离得到 H_I 和 H_R 后计算 K_R 。通常计算 H_T 时,选取的是礁坪上透射波中主频波的波高,而本文3.1节结果分析说明:礁坪上透射波成分中除了主频波存在外,高次谐波也有很大比重,因此本文在计算 K_T 时,需要同时考虑主频波和高次谐波。此外,对于珊瑚礁地形,由于入射波和透射波在外海和礁坪上传播时水深(波速)不同,因此公式(1)定义的 K_T 不再适用,需要根据透射波和入射波能量流的比值来重新定义(姚宇等, 2017)

$$K_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 E_T^i C_{g,T}^i}{E_I C_{g,I}}}, \quad (2)$$

式中, E_T^i 和 E_I 分别为礁坪上第 i 阶透射谐波(精确到 5 阶)和外海侧入射波的能量密度; $C_{g,T}^i$ 和 $C_{g,I}$ 分别表示礁坪上第 i 阶透射谐波(精确到 5 阶)和外海侧入射波的波群速度; 入射波能流 $E_I C_{g,I}$ 可运用能量守恒原理由深水波能流 $E_0 C_0^g$ 进行换算, 根据线性波理论: 深水波能密度为 $E_0 = \rho g H_0^2 / 8$, 其中深水波高 H_0 由入射波高 H_1 推算, 深水波群速度为 $C_0^g = gT / 4\pi$ 。透射波总能流的计算方法为: 首先对礁坪 G18 位置测得的自由液面时间序列运用快速傅里叶变换分析得出能量谱, 然后对各次谐波对应的能量密度 E_T^i 和波群速度 $C_{g,T}^i$ 的乘积求和得到, 其中各次谐波的 $C_{g,T}^i$ 可通过色散关系求解。对于反射系数, 由于入射波和反射波在外海端传播时水深(波速)相同, 采用公式(1)波高的方法和类似于公式(2)能量流的方法定义是一致的。计算出 K_R 和 K_T 以后, 珊瑚礁海岸波浪能量耗散系数 K_D 可由垂直于海岸线的方向能量流的守恒计算得到

$$K_D = 1 - K_R^2 - K_T^2, \quad (3)$$

2.2.2 透射系数、反射系数和能量耗散系数随礁坪相对水深的变化

图 4 展示了在光滑和粗糙礁面情况下 K_R 、 K_T 和 K_D 随礁坪相对水深 (h_t / H_0) 的变化关系。图 4a 中 K_R

值均小于 0.2, 大部分工况在 0.1 以下, 表明珊瑚礁地形对波浪的反射作用较小; 同时 K_R 值随着 h_t / H_0 增加无明显规律, 数据离散程度较大, 该现象主要是因为波浪在水槽中发生了前述的多重反射造成, 类似于 Bragg 共振引起的反射系数的震荡 (Yao *et al.*, 2012)。图 4b 表明 K_T 随着 h_t / H_0 的增大呈线性增长趋势, 这是由于礁坪波浪破碎和礁床的摩阻均受水深控制, 礁坪水深越大, 破碎强度和底部摩擦损耗越小, 透射波能量越大。对比光滑和粗糙礁面两种情况发现: 在相同的 h_t / H_0 下, 粗糙礁面下的透射系数 K_T 明显小于光滑礁面下的 K_T 值。考虑到前述 K_R 较小 (K_R^2 小于 5%), 采用式(3)计算 K_D 时, 可以忽略 K_R 的影响, K_D 主要受到 K_T 的影响, 故图 4c 中两种礁面的能量耗散系数 K_D 均随着 h_t / H_0 的增大而减小, 相同 h_t / H_0 下, 粗糙礁面的 K_D 值相对于光滑礁面均显著增加, 平均增加了 8%; 对于光滑礁面而言, 当 $h_t / H_0 < 0.4$ 时, K_D 值接近于 1, 说明当 h_t 非常小时, 入射波的能量可通过波浪在礁坪上的破碎和礁坪底部的摩阻全部耗散, 礁坪上剩余的波浪能可以忽略不计; 对于粗糙礁面由于底部摩擦的增强, 大约在 $h_t / H_0 < 1.5$ 时便能达到 $K_D = 1$ 。

