

珊瑚礁破碎带附近波浪演化和波生流实验研究

姚宇^{1,2}, 唐政江¹, 杜睿超¹, 蒋昌波^{1,2}

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为了研究珊瑚岸礁破碎带附近波浪演化和波生流特性, 通过水槽实验对规则波浪作用下珊瑚岸礁上沿礁分布的水位和流速进行了详细的测量。在典型卷破波条件下, 测试了礁冠存在与不存在的两种情况。实验结果表明, 多重波浪反射作用引起岸礁上形成不完全驻波, 而破碎带附近的浅化作用则产生高次谐波, 波浪破碎所耗散的波能主要来源于主频波, 礁坪上透射波成分中二次谐波与主频波的能量相当; 礁冠的存在引起破碎带宽度减小、礁坪上增水变大以及礁坪上各次谐波变小; 礁冠不存在时, 岸礁上波生流的沿礁分布与平直海岸相似, 而礁冠的存在在一定程度上阻碍了礁坪上水体向外海的回流。研究成果将丰富和发展珊瑚礁水动力学理论, 并为岛礁工程的建设与维护提供一定的理论参考。

关键词: 高次谐波; 波生流; 破碎带; 珊瑚岸礁

中图分类号: TV139.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)02-0012-08

DOI: 10.11759/hyxx20160313001

珊瑚礁(coral reef)是由碳酸钙组成的珊瑚虫骨骼沉积形成的岩体, 广泛分布于热带和亚热带浅海地区。我国拥有丰富的珊瑚礁资源, 主要分布于西沙、南沙、台湾岛和海南岛沿岸。近年来, 我国在南海地区珊瑚岛礁周围进行填礁造陆的活动日益增多, 建设了诸如机场、码头、灯塔、通信、气象等相关设施。这些设施在复杂的远海海洋动力环境下的稳定性问题日益受到学者们的关注, 其中由于台风暴潮引起的波浪作用是最重要的海洋动力因素之一, 因此研究珊瑚礁附近与波浪相关的水动力问题对于珊瑚岛礁工程设施建设和维护具有指导意义。

岸礁(fringing reef)是珊瑚礁的常见类型, 主要由连接深海海床的礁前斜坡和延伸向海岸的水平礁坪组成, 在礁前斜坡和礁坪相接的礁缘处还可能存在一个隆起的礁冠。与平直海岸类似, 波浪由深海传至岸礁, 由于礁前斜坡上水深急剧变浅, 波浪因浅化作用而变陡, 进而在礁缘附近发生破碎, 破碎过程如图 1 所示, 破碎波在礁坪上传播一段距离消耗大量的能量后重新生成行进波, 因此礁坪上并不存在类似于平直海岸的冲泄区。同时波浪破碎也会引起礁坪上产生波浪增水和波生流^[1-2], 并且部分波生流以海底回流的形式返回到外海。现场观测也发现伴随着礁前斜坡和礁缘附近的波浪浅化和破碎作用, 礁

坪上波谱显著变宽, 产成高频波^[3-4]和低频波^[5]。

国内外文献中对于岸礁上波浪演化的物理模型实验研究主要集中于波浪传播变形、破碎以及增水方面的问题, 例如: 张庆河等^[6]对规则波在台阶地形上的破碎规律进行了实验研究。Yao 等^[7]用实验和数值方法研究了岸礁对于波浪传播的影响, 验证了礁顶水深是控制波浪破碎和增水产生的决定性参数。Yao 等^[8]采用物理模型系统地研究了破波类型、破波位置和破碎带宽度等破碎波的特征随礁盘水深和礁前斜坡坡度的变化规律, 并给出了相关的经验公式。梅骏和高峰^[9]实验模拟了常年平均波浪和重现期为 50 a 的两种波浪条件, 研究了波浪在珊瑚礁上的传播规律。柳淑学等^[10]通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^[11-12]通过物

收稿日期: 2016-03-13; 修回日期: 2016-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51309035, 51239001); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2014491011); 高等学校博士学科点科研基金新教师类(20134316120004)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.51309035, No.51239001; the Open Foundation of State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, No.2014491011; the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, No.20134316120004]

作者简介: 姚宇 (1982-), 男, 湖南湘潭人, 副教授, 博士, 主要从事近海水动力学和环境流体力学研究, E-mail: yaoyu821101@163.com

理模型实验分别研究了珊瑚礁破碎带附近的波浪反射、透射以及能量衰减规律和礁冠的存在对于珊瑚礁上波浪传播变形以及增水产生的影响。现有的实验研究几乎没有涉及破碎带附近波浪的详细演化过程,对波生流问题也研究甚少。Gourlay^[13]通过一系列物理模型实验首次研究了规则波作用下礁坪上的波生流问题,然而其仅在礁坪上单点位置对岸礁上的波生流进行测量,无法分析流速的垂向分布和沿礁变化。

因此,本文通过波浪水槽物理模型实验,对珊瑚岸礁破碎带附近沿礁分布的波和流在空间上进行详细的测量,以此研究波浪演化和波生流特性。具体来说,以某一典型的卷破波工况为例,分别探讨两种礁形(存在和不存在礁冠)破碎带附近波高的变化、高频波的产生和波生流的分布。研究成果将丰富和发展珊瑚礁水动力学理论,为岛礁工程的建设与维护提供一定的理论参考。

