礁面糙率变化下珊瑚礁海岸附近波浪传播变形试验

姚宇^{1,3*}, 张起铭¹, 蒋昌波^{1,2}

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;

3. 河海大学, 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 南京 210098

* 联系人, E-mail: yaoyu821101@163.com

2018-10-24 收稿, 2018-11-18 修回, 2018-11-20 接受, 2019-03-07 网络版发表

国家自然科学基金(51679014, 51839002)、湖南省科技计划(2017RS3035)和河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室开放研究基金(201602)资助

摘要 采用不同排列方式的圆柱体阵列来模拟珊瑚礁破碎带附近礁面粗糙度的变化, 通过测试一系列不规则波浪的况研究了珊瑚礁海岸附近的短波、低频长波和波谱的变化规律, 并与礁面光滑的情况进行了对比. 结果表明: 波浪沿礁传播过程中, 短波持续衰减, 到达海岸线附近短波波高相对于入射波高显著降低. 低频长波波高沿礁逐渐增大, 直到海岸线附近达到最大. 礁面粗糙时短波和低频长波的波高均小于礁面光滑时的情况; 礁面粗糙程度变化时, 海岸线附近短波波高和低频长波波高随着礁面糙率密度的增加而减小. 通过相干函数和传递函数分析验证了礁坪低频长波由短波群在礁缘处破碎后破碎点的移动产生, 并且珊瑚礁坪上低频长波的运动存在着共振模式; 礁面光滑时, 低频长波能量由于一阶共振效应在礁缘向海岸线传播的过程中被放大, 礁面粗糙时, 低频长波能量在礁坪上被摩擦所耗散, 共振效应不显著.

关键词 珊瑚礁, 人工粗糙度, 低频长波, 传播变形, 礁坪共振

随着全球气候变化, 海平面上升, 由风暴潮引起的珊瑚礁海岸线附近洪涝灾害风险日益增加^[1]. 近年来, 我国在南中国海的珊瑚岛礁周围进行了大规模的岛礁工程建设, 评估风暴潮等海洋灾害影响下该类工程的安全问题具有重要的现实意义. 典型的珊瑚礁地形由连接深海海床且较陡的礁前斜坡、延伸向岸滩相对水平的礁坪组成, 在礁坪和海岸间还可能

存在潟湖. 礁前斜坡和礁坪之间连接的部分称为礁缘, 波浪自远海传播到礁前斜坡时会发生浅化变形, 并在礁缘附近发破碎, 再加上礁坪上的摩擦损耗, 最终到达海岸的短波(0.04~0.4 Hz)能量几乎可以忽略. 然而, 现场观测却发现, 在发生风暴潮等海洋灾害后, 存在珊瑚礁保护的沿岸地区仍然会发生洪涝灾

害^[2], 这主要是由于珊瑚海岸附近存在的低频长波(0.001~0.04 Hz)主导^[3], 而且低频长波在礁坪可能发生的共振作用进一步加剧发生灾害的风险^[4]. 波浪爬高是衡量海岸线附近洪涝灾害的关键因子, 因此, 研究珊瑚礁海岸附近波浪传播变形规律对于评估海岸线附近洪涝灾害风险具有重要的学术价值. 近10年来国内外诸多学者进行了波浪在珊瑚礁地形上传播变形的试验研究, Demirbilek等人^[3]首次运用物理模型试验研究了风和不规则波共同作用下的岸滩波浪爬高, 指出低频长波沿礁往海岸线方向逐渐增大, 并通过理论分析证明了礁坪上存在1阶共振模式. 梅弢和高峰^[5]采用光滑的概化模型分析了短波波高在珊瑚礁礁坪上的沿程变化. 柳淑学等人^[6]通

引用格式: 姚宇, 张起铭, 蒋昌波. 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, 2019, 64: 977-985

Yao Y, Zhang Q M, Jiang C B. Laboratory study of wave transformation around reef coasts with various rough surfaces (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 977-985, doi: 10.1360/N972018-01027

过物理模型实验对规则波和不规则波在珊瑚礁作用下的波浪破碎及波高变化进行了研究,并给出波浪破碎指标.姚宇等人^[7,8]分别通过开展物理模型试验研究了礁前斜坡坡度变化和、潮汐流存在下珊瑚礁海岸附近的波浪反射、透射和能量衰减规律.