2.3 波浪爬高

对于传统的平底海岸, 美国海岸工程手册采用经验公式(4)预测发生破碎的规则波爬高

$$\frac{R}{H_0} = \xi_0 \quad (0.1 < \xi_0 < 2.3), \quad (4)$$

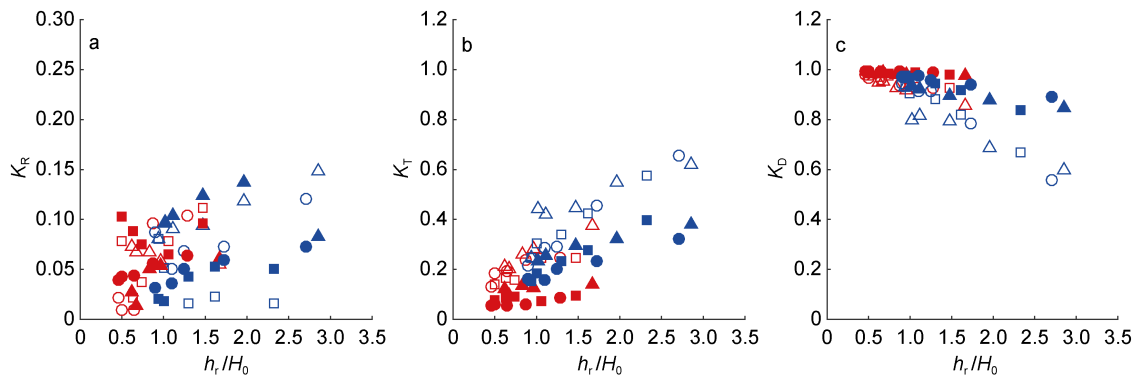


图 4 反射系数 (K_R , a)、透射系数 (K_T , b) 和能量耗散系数 (K_D , c) 随礁坪相对水深 (h_t / H_0) 的变化

Fig.4 Variations of reflection coefficient (K_R , a), transmission coefficient (K_T , b), and energy dissipation coefficient (K_D , c) with relative reef-flat submergence (h_t / H_0)

注: 实心: $\phi=0.126$, 空心: $\phi=0$; 红色: $h_t=0.05\text{m}$, 蓝色: $h_t=0.1\text{m}$; 圆形: $T=1\text{s}$, 正方形: $T=1.5\text{s}$, 三角形: $T=2\text{s}$

式中, R 为波浪岸滩爬高, ξ_0 为破碎相似参数, 定义为 $\tan \beta / \sqrt{H_0 / L_0}$, 其中 β 为岸滩斜坡坡度, 对于本试验因为波浪在礁前斜坡至礁缘的附近破碎, 其为礁前斜坡坡度, L_0 为深水波长。

图 5a 展示了本试验中 R/H_0 随 ξ_0 之间的变化关系, 结果表明: R/H_0 随 ξ_0 呈线性变化关系, 并在低礁坪水位或者粗糙礁面下的 R/H_0 值显著低于高水位或者光滑礁面时的值, 但结果较为离散, 因此公式(4)并不适用于珊瑚礁地形, 需要进一步改进。相对礁坪水深 (h_r/H_0) 常常被用来描述礁坪上水动力学问题(姚宇, 2019), 本文 2.2.2 节的结果同样表明 h_r/H_0 能较好的描述礁坪的透射波及其能量衰减, 因此图 5b 展示了本试验 R/H_0 随 h_r/H_0 之间的变化关系, 发现 R/H_0 随 h_r/H_0 的增大呈增大趋势, 且粗糙礁面下的 R/H_0 值显著低于光滑礁面时的值。但观察图 5b 可发现单独使用 h_r/H_0 来描述结果仍然较为离散, 因此