1 实验设置

物理模型实验在新加坡南洋理工大学的长 36 m, 宽 0.55 m, 高 0.6 m 的波浪水槽中进行,实验设置如图 2a 所示,水槽左端为一台具备主动吸收功能的推板式造波机,另一端距造波机约 32 m 处设置坡度为 1:8 的斜面模拟礁后岸滩。物理模型按照弗洛伊德相似定律,根据现场观测的原型礁冠^[14]按 1:20 制作,对应的时间比尺为 1:4.5。在距造波机 16.35 m 处设置坡度为 1:6 的斜坡模拟礁前斜面,斜面后接长度为 7 m 的水平平台模拟礁坪。礁冠宽 50 cm, 高 5 cm, 长 55 cm, 长度与水槽宽度相匹配,礁冠固定于礁坪平台上,与礁坪边缘对齐。实验中沿礁布置 12 个浪高仪(G1~G12)来测量自由液面的变化。对于礁冠存在和不存在的情况,实验均测试了礁坪水深

范围为 0.05~0.10 m、波浪周期范围为 1~2 s、深水波高范围为 0.04~0.12 m 的组合规则波工况,据上述模型比尺对应的原型波浪条件为礁坪水深 1~2 m、波浪周期 4.5~9 s、深水波高 0.8~2.4 m,符合 Hench 等^[14]的现场观测情况,详细的实验设置见姚宇等^[12]。

1.1 波浪的测量

实验中观察到,当水深增大时,破碎点由礁前斜坡移向礁缘,大部分波况下波浪以卷破的形式破碎。破碎带宽度定义为从破碎带起点(破碎点)到破碎带终点(破碎停止并重新生成行进波)之间的水平距离^[11],由内破碎带和外破碎带组成,如图 1 所示。为研究波流的沿礁分布,本文选择一个代表性波况(远海静水深 $h_0=0.45$ m, 深水波高 $H_0=0.095$ m, 波周期 $T=1.25$ s)沿礁进行详细的测量,此工况下波浪破碎为典型的卷破波,所观测到的破碎带的特征位置如表 1 所示。在此工况下选择破碎带附近 60 个测点位置对礁冠存在和不存在的情况均进行详细的波浪测量,如图 2b 所示:测量区域始于礁前斜坡上的浅化带(距离礁缘外海侧 0.75 m),终于破碎带后再生波带(距离礁缘向岸侧 3.675 m),相邻测点间距 75 mm。实验中通过在同次运行中沿水槽移动浪高仪 G4 对 60 个位置的自由液面依次进行测量,每个测点的采样时间为 3 min,浪高仪采样频率为 50 Hz。由于卷破波冲击点附近存在强烈的掺气作用,测量误差较大,因此冲击点附近的测点在本文中不作分析。

1.2 水流的测量

本文采用二维电磁流速仪测量波浪作用下沿礁水流的分布,流速仪直径为 5 mm, L 形探头正对波浪传播方向放置以测量瞬时水平流速和垂向流速。

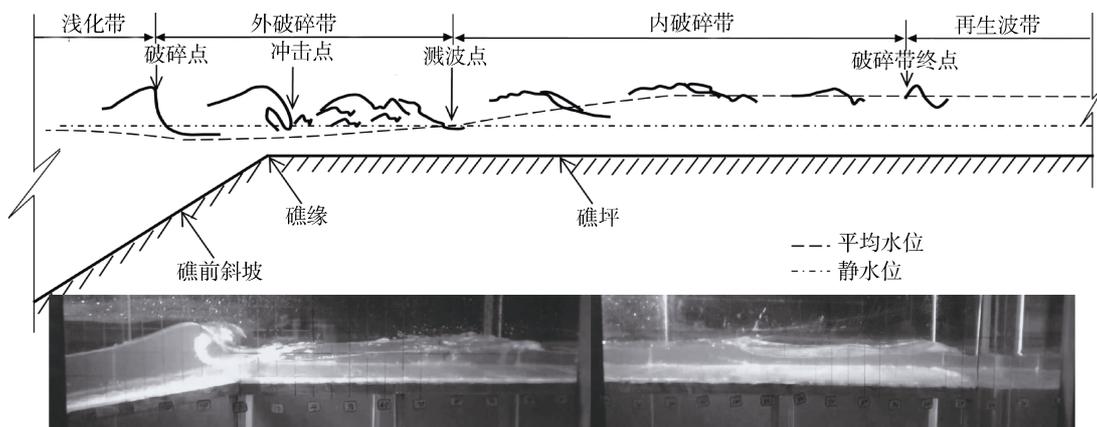


图 1 岸礁礁缘附近波浪的破碎过程^[11]

Fig. 1 Description of the surf-zone process around the reef edge over a fringing reef^[11]