目前,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的材料来模拟.文献中仅有Quiroga和Cheung^[9]在概化珊瑚礁物理模型表面通过添加均匀长方体木条的方法模拟礁面粗糙度,研究了糙率对孤立波的传播、破碎、能量衰减以及礁坪上产生涌波的影响.Buckley等人^[10]在物理模型试验中采用在礁面上均匀布置小方块体来模拟粗糙的珊瑚礁面,研究了粗糙礁面对波浪增水的影响.陈洪洲等人^[11]通过粗化剂涂抹礁坪模拟粗糙工况,研究了粗糙珊瑚礁面对波浪非线性特征的影响.

从目前国内外的研究现状可知,以往对于珊瑚岛礁附近波浪传播变形的研究并未考虑礁面粗糙度变化.因此本文拟通过物理模型试验,采用类似于Yao等人^[12]使用的圆柱体阵列来模拟破碎带附近礁面的粗糙度,重点探讨糙率变化对珊瑚岛礁附近不规则波浪传播变形的影响.

1 试验设置

本物理模型试验在长沙理工大学水利实验中心波浪水槽中进行.该波浪水槽长40 m、宽0.5 m、高

0.8 m,模型设置如图1(a)所示.水槽的最左端配置一台活塞式造波机,用于产生不规则波.水槽另一端设置消能网,用于减弱波浪反射的影响.试验中珊瑚礁地形的概化模型依据Hench等人^[13]的现场观测资料,采用重力相似准则按1:20的模型比尺进行构建.整个珊瑚岸礁模型采用1 cm厚度的PVC板分段搭建:首先在距造波机27.3 m处设置坡度为1:6的礁前斜坡,随后设置长度为8 m、距水槽底高度为0.35 m的水平礁坪,最后在礁坪后设置坡度为1:3.5的礁后岸滩.整个珊瑚岸礁模型采用悬挂在水槽边壁上的不锈钢杆进行固定,同时使用玻璃胶填充PVC板与水槽壁和底之间以及板间相接处的缝隙.

本试验中共采用8个超声波浪高仪(G1~G8)来测量波幅的沿礁变化,具体位置如图1(a)所示.其中,G1~G3设置在礁前斜坡的外海侧来分离入射波和反射波;G4设在礁前斜坡上,用于采集波浪的浅化变形;G5设置在礁缘附近靠礁坪侧,用于测量波浪的破碎;G6~G8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.试验采用JONSWAP谱生成的不规则波,谱峰升高因子 γ 设置为3.3,浪高仪采样频率为50 Hz,采样时长为1200 s.

本试验参考Yao等人^[12]使用的圆柱体阵列模拟类似生长鹿角珊瑚的珊瑚礁礁面.由于珊瑚主要聚集生长在礁缘破碎带附近^[14],因此试验在礁缘离岸侧水平距离为1 m的礁前斜坡范围内和礁缘向岸侧水平距离为3.2 m的礁坪范围内均布直径为1 cm、高为

图1 试验设置. (a) 试验布置图; (b) 糙率密度的排列方式

Figure 1 Experimental setup. (a) Plan of experiment; (b) arrangements of the roughness elements

3.5 cm的PVC圆柱体. 柱体固定于PVC板上预制的孔深为1 cm的孔洞中, 从而保证柱体露出礁坪表面的糙率高度为2.5 cm. 礁面粗糙度的变化通过圆柱体阵列中柱体间的排列和间距的变化来实现. 柱体的分布密度采用固体体积分数 $\phi=V_s/V$ 进行计算, 式中 V 为控制体体积, V_s 为控制体中圆柱体所占体积. 本试验测试5种糙率密度的模型, 具体分布形式如图1(b)所示.