本文基于公式(4)的幂函数形式, 同时考虑 ξ_0 和 h_r/H_0 作为输入参数, 并考虑礁面粗糙度 ϕ 的变化, 提出下述同时可以预测本试验中光滑和粗糙礁面的岸滩爬高公式:

$$\frac{R}{H_0} = a(1-\phi)^b \xi_0^c \left(\frac{h_r}{H_0} \right)^d + e \quad (0.8\text{m} < H_0 < 2.4\text{m}) \quad (5)$$

基于本试验数据通过回归分析得到公式(5)中的参数 $a=0.64$, $b=5.83$, $c=0.85$, $d=0.20$, $e=0.06$, 拟合精度为 $R^2=0.79$, 表明式(5)可以较好地预测本试验中规则波在不同礁面粗糙度影响下岸滩的爬高。值得说明的是公式(5)根据本试验的测试仅考虑了入射波特征参数和礁面糙率的影响, 进一步对其的改进可以加入其他的礁形参数(礁坪宽度, 礁前斜坡坡度)的影响以及考虑泻湖和/或防浪建筑物的存在, 其在更极端的波况下的适用性问题, 也待进一步研究。

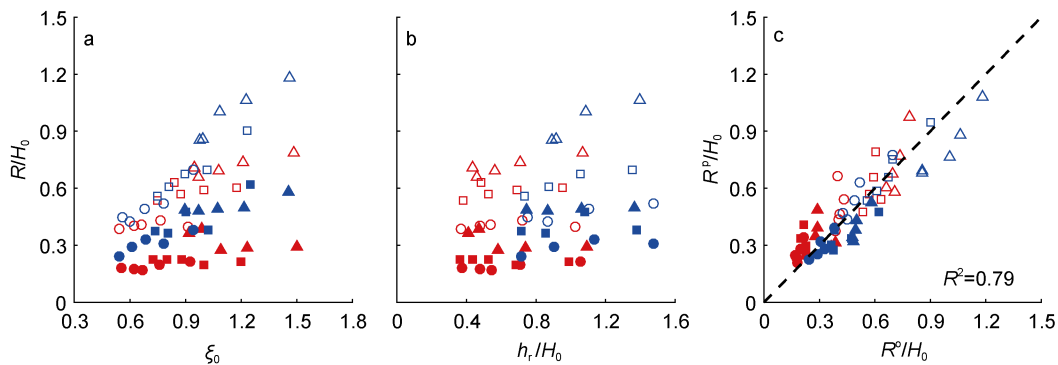


图 5 无量纲礁后岸滩爬高 (R/H_0) 随破碎相似系数 (ξ_0) (a) 以及随相对礁坪水深 (h_r/H_0) (b) 的变化, 无量纲岸滩爬高实测值 (R^o/H_0) 与预测值 (R^p/H_0) 的对比情况 (c)

Fig. 5 Variation of the normalized wave run-up on the back-reef beach (R/H_0) with the surf similarity parameter (ξ_0) (a); and with relative reef-flat submergence (h_r/H_0) (b), and measured normalized wave run-up on the back-reef beach (R^o/H_0) v.s. predicted normalized wave run-up on the back-reef beach (R^p/H_0) based on Eq. (5) (c)

注: 实心: $\phi=0.126$, 空心: $\phi=0$; 红色: $h_r=0.05\text{m}$, 蓝色: $h_r=0.1\text{m}$; 圆形: $T=1\text{s}$, 正方形: $T=1.5\text{s}$, 三角形: $T=2\text{s}$

3 结论

本文通过在波浪水槽中进行一系列物理模型试验研究了大糙率礁面下珊瑚礁海岸附近波浪演化和爬高的变化规律。实验测试了一系列的规则波工况, 采用了圆柱体阵列来模拟礁面的粗糙度。结果分析表明: 波浪在礁前斜坡处因浅化作用产生高次谐波, 且二次谐波是礁坪透射波的重要成分, 粗糙礁面削弱了礁坪上的主频波和二次谐波, 而对更高阶波的影响不显著。相对礁坪水深是表征礁坪上波浪透射的重