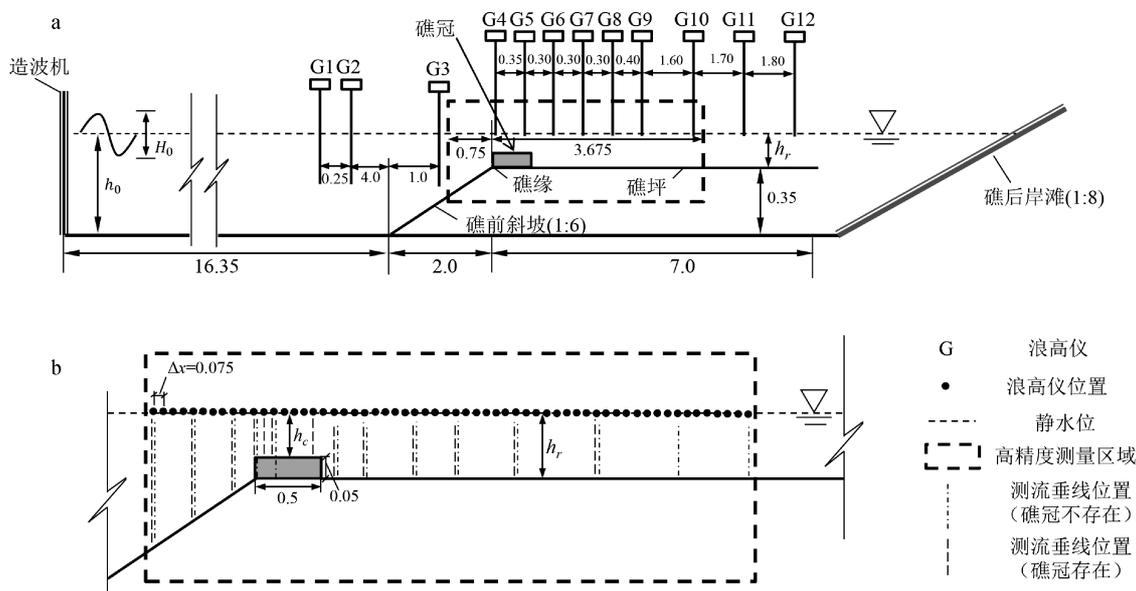


图 2 实验设置(单位: m)
Fig. 2 Experimental setup (unit: m)

测量时须保证流速仪探头始终位于水面以下,故波谷以上的流速未能测量。如图 2b 所示,实验中沿水槽中轴线选取 13 条垂向测线($L_1 \sim L_3$ 位于浅化带, $L_4 \sim L_{11}$ 位于破碎带, $L_{12} \sim L_{13}$ 位于破碎带后再生波带,具体位置见表 2),详细测量每条垂线上槽底上方到波谷下方之间每隔 5 mm 的流速分布。破碎带内测线的具体位置根据有无礁冠两种情形时破碎点、冲击点、溅波点位置以及破碎带宽度的差异(见表 1)略有不同。由于礁缘或礁冠附近的流速变化较大,对此区域测线进行了局部加密,同样由于卷破波的冲击点和溅波点之间的区域存在强烈的掺气作用,故此区域不进行测量。

实验中电磁流速仪自造波机启动 10 min 后开始

表 1 观测的破碎带特征位置(规则波工况 $h_0=0.45$ m, $H_0=0.095$ m, $T=1.25$ s, 图 3、图 4 同)

Tab. 1 Observed surf-zone characteristic locations for a representative monochromatic-wave condition with $h_0 = 0.45$ m, $H_0 = 0.095$ m, $T = 1.25$ s (also applied in Fig. 3 and Fig. 4)

位置	到礁缘的距离 ^a (m)	
	无礁冠	有礁冠
破碎点	0.02	-0.04
冲击点	0.25	0.20
溅波点	0.78	0.48
破碎带终点	2.94	1.34

a: 原点为礁缘位置, 礁缘向岸侧为正向(表 2 同)

采样,以保证波浪和水流达到稳定状态,采样频率为 30 Hz。每条垂线上的流速分布在同一次运行中进行测量,而后在新的运行中测量下一条垂线,各采样点的采样时间设为 5 min,相邻两次运行至少间隔 30 min 以消除可能存在的余流影响。

2 结果分析

2.1 波浪演化

类似于台阶式地形(如潜堤、沙坝等),波浪作用于岸礁的礁前斜坡和礁冠时会产生高次谐波,以往的物理实验和数值模拟研究(如 Brossard 等^[15])表明,超过 60%的入射波能可通过高频波传递到结构物下游。本文拟通过傅里叶变换对测得的自由液面时间序列进行谐波分析来研究能量从主频波到高频波的转移。图 3 和图 4 分别展示了代表性工况 $h_0=0.45$ m, $H_0=0.095$ m, $T=1.25$ s 下礁冠不存在与存在时总波幅(a_t)、各次(精确到五次)谐波波幅($a_1 \sim a_5$)以及平均水位(MWL)的沿礁变化,图中 MWL 通过对所测各点自由液面的时间序列求平均获得。

图 3a 和图 4a 中波幅 a_1 的沿礁变化表明:波浪破碎点均位于礁缘离岸一侧(此时波幅达到最大);在礁前斜坡上,由于波浪反射,波幅在空间上存在起伏(形成了不完全驻波),当礁冠存在时波浪反射更强,故驻波现象更为明显;相较于礁冠不存在的情况,礁冠的存在使局部水深变浅,破碎带变窄,随之