试验对礁面光滑的模型A($\phi=0$)和礁面糙率密度最大的模型B($\phi=0.088$), 分别测试了4种入射有效波高($H_{S0}=0.04, 0.06, 0.08, 0.10$ m)、3种谱峰周期($T_p=1, 1.5, 2$ s)、2种礁坪水深($h_r=0.05, 0.10$ m)共计24种组合工况. 对于模型C, D和E(糙率密度分别为 $\phi=0.066, \phi=0.044, \phi=0.022$)分别测试了1个入射有效波高($H_{S0}=0.08$ m)、3个谱峰周期($T_p=1, 1.5, 2$ s)、2个礁坪水深($h_r=0.05, 0.10$ m)的6种组合工况. 试验测试的入射波要素, 根据重力相似准则, 由前述的几何比尺1:20和相应的时间比尺1:4.5, 得到原型岸礁的相关波浪要素为 $h_r=1\sim 2$ m; $H_{S0}=0.8\sim 2$ m; $T_p=4\sim 9$ s, 与现场测量^[13]的波况较为符合. 根据G1~G3的波浪测量结果采用Goda两点分波法得到本试验中所有工况的反射系数均小于20%.

不规则波的总波高通过公式 $H_{S0}=4\sqrt{m_0}$ 进行计

算, 其中 m_0 为波谱对原点的零阶矩. 在实验室尺度研究低频长波的问题通常采用入射波的谱峰频率的二分之一作为低频长波和短波频段的划分界限^[10], 短波与低频长波的波高计算公式如下:

$$H_{SS}=4\sqrt{\int_{f_c}^{\infty} S(f)df}, H_{IG}=4\sqrt{\int_0^{f_c} S(f)df}, \quad (1)$$

式中 $f_c=0.5 f_p$, f_p 为谱峰频率, 波浪谱 $S(f)$ 通过对所采集的波浪时间序列进行傅里叶变换求得.

2 结果分析

2.1 波高的沿礁变化

2.1.1 光滑礁面与粗糙礁面的对比分析

选取典型工况($H_{S0}=0.08$ m, $T_p=1.5$ s, $h_r=0.05$ m)为例, 图2展示了波浪与礁面光滑(模型A)的珊瑚礁模型相互作用时短波波高, 低频长波波高的沿礁变化情况. 图2表明: 波浪在沿礁向海岸线传播的过程中, 在礁缘($X=0$)附近发生破碎, 消耗大量能量, 短波波高(H_{SS})迅速减小; 在礁坪上传播时, H_{SS} 由于少量的摩擦损耗略有减小; 到达海岸线附近(G8)时, H_{SS} 仅为入射有效波高 H_{S0} 的一半左右; 对于低频长波而言, 波高(H_{IG})在礁缘处显著增大, 这是由于群波效应造成的破碎点的移动产生, 随后 H_{IG} 沿礁逐渐

图2 短波波高(H_{SS})和低频长波波高(H_{IG})的沿礁变化. (a) 短波波高(H_{SS})沿礁变化; (b) 低频长波波高(H_{IG})的沿礁变化; (c) 珊瑚礁剖面(礁缘处为 $X=0$, 向岸方向为正)

Figure 2 Swell wave height (H_{SS}) and infragravity wave height (H_{IG}) across the reef profile. (a) Swell wave height (H_{SS}) across the reef; (b) infragravity wave height (H_{IG}) across the reef; (c) reef profile ($X=0$ indicates the location of reef edge with positive x pointing shoreward)

增大,直到海岸线附近达到最大,并且大于剩余的 H_{SS} ,这是由于礁坪上存在一阶共振模式造成,将在2.4节中详细分析。

图2同时也对比礁面粗糙(模型B)的情况,发现礁面粗糙时,由于底部摩擦增强的影响, H_{SS} 与 H_{IG} 在礁缘破碎带附近分别比礁面光滑时减小了34%和38%,但是除礁坪共振放大效应被明显削弱以外, H_{SS} 和 H_{IG} 在粗糙礁面的变化趋势与光滑礁面基本一致。