要参数, 海岸附近的透射波因礁面糙率的存在而显著减小, 而礁前反射波则与礁面糙率无明显关系, 在测试的范围内粗糙礁面使入射波浪能沿礁的衰减相对于礁面光滑平均增加 8%。礁后岸滩爬高随着透射波高的增大而增长并受到波浪周期和礁坪水深的影响, 最后拟合了本文试验条件下珊瑚礁大糙率礁面预测规则波爬高的关系式。

参 考 文 献

陈洪洲, 毕春伟, 高俊亮, 2018. 波浪在珊瑚岸礁礁坪上传播

- 变形的数值研究. 水科学进展, 29(2): 252—259
- 姚 宇, 2019. 珊瑚礁海岸水动力学问题研究综述. 水科学进展, 30(1): 139—152
- 姚 宇, 张起铭, 蒋昌波, 2019. 礁面糙率变化下珊瑚礁海岸附近波浪传播变形试验. 科学通报, 64(9): 977—985
- 姚 宇, 唐政江, 杜睿超, 等, 2017. 潮汐流影响下珊瑚岛礁附近波浪传播变形和增水试验. 水科学进展, 28(4): 614—621
- Brander R W, Kench P S, Hart D, 2004. Spatial and temporal variations in wave characteristics across a reef platform, Warraber Island, Torres Strait, Australia. *Marine Geology*, 207(1—4): 169—184
- Buckley M L, Lowe R J, Hansen J E *et al*, 2016. Wave setup over a fringing reef with large bottom roughness. *Journal of Physical Oceanography*, 46(8): 2317—2333
- Goda Y, 2000. *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Singapore: World Scientific Press, 356—361
- Hench J L, Leichter J J, Monismith S G, 2008. Episodic circulation and exchange in a wave-driven coral reef and lagoon system. *Limnology and Oceanography*, 53(6): 2681—2694
- Lowe R J, Falter J L, Bandet M D *et al*, 2005. Spectral wave dissipation over a barrier reef. *Journal of Geophysical Research*, 110(C4): C04001, doi: 10.1029/2004JC002711
- Quiroga P D, Cheung K F, 2013. Laboratory study of solitary-wave transformation over bed-form roughness on fringing reefs. *Coastal Engineering*, 80: 35—48
- Yao Y, He F, Tang Z J *et al*, 2018. A study of tsunami-like solitary wave transformation and run-up over fringing reefs. *Ocean Engineering*, 149: 142—155
- Yao Y, Huang Z H, Monismith S G *et al*, 2012. 1DH Boussinesq modeling of wave transformation over fringing reefs. *Ocean Engineering*, 47: 30—42

A FLUME STUDY OF REGULAR WAVE TRANSFORMATION AND RUN-UP AROUND REEF COASTS WITH LARGE SURFACE ROUGHNESS

JIA Mei-Jun¹, YAO Yu^{1,2}, HE Tian-Cheng¹, GUO Hui-Qun¹

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract To investigate the regular wave transformation and run-up across reef profile under the effect of reef surface roughness, a series of laboratory experiments were carried out in a wave flume, and both the smooth and the rough reef surfaces were tested. The results show that the 2nd harmonic waves are important components of transmitted waves on reef flat. The rough reef surface damps the 1st and the 2nd harmonics, and its impact on the higher harmonics is insignificant. The relative reef-flat submergence is a key parameter to describe the wave transmission. Wave transmission coefficient dropped significantly but energy dissipation coefficient increased by 8% on average in all scenarios when reef surface became rough. However, wave reflection from the reef seemed independent of surface roughness. Wave run-up on the back-reef beach increased with the increasing transmitted wave height. Finally, an empirical formula was proposed with which regular wave run-up on the back-reef beach could be predicted in large surface roughness in the tested scenarios.

Key words roughness; higher harmonics; wave run-up; regular wave; coral reef