表 2 流速测量位置

Tab. 2 The flow measurement locations

测线 编号	到礁缘的距离 ^a (m)		破碎带位置		测线 编号	到礁缘的距离 ^a (m)		破碎带位置	
	无礁冠	有礁冠	无礁冠	有礁冠		无礁冠	有礁冠	无礁冠	有礁冠
L_1	-0.75	-0.75	浅化带	浅化带	L_8	1.125	0.6	内破碎带	内破碎带
L_2	-0.45	-0.45	浅化带	浅化带	L_9	1.5	0.825	内破碎带	内破碎带
L_3	-0.15	-0.15	浅化带	浅化带	L_{10}	1.95	1.125	内破碎带	内破碎带
L_4	0	0	外破碎带	外破碎带	L_{11}	2.55	1.5	内破碎带	内破碎带
L_5	0.15	0.075	外破碎带	外破碎带	L_{12}	3.15	1.95	再生波带	再生波带
L_6	0.6	0.15	内破碎带	外破碎带	L_{13}	3.675	2.55	再生波带	再生波带
L_7	0.825	0.45	内破碎带	内破碎带					

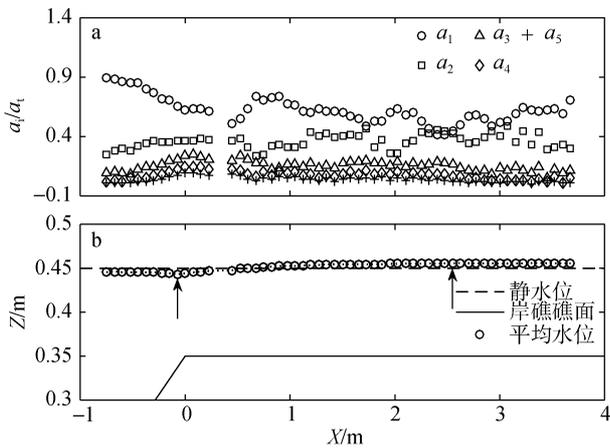


图 3 礁冠不存在时谐波振幅和平均水位的沿礁变化

Fig. 3 Harmonic-wave amplitudes and mean water-levels across the reef profile without the reef crest

造成波幅沿礁衰减加快; 在礁坪上破碎带后的再生波带, 虽然两种礁形下礁坪静水深相同($h_r = 0.1$ m), 但礁冠存在时再生波的波幅仍略小; 由于礁坪两端和礁后岸滩造成的多重波浪反射的影响, 礁坪上的波幅亦出现空间上的起伏。理论上驻波波长为相同条件下行进波波长的二分之一, 对于上述工况, 礁坪上浅水透射波波长 $T\sqrt{gh_r} = 1.25$ m, 则礁坪上不完全驻波的波长估算为 0.63 m, 与图中观测到的驻波波长(礁坪上起伏的波幅相邻峰值间的距离)比较接近。

图 3a 和图 4a 中各次谐波振幅($a_1 \sim a_5$)的沿礁分布表明: 在浅化带, 由于波浪的浅化作用, 波能由主频波向高频波转移, 高频波波幅沿礁逐渐增大, 在破碎点附近达到峰值, 此时二次谐波波幅($a_2 = 0.02$ m)达到入射波幅($a_t = 0.06$ m)的 33%, 三次谐波波幅($a_3 = 0.01$ m)大约为 a_t 的 17%, 而四到五次谐波则相对较小, 由于斜坡的强反射作用, 主频波 a_1 在礁前斜坡上产生驻波现象(尤其是礁冠存在时); 在破碎

带内, 由于波浪破碎耗能, 主频波 a_1 迅速减小, 而高次谐波 $a_2 \sim a_5$ 仅略微减小; 在破碎带后礁坪上的再生波带, 透射波能量中高次谐波的能量所占了相当的部分, 其中二次谐波与主频波能量接近, 而三次到五次谐波则几乎可以忽略, 特别是第五次谐波仅表现为入射波幅的 2%, 所以本文不再分析更高次的谐波。同时各次谐波的幅值仍和上述波高一样出现空间上的波动(即驻波现象)。礁冠的存在对于谐波沿礁变化有一定的影响, 由于礁冠一定程度上增强了破碎波能量的消耗, 因此礁冠存在时礁坪上各次谐波的波幅略有减小。

图 3b 和图 4b 表明, 波浪在礁前斜坡由于变浅作用造成 MWL 下降产生减水(即 MWL 小于静水位 h_0), 其直至波浪破碎点达到最低值(此为破碎带起点), 此时减水值分别是 -0.7 cm(无礁冠)和 -2.3 cm(有礁冠), 随后 MWL 开始沿破碎带上升, 直到破碎带停止重新生成行进波时(此为破碎带终点), MWL 表现为增水(MWL 大于静水位 h_0), 这与上述波幅的变化趋