图3展示了波浪分别与光滑礁面和粗糙礁面作用时,海岸线处(G8)短波波高(H_{SS})和低频长波波高(H_{IG})随入射有效波高(H_{S0})、谱峰周期(T_p)和礁坪水深(h_r)的变化规律。图3表明:G8处的 H_{SS} 和 H_{IG} 均随 H_{S0} 的增大而增大,但 H_{SS} 的增大趋势趋近于常值,这是因为礁坪上的透射波高主要由礁坪水深决定^[7]; H_{SS} 和 H_{IG} 均随 T_p 的增大而增大,这可能由于谱峰周期的增大减小了频谱的带宽,增加了低频波的能量^[15]; H_{SS} 随 h_r 增大而增大, H_{IG} 随 h_r 的增大而减小,这可能是由于 h_r 的增加限制了 H_{SS} 在礁缘附近的破碎强度进

而影响了 H_{IG} 的产生。

2.1.2 光滑礁面与粗糙礁面的对比分析

为了进一步研究礁面粗糙程度对短波波高和低频长波波高的影响,图4展示了入射有效波高为 $H_{S0}=0.08$ m时,不同谱峰周期和礁坪水深条件下,海岸线附近G8处短波波高和低频长波波高随礁面糙率密度(ϕ)的变化规律。结果表明:对于所测试的波况和礁坪水深,短波波高与低频长波波高均随 ϕ 的增大而减小;当 ϕ 从0变化到0.088,短波波高减少幅度最高可达42%,低频长波波高减少幅度最高可达47%。图4揭示的短波和低频长波经粗糙礁坪传播到达海岸线后波高均显著降低的现象与Pomeroy等人^[16]的现场观测相符合。在入射波要素和礁坪水深相同的情况下,礁面粗糙时由于摩擦损耗的增加 H_{SS} 和 H_{IG} 的波高比礁面光滑时减小幅度最大可达到50%。观察图4(b)发现礁坪水深对低频长波波高影响不大,这是由于礁坪水深的增大限制了波浪破碎的强度,而当礁坪的糙率密度增大,摩擦对低频长波波高的耗散的

图3 海岸附近G8处短波波高(H_{SS}),低频长波波高(H_{IG})随入射有效波高(H_{S0}),谱峰周期(T_p)和礁坪水深(h_r)的变化。(a),(c)礁坪水深 $h_r=0.05$ m;(b),(d)礁坪水深 $h_r=0.10$ m

Figure 3 Swell wave height (H_{SS}) and infragravity wave height (H_{IG}) with deep water significant wave height (H_{S0}), peak wave period (T_p) and reef-flat still water level (h_r) at G8 near the shoreline. (a), (c) Reef-flat still water level $h_r=0.05$ m; (b), (d) reef-flat still water level $h_r=0.10$ m

图4 海岸线附近G8处短波波高(H_{ss})和低频长波波高(H_{IG})影响随糙率密度(ϕ)的变化. (a) 短波波高(H_{ss})影响随糙率密度(ϕ)的变化; (b) 低频长波波高(H_{IG})影响随糙率密度(ϕ)的变化

Figure 4 Variations of swell wave height (H_{ss}) and infragravity wave height (H_{IG}) near the coastline at G8 with different roughness densities (ϕ). (a) Swell wave height (H_{ss}) with different roughness densities (ϕ); (b) infragravity wave height (H_{IG}) with different roughness densities (ϕ)

影响大于水深的影响.

2.2 波浪谱的沿礁演变

为了进一步揭示波浪总能量的沿礁演变规律, 将对波浪谱进行分析, 通过对数据采样中200~1200 s的数据进行快速傅里叶变换并每隔20个相邻频段进行平滑处理后得到频谱图. 图5展示了在波浪 $H_{s0}=0.08$ m, $T_p=1.5$ s作用下两种礁坪水深(h_r)时, 远海处(G1)、礁缘附近(G5)、礁坪中部(G7)、海岸线(G8)附近的波浪频谱图. 礁面光滑时: 在远海位置G1处, 大部分能量集中短波频段($f > 0.33$ Hz)内, 但在低频波频段($f > 0.33$ Hz)也存在小部分能量, 这是受到了G1位置束缚长波以及礁后岸滩反射的低频长波的共同

影响^[16]; 在礁缘附近G5处, 波浪发生破碎, 破碎后主频附近($f > 0.67$ Hz)能量衰减剧烈, 波谱的峰值大幅减小, 相反低频长波频段($0 < f < 0.33$ Hz)能量相较于远海位置处增大. 波浪从G5传播至海岸线附近过程中, 由于破碎带的损耗, 短波波能继续减少, 而低频长波的能量继续增加. 波浪到达海岸线附近(G8)时, 低频长波波能达到最大值, 而短波能量被大幅削弱.