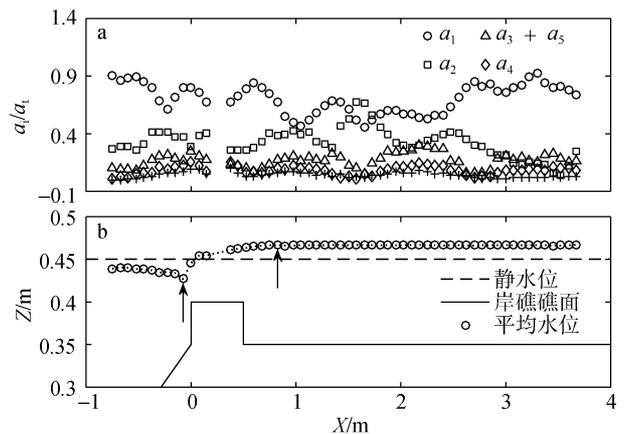


图 4 礁冠存在时谐波振幅和平均水位的沿礁变化

Fig. 4 Harmonic-wave amplitudes and mean water levels across the reef profile with the reef crest

势恰好相反,符合 Longuet-Higgins 和 Stewart^[16]的辐射应力理论描述;随后由于破碎过程结束,在礁坪上的再生波带增水趋于常值,其中无礁冠时波浪破碎导致的增水为 0.6 cm,对应的相对增水值(礁坪增水最大值与礁坪静水深的比值)为 6%,有礁冠时的增水为 1.7 cm,对应的相对增水值为 17%;值得注意的是, MWL 的沿礁分布以及增水的产生并未受到驻波的影响而出现起伏。对比有无礁冠两种礁形下 MWL 的变化特征,发现当礁冠存在时破碎点附近平均水位的变化同样更为剧烈。根据图中 MWL 变化特征,估算有无礁冠时的破碎带宽度(即图 3b 和图 4b 中箭头所示的破碎点和破碎带终点之间的距离)分别为 1.2 m 和 2.7 m,与实验中的观测值 1.38 m 和 2.92 m (由表 1 计算)基本一致。

2.2 波生流

珊瑚岸礁波浪破碎带内垂向水流结构特征对于珊瑚沙输运等海岸动力过程具有重要影响。本文通过对沿波浪传播方向的水流在垂向上的分布进行详细的测量,来分析岸礁上波生流的变化规律。以选取的工况为例,图 5 对比了礁冠存在与不存在时若干有代表性的垂线上中间水深处水平沿礁流速(调整到相位一致)的时间序列。在浅化带(L_1),实测流速呈现明显的周期性变化,且振幅在有无礁冠两种情况下基本相同;在外破碎带的破碎波冲击点附近(L_5),瞬时流速呈锯齿状不对称分布,具有典型的非线性波特征;在内破碎带的溅波点附近(L_9),流速则不甚规

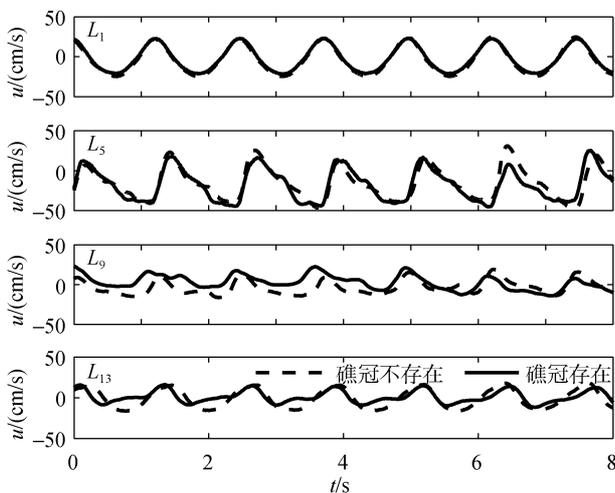


图 5 $h_0=0.45$ m, $H_0=0.095$ m, $T=1.25$ s 波况下 L_1 , L_5 , L_9 和 L_{13} 垂线中间水深处水平沿礁流速历时曲线

Fig. 5 Time-series of the cross-reef velocity at mid-depth from selective vertical survey lines (L_1 , L_5 , L_9 , and L_{13}) across different reef profiles

则,一方面是由于波浪破碎引起的紊流和掺气作用对流速测量产生了影响,另一方面是由于高频波的产生;相较于 L_1 和 L_5 ,由于礁冠的阻水作用, L_9 位置在礁冠存在时的流速幅值较礁冠不存在时小;在破碎带后的再生波带(L_{13}),流速变化倾向有序,由于高频波的影响存在次波峰,而流速幅值几乎与 L_9 处相同。

图 6 和图 7 分别展示了礁冠不存在和存在时沿礁平均水平流速(u)随水深的变化规律。本文通过集合平均法求得平均流速,即先对每个采样点所测的流速在几十个波周期内取相位平均,然后求一个波周期内相位平均流速的平均值得到总时均流速,图 6 和图 7 中采用误差条表示各测点时均流速的测量误差,误差通过相位平均流速的标准差计算。测点的位置由离礁缘的距离(礁缘向岸侧为正向)和相对高程 z/h 确定(z 为测点高程, $z=0$ 为静水面, h 为当地静水深),时均流速由当地浅水波波速 $c = \sqrt{gh}$ 进行无量纲化。由于破碎波的掺气作用,在溅波点附近流速测量误差较大(如图 6 和图 7 中的 $L_6 \sim L_9$)。

图 6 表明,当礁冠不存在时,浅化带($L_1 \sim L_3$)平均水流流向离岸方向,即海底回流(波谷以上未能测到区域的平均水流为向岸流),且随着水深增大呈线性增大,这是非破碎波的典型特征;在外破碎带的冲击点离岸侧($L_4 \sim L_6$),流速呈非线性分布,床面附近接近于 0,在破碎波波谷附近最大,其中在 L_5 位置,波谷附近的最大流速达到 $0.15c$;在内破碎带(溅波区向岸侧)($L_6 \sim L_{11}$),破碎波完全发展为涌波(bore),大部分测点的流速为负值,即流向离岸方向,仅在 L_7 和 L_8 处的波谷附近流速为正值,即流向海岸方向。实验中观察到,从 L_6 到 L_{11} 波浪破碎强度逐渐减小,涌波尺度逐渐减小,由于向岸的质量输移主要由行进的涌波产生,故观察到的平均流的强度也在沿礁减小;在破碎带后的再生波带(L_{12} 和 L_{13}),垂向平均流速基本为零,表明破碎带后近岸区的波生流几乎可以忽略不计。

图 7 表明,当礁冠存在时, L_1 和 L_2 处垂向水流分布与礁冠不存在时相似;但在 L_3 处,波浪临近破碎,礁冠附近的垂向水流结构明显改变;在礁冠顶部($L_4 \sim L_6$),同样存在离岸方向的平均流(海底回流),但强度约为无礁冠时的两倍($0.3c$),最大海底回流出现在礁缘附近,约为 $0.45c$;在溅波点附近(L_7),流速分布与 L_6 处相似,但是幅值明显较小;在内破碎带($L_8 \sim L_{11}$),波生流在底床附近流向离岸方向,波谷

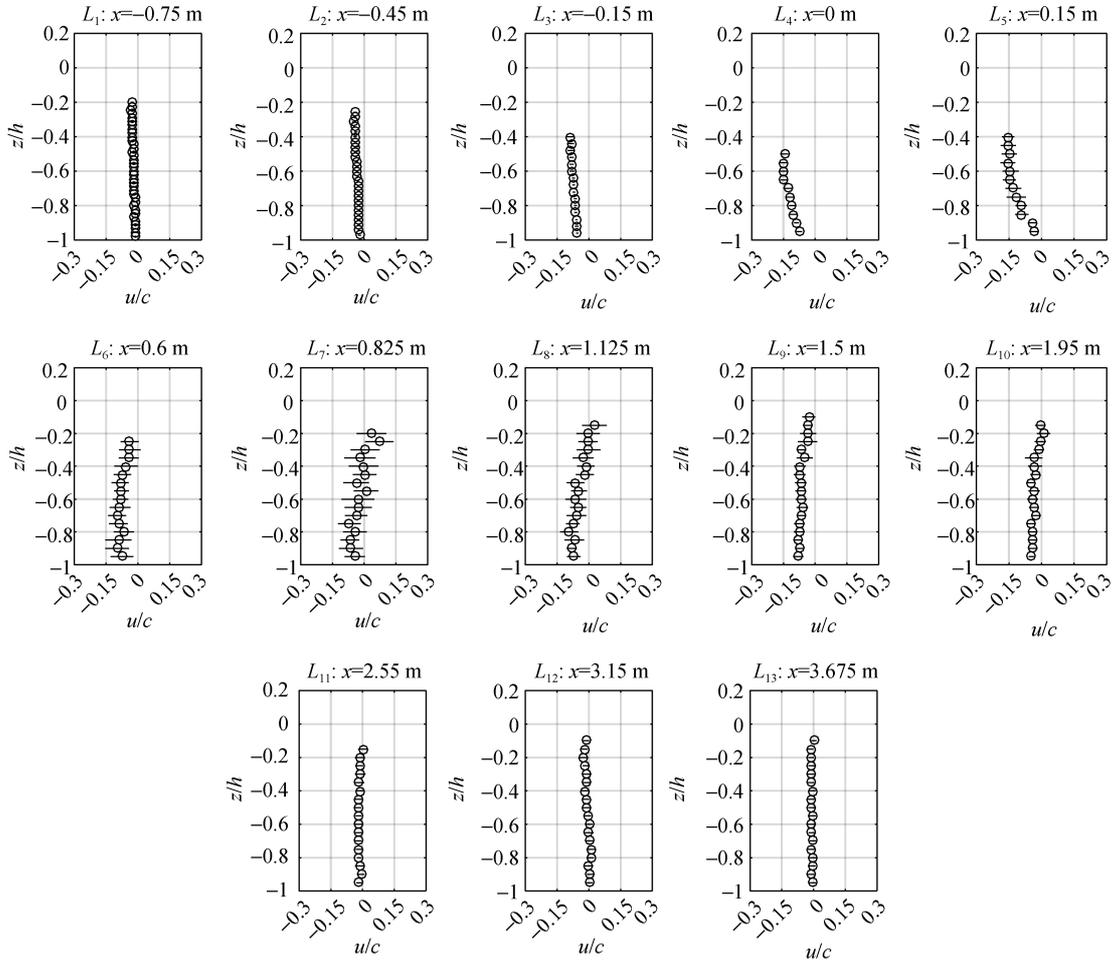
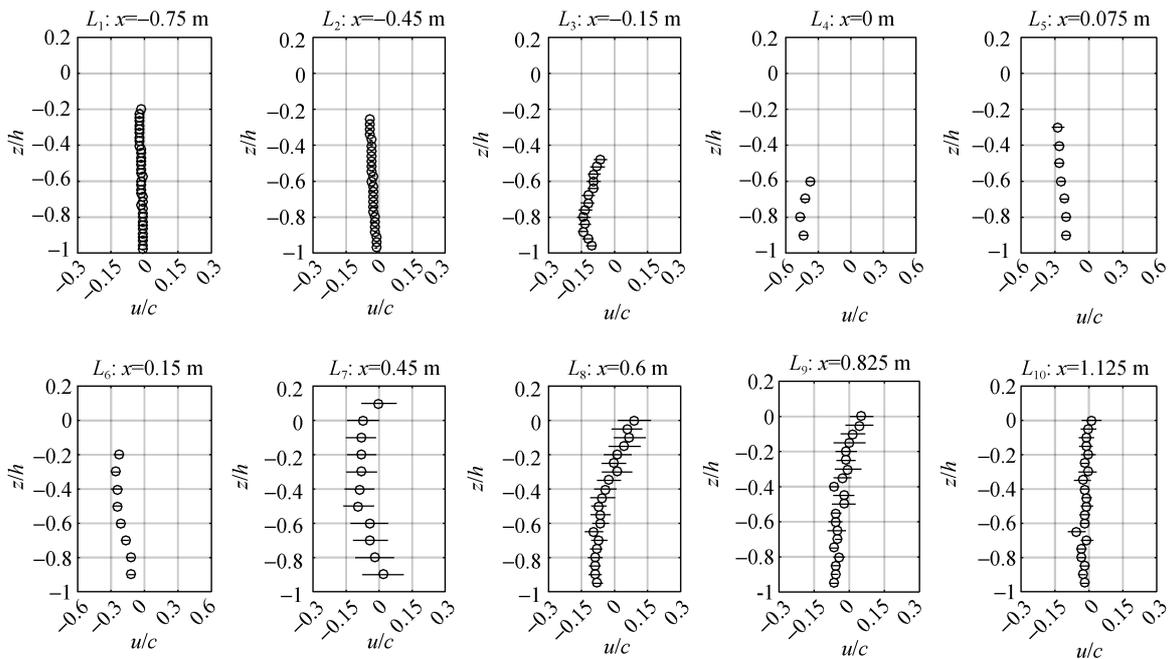