对比两种礁坪水深的情况, 波浪从礁缘(G5)传播到海岸线(G8)过程中, $h_r=0.05$ m时绝大部分短波能量被削减, 而 $h_r=0.1$ m时短波频段还剩余较多能量, 这是由于礁坪水深的增大限制了波浪的破碎的强度, 与图3观测的结论一致.

对比礁面光滑(模型A)和粗糙(模型B)的两种情

图5 波浪频谱的沿礁变化(垂直虚线为低频长波和短波的界限频率 $f_c=0.33$ Hz). (a~d) 礁坪水深 $h_r=0.05$ m; (e~f) 礁坪水深 $h_r=0.10$ m
Figure 5 Wave spectra across the reef profile (the vertical dotted lines denote the frequency limit between the swell waves and the infragravity waves $f_c=0.33$ Hz). (a~d) Reef-flat still water level $h_r=0.05$ m; (e~f) reef-flat still water level $h_r=0.10$ m

况,在礁缘附近(G5),波浪发生破碎,礁面粗糙时,由于礁面的摩阻损耗增强,短波能量衰减更加剧烈,波谱的峰值急剧减小;波浪从G5向海岸线(G8)传播时,由于摩擦损耗,短波和低频长波能量均较光滑礁面时有所减小;礁面粗糙的影响在礁面水深较小($h_r=0.05$ m)时更加剧烈。

2.3 礁坪共振

礁坪上出现的低频长波能量的放大现象可利用共振理论进行分析.珊瑚礁海岸地形可视为开放盆地,理论上礁坪共振周期可参照开放盆地的共振模式分析,其计算公式如下^[17]:

$$T_n = \frac{4W_r}{(2n-1)\sqrt{g(h_r + \bar{\eta}_r)}}, n=1,2,3\cdots, \quad (2)$$

其中 W_r 为礁坪长度, h_r 为礁坪水深, $\bar{\eta}_r$ 为礁坪上波浪增水, T_n 为第 n 阶共振周期, g 为重力加速度。

为进一步揭示不同波要素和礁坪水深情况下岸线附近低频长波的共振规律,图6中展示了不同入射有效波高(a)和(b);谱峰周期(c)和(d),礁坪水深(e)和(f)变化下海岸线附近(G8)低频长波频段($0 < f < 0.33$ Hz)

的波浪频谱图.观察图6发现,当礁面光滑时(模型A),波浪谱中的峰值频率基本集中在礁坪一阶理论共振频率附近,因此由于发生一阶礁坪共振,低频长波的能量在礁缘向海岸线传播的过程中被放大.进一步对比图6(a)和(b),岸线附近低频长波的能量随着入射有效波高增大而增大;对比图6(c)和(d),低频长波的能量随着入射谱峰周期的增大而增大;对比图6(e)和(f),礁面光滑时低频长波的能量随着礁坪水深的增大而减小,这是由于在海岸线附近,所测试的周期较大的波况在低频区间的峰值频率更接近于水深较小时珊瑚礁系统的理论一阶理论共振频率造成.图6中对于粗糙礁面(模型B)而言,岸线附近低频长波能量均小于礁面光滑时,这是因为低频长波沿礁传播通过摩阻发生了较大损失,因而共振现象的激发不甚显著。

2.4 礁坪上低频长波产生及其共振的机理分析

为了进一步验证低频长波在礁坪上的产生和共振机理,本文基于Pequignet^[14]的方法以典型工况($H_{S0}=0.08$ m, $T_p=1.5$ s, $h_r=0.05$ m)为例进行相关函数

图6 不同波高(H_{S0})、周期(T_p)和礁坪水深(h_r)条件下岸线附近G8 低频长波频段波浪频谱图.左垂直虚线为一阶理论共振频率,右垂直虚线为二阶理论共振频率.(a),(b) 对比不同波高;(c),(d) 对比不同谱峰周期;(e),(f) 对比不同礁坪水深

Figure 6 Wave spectra within the low-frequency band at G8 near the shoreline under different wave heights (H_{S0}), periods (T_p) and reef-flat still water levels (h_r). The left vertical dashed lines denote the first-order resonant frequency and the right vertical dashed lines denote the second-order resonant frequency. (a), (b) Comparison between different wave heights; (c), (d) comparison between different periods; (e), (f) comparison between different reef-flat still water levels

和传递函数分析. 图7(a)和(b)首先在低频长波频段 ($0 < f < 0.33$ Hz) 分别展示了礁前斜坡处(G4)短波群包络线的自功率谱 $S_{\text{env,env}}$ ($S_{\text{env,env}}$ 由G4处波面时间序列经过Hilbert变换得到)和海岸线附近(G8)自由液面的自功率谱 $S_{8,8}$, 可以观察到两者在 $0 < f < 0.06$ Hz 频段具有较为一致的变化趋势. 随后进一步分析了 $S_{\text{env,env}}$ 和 $S_{8,8}$ 的相关性, 其由相干函数 ($R_{x,y}^2$) 来描述, 定义如下:

$$R_{x,y}^2(f) = \frac{|S_{x,y}(f)|^2}{S_{x,x}(f)S_{y,y}(f)}, \quad (3)$$

式中, $S_{x,y}(f)$ 为时间序列 $x(t)$ 和时间序列 $y(t)$ 的互功率谱, $S_{x,x}(f)$ 为时间序列 $x(t)$ 的自功率谱, $S_{y,y}(f)$ 为时间序列 $y(t)$ 的自功率谱. 相干函数值越接近于1表示相关性越强. 图7(c)表明 $S_{8,8}$ 和 $S_{\text{env,env}}$ 的 $R_{\text{env},8}^2$ 值在 $0 < f < 0.06$ Hz 时接近于1, 表明两者存在较强的相关性, 进一步

证明了礁坪上的低频长波是由短波群在礁缘处破碎后破碎点的移动(与波群包络线同相位)产生, 这与 Pomeroy 等人^[16]基于现场观测的分析结果相符. 最后 $S_{\text{env,env}}$ 和 $S_{8,8}$ 之间能量的传递可由传递函数 ($H_{x,y}$) 进行描述, 定义如下:

$$H_{x,y}(f) = \frac{|S_{x,y}(f)|}{S_{x,x}(f)}. \quad (4)$$

图7(d)中传递函数 $H_{\text{env},8}$ 的峰值频率与理论一阶共振频率较为接近, 因此进一步证明了低频长波在礁坪上产生了一阶共振.

对比礁面光滑和粗糙两种情况, 图7(a)和(c)表明两种礁面的 $S_{\text{env,env}}$ 以及 $S_{\text{env,env}}$ 与 $S_{8,8}$ 的相关性 $R_{\text{env},8}^2$ 均较一致; 而当礁面粗糙时, 图7(d)传递函数 $H_{\text{env},8}$ 的峰值在理论共振频率附近相较于礁面光滑时急剧减小,

图 7 礁坪上低频长波产生及其共振的机理分析. (a) 礁前斜坡处(G4)短波群包络线自功率谱 ($S_{\text{env,env}}$); (b) 海岸线附近(G8)自由液面的自功率谱 ($S_{8,8}$); (c) $S_{\text{env,env}}$ 与 $S_{8,8}$ 的相干函数 ($R_{\text{env},8}^2$); (d) $S_{\text{env,env}}$ 与 $S_{8,8}$ 的传递函数 ($H_{\text{env},8}$); 左垂直虚线为一阶理论共振频率, 右垂直虚线为二阶理论共振频率

Figure 7 Mechanism analysis of the infragravity waves generation and resonance on reef. (a) Auto-spectra of the envelope of free surface elevations at G4 on the fore-reef slope ($S_{\text{env,env}}$); (b) auto-spectra of the free surface elevation at G8 near the shoreline ($S_{8,8}$); (c) coherence function ($R_{\text{env},8}^2$) between the $S_{\text{env,env}}$ and $S_{8,8}$; (d) transfer function ($H_{\text{env},8}$) between the $S_{\text{env,env}}$ and $S_{8,8}$; the left vertical dashed lines denote the first-order resonant frequency and the right vertical dashed lines denote the second-order resonant frequency

进一步证明了低频长波在向岸传播过程中由于礁面摩擦阻发生大量损耗, 海岸线附近共振放大效应不再显著.