图 6 礁冠不存在时水平沿礁时均流速随水深的变化

误差条: 测量误差(图 7 同)

Fig. 6 Variation of time-averaged cross-reef velocity as a function of depth in the absence of reef crest
Error bar: The measured error (also applied in Fig. 7)



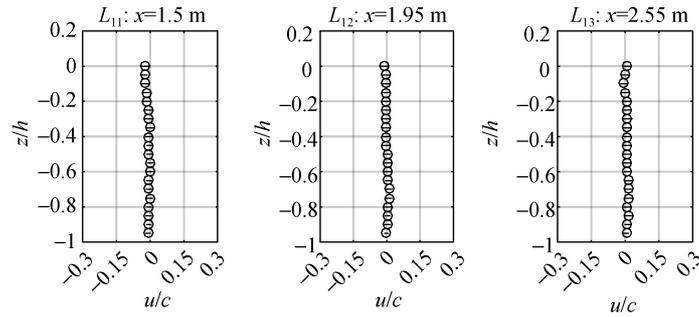


图7 礁冠存在时水平沿礁时均流速随水深的变化

Fig. 7 Variation of time-averaged cross-reef velocity as a function of depth in the presence of reef crest

附近则流向海岸方向,同时强度逐渐减小;在破碎带后的再生波带(L_{12} 和 L_{13}),海底回流的强度几乎可以忽略。综上所述,相较于无礁冠的情况,当礁冠存在时海底回流在礁冠附近明显较大,而在礁冠后随着破碎带的变窄而出现海底回流的范围变小。这表明,类似于明渠流中宽顶堰的阻水作用,礁冠能够阻碍近岸侧水体向外海侧的回流,从而影响礁坪和远海之间长期的水体交换,这对礁坪上珊瑚沙的运动会产生重要的影响。

值得注意的是,本文测得的礁冠不存在时典型卷破波作用下沿礁的波生流垂向分布规律与已有文献^[17]中报道的在平直海岸情况下的测量结果比较一致,表明典型的一维珊瑚岸礁和平直海岸上波浪破碎、增水和波生流的产生机理具有一致性。由于实验中的波浪水槽为封闭容器,向岸方向的质量输移流必须由离岸方向的海底回流补偿,以保证水槽任一截面净质量输移为零。实际的珊瑚礁系统可能在沿岸方向分布并不均匀,往往存在着某些裂口,近似于沙质海岸的裂流系统,从而形成近岸水平环流。当此类环流存在时,向岸流主要是通过裂流回到外海而海底回流会显著减小,甚至有实验室测量中发现,垂向水流仅表现为向岸流而不存在海底回流的情况^[18],因此本文的结论适用于沿岸方向分布较均匀的大片岸礁(不存在裂口)或远离裂口的区域。

3 结论

本文通过物理模型实验对岸礁破碎带附近沿礁分布的波浪和水流进行了详细的测量,实验在典型卷破波条件下测试了礁冠存在与不存在时的两种礁形。分析表明,在珊瑚岸礁上由于存在多重的波浪反射作用形成了不完全驻波,但沿礁平均水位以及增水的产生并未受到驻波的影响;破碎带附近由于浅