3 结论

本文通过物理模型试验对粗糙珊瑚礁面附近波浪传播变形规律进行了研究, 测试了不同礁面糙率密度影响下的一系列不规则波工况. 研究表明: 不规则波向岸传播过程中, 短波由于在礁缘处的破碎以及礁坪的摩擦沿程不断衰减, 到达海岸线附近的短波波高相对于入射有效波高显著降低. 低频长波波高在礁缘处由于波浪破碎显著增大, 随后低频长波在礁坪上产生了共振产生放大效应, 波高沿礁逐渐增大, 直到海岸线附近达到最大值. 海岸线附

近, 短波波高和低频长波波高均随着入射有效波高和谱峰周期的增大而增大; 短波波高随着礁坪水深的增大而增大, 低频长波波高随着礁坪水深的增大而减小. 对比粗糙礁面, 由于底部摩擦增强, 短波与低频长波波高在海岸线附近均相较于礁面光滑的显著减小. 礁面糙率变化时, 海岸线附近短波和低频长波波高均随着礁面糙率密度的增加而减小. 通过相干函数分析, 验证了礁坪低频长波是由短波群在礁缘处破碎后破碎点的移动产生; 通过传递函数分析进一步证明了礁坪上低频长波发生了一阶共振放大效应. 海岸线附近低频波能量的放大受入射有效波高、谱峰周期和礁坪水深的共同影响. 礁面糙率的存在使低频长波沿礁衰减, 海岸线附近共振放大效应不再显著.

参考文献

- 1 Yamano H, Kayanne H, Yamaguchi T, et al. Atoll island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstructions: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu. *Glob Planet Change*, 2007, 57: 407–416
- 2 Terry J P, Chui T F M. Evaluating the fate of freshwater lenses on atoll islands after eustatic sea-level rise and cyclone-driven inundation: A modelling approach. *Glob Planet Change*, 2012, 89: 76–84
- 3 Demirbilek Z, Nwogu O G, Ward D L. Laboratory Study of Wind Effect on Runup over Fringing Reefs. Report 1. Data Report, 2007
- 4 Pequignet A C N, Becker E J M, Merrifield M A, et al. Forcing of resonant modes on a fringing reef during tropical storm Man-Yi. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: 139–145
- 5 Mei T, Gao F. Flume experiment research on law of wave propagation in reef flat (in Chinese). *J Waterw Harbor*, 2013, 34: 13–18 [梅弢, 高峰. 波浪在珊瑚礁坪上传播的水槽试验研究. 水道港口, 2013, 34: 13–18]
- 6 Liu S X, Liu N, Li J X, et al. Experimental researches on wave propagation characteristics on reefs terrain (in Chinese). *Ocean Eng*, 2015, 33: 42–49 [柳淑学, 刘宁, 李金宣, 等. 波浪在珊瑚礁地形上破碎特性试验研究. 海洋工程, 2015, 33: 42–49]
- 7 Yao Y, Du R C, Yuan W C, et al. Experimental study of wave transformation around the surf zone over fringing reefs (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2015, 37: 66–73 [姚宇, 杜睿超, 袁万成, 等. 珊瑚岸礁破碎带附近波浪演化实验研究. 海洋学报, 2015, 37: 66–73]
- 8 Yao Y, Tang Z J, Du R C, et al. Laboratory study of wave transformation and wave-induced setup over reef islands under the effect of tidal current (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2017, 28: 614–621 [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. 水科学进展, 2017, 28: 614–621]
- 9 Quiroga P D, Cheung K F. Laboratory study of solitary-wave transformation over bed-form roughness on fringing reefs. *Coast Eng*, 2013, 80: 35–48
- 10 Buckley M L, Lowe R J, Hansen J E, et al. Wave setup over a fringing reef with large bottom roughness. *J Phys Oceanogr*, 2016, 46: 2317–2333
- 11 Chen H Z, Bi C W, Gao J L. Numerical study of wave transformation over fringing reef flat (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2018, 29: 252–259 [陈洪洲, 毕春伟, 高俊亮. 波浪在珊瑚岸礁礁坪上传播变形的数值研究. 水科学进展, 2018, 29: 252–259]
- 12 Yao Y, He F, Tang Z, et al. A study of tsunami-like solitary wave transformation and run-up over fringing reefs. *Ocean Eng*, 2018, 149: 142–155
- 13 Hench J L, Leichter J J, Monismith S G. Episodic circulation and exchange in a wave-driven coral reef and lagoon system. *Limnol Oceanogr*, 2008, 53: 2681–2694
- 14 Madin J S, Black K P, Connolly S R. Scaling water motion on coral reefs: From regional to organismal scales. *Coral Reefs*, 2006, 25: 635–644
- 15 Yao Y, Becker J M, Ford M R, et al. Modeling wave processes over fringing reefs with an excavation pit. *Coast Eng*, 2016, 109: 9–19
- 16 Pomeroy A, Lowe R, Symonds G, et al. The dynamics of infragravity wave transformation over a fringing reef. *J Geophys Res-Oceans*, 2012, 117: C11022
- 17 Nwogu O, Demirbilek Z. Infragravity wave motions and runup over shallow fringing reefs. *J Waterw Port Coast Ocean Eng*, 2010, 136: 295–305