化作用产生高次谐波,波浪破碎所耗散的能量主要由主频波提供,造成礁坪上透射波的组成中二次谐波与主频波的能量相当;礁冠的存在使破碎带宽度减小、礁坪上增水变大以及礁坪上各次谐波变小;在典型的卷破波条件下,礁冠不存在时岸礁上波生流的沿礁分布特征与已有文献中报道的平直海岸的情况相似,而礁冠存在的作用类似于明渠中宽顶堰,一定程度上阻碍了靠岸侧水体向离岸侧的回流,进而影响礁坪和远海之间的水体交换。研究成果有助于进一步研究珊瑚礁附近的水动力过程和珊瑚沙的运输机理,并为岛礁工程的建设与维护提供一定的理论参考,也可用于校核与波浪破碎相关的数值模型。

参考文献:

- [1] Vetter O, Becker J M, Merrifield M A, et al. Wave setup over a Pacific Island fringing reef [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: C12066.
- [2] Jago O K, Kench P S, Brander R W. Field observations of wave-driven water-level gradients across a coral reef flat [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: C06027.
- [3] Brander R W, Kench P S, Hart D E. Spatial and temporal variations in wave characteristics across a reef platform, Warraber Island, Torres Strait, Australia [J]. *Marine Geology*, 2004, 207(1-4): 169-184.
- [4] Lowe R J, Falter J L, Bandet M D, et al. Spectral wave dissipation over a barrier reef [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: C04001.
- [5] Yao Y, Becker J M, Ford M R, et al. Modeling wave processes over fringing reefs with an excavation pit [J]. *Coastal Engineering*, 2016, 109: 9-19.
- [6] 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.
- [7] Yao Y, Huang Z, Monismith S G, et al. 1DH Boussinesq

- modeling of wave transformation over fringing reefs [J]. *Ocean Engineering*, 2012, 47: 30-42.
- [8] Yao Y, Huang Z, Monismith S G, et al. Characteristics of monochromatic waves breaking over fringing reefs [J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 29(1): 94-104.
- [9] 梅弢, 高峰. 波浪在珊瑚礁坪上传播的水槽试验研究[J]. *水道港口*, 2013, 34(1): 13-18.
MEI Tao, GAO Feng. Flume experiment research on law of wave propagation in reef flat [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2013, 34(1): 13-18.
- [10] 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[J]. *海洋工程*, 2015, 33(2): 42-49.
LIU Shuxue, LIU Ning, LI Jinxuan, et al. Experimental researches on wave propagation characteristics on reefs terrain [J]. *The Ocean Engineering*, 2015, 33(2): 42-49.
- [11] 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[J]. *海洋学报*, 2015, 37(12): 66-73.
YAO Yu, DU Ruichao, YUAN Wancheng, et al. Experimental study of wave transformation around the surf zone over fringing reefs [J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(12): 66-73.
- [12] 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.
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.
- [13] Gourlay M R. Wave set-up on coral reefs. 1. Set-up and wave-generated flow on an idealised two-dimensional reef [J]. *Coastal Engineering*, 1996, 27: 161-193.
- [14] Hensch J L, Leichter J J, Monismith S G. Episodic circulation and exchange in a wave-driven coral reef and lagoon system [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53: 2681-2694.
- [15] Brossard J, Perret G, Blonce L, et al. Higher harmonics induced by a submerged horizontal plate and a submerged rectangular step in a wave flume [J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56: 11-22.
- [16] Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to surf beats [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1962, 13: 481-504.
- [17] Ting F C K., Kirby J T. Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone [J]. *Coastal Engineering*, 1994, 24: 51-80.
- [18] Drønen N, Karunarathna H, Fredsøe J, et al. An experimental study of rip channel flow [J]. *Coastal Engineering*, 2002, 45: 223-238.

Experimental study of wave transformation and wave-driven current around the surf zone over coral reefs

YAO Yu^{1, 2}, TANG Zheng-jiang¹, DU Rui-chao¹, JIANG Chang-bo^{1, 2}

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China;
2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China)

Received: Mar. 13, 2016

Key words: higher harmonic waves; wave-driven current; surf zone; fringing reef

Abstract: To investigate the wave transformation and wave-driven current around the surf zone over fringing reefs, a series of laboratory experiments are performed in a wave flume to measure the cross-reef water level and flow in details. Experimental results are reported for two reef profiles with and without the reef crest under a typical plunging breaker condition. Data analysis shows that partial standing waves across the reef are formed due to multiple wave reflection, and higher harmonics around the surf zone are generated through wave shoaling. The energy dissipation in the surf zone results primarily from the dissipation of fundamental harmonics, and the resultant second harmonic waves are comparable to the fundamental harmonics on the reef flat. The presence of the reef crest reduces the surf zone width, increases the wave-induced setup, and decreases the harmonic wave amplitudes on the reef flat. The variation of the wave-driven current across the fringing reef without the reef crest is similar to that for the plane beaches. The existence of the reef crest causes the retention of the mean-flow on the leeside of the crest to some extent.

(本文编辑: 李晓燕)