Summary for “礁面糙率变化下珊瑚礁海岸附近波浪传播变形试验”

Laboratory study of wave transformation around reef coasts with various rough surfaces

Yu Yao^{1,3*}, Qiming Zhang¹ & Changbo Jiang^{1,2}

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;

³ Key Laboratory of Coastal Disasters and Defence of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China

* Corresponding author, E-mail: yaoyu821101@163.com

With global climate change and sea level rise, low-lying atoll islands fringed by coral reefs are especially vulnerable to wave-driven inundation during extreme wave events. In recent years, China has implemented large-scale engineering constructions on some low-lying reef atolls in the South China Sea. Hence, accurate prediction of the nearshore waves on the reefs is important to assess the wave runup on such constructed coastal structures. Wave runup near the reef coast is primarily contributed from sea and swell waves (0.04–0.4 Hz), infragravity waves (0.001–0.04 Hz) and wave setup.

A typical coral reef profile is characterized by a seaward sloping fore-reef and an inshore shallow reef flat extending towards the coastline, and the reefs have been reported as efficient buffers to the wind-driven wave energy over decades. Reefs often have fully developed coral communities on the fore reef and reef flat, resulting in complex topography and reef surface roughness. The wave energy loss caused by bottom friction maybe even be greater than that caused by wave breaking.

This laboratory study modeled a variety of rough surfaces around the reef surfzone by using an array of cylinders with different arrangements. The results show that the swell waves height near the coastline is significantly lower than the incident waves height due to the breaking of the short waves at the reef edge and the continuous attenuation of the friction along the reef flat during the irregular waves propagation to the shore. The infragravity waves height increases significantly at the reef edge due to wave breaking, and then the infragravity waves height are amplified by the resonance effect on the reef flat, and the infragravity waves height increases gradually along the reef until it reaches the maximum value near the coastline. Near the coastline, both the swell waves height and the infragravity waves height increase with the incident waves height and period increasing. The swell waves height increases with reef-flat still water level increasing, while the low frequency long wave height decreases with the increase of reef-flat still water level. Both wave heights with the rough reef surface are found to be smaller than those with the smooth surface. When the roughness of reef surface varies, both wave heights near the shoreline decrease with the increasing surface roughness density.

We also analyze the coherence and transfer functions to show that the infragravity waves on the reef flat are generated by the breaker-point shift when the grouped short waves break around the reef edge. Resonant modes exist associated with the infragravity wave motions on the reef flat. For the smooth reef surface, the infragravity wave energy is amplified due to the first-order resonance when it propagates from the reef edge to the shoreline. For the rough reef surface, the infragravity wave energy is dissipated by bottom friction on the reef flat, and the effect of resonance is insignificant.

coral reefs, artificial roughness, infragravity wave, transformation, reef-flat resonance

doi: 10.1360/N972018-01027