规则波在岛礁地形上传播变化特性的试验

任冰*, 唐洁, 王国玉, 朱干城

大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024

* 联系人, E-mail: bren@dlut.edu.cn

2017-10-01 收稿, 2017-12-06 修回, 2017-12-06 接受, 2018-02-06 网络版发表

国家自然科学基金(51679032)资助

摘要 通过物理模型试验研究了规则波在陡峭珊瑚礁地形上的传播、变形和破碎变化特性. 试验研究了在深水波和有限水深波作用下, 礁坪上波浪增水高度与礁坪上淹没水深和入射波参数等的变化规律. 试验结果表明, 当礁坪上淹没水深较小时, 波浪在礁面上发生破碎, 礁坪上平均水面增高值较大, 在本试验范围内, 最大增水值接近 $0.40H_0$. 当礁坪上淹没水深较大时, 波浪在礁坪上发生破碎, 礁坪上最大增水值不到 $0.10H_0$. 文中将本试验结果与Gourlay, Nelson和Jensen等人的试验结果进行了比较, 分析了各试验结果的差异及其原因, 解释了礁坪上波浪增水高度随周期的变化关系, 并建议了Gourlay提出的波浪增水计算公式中的波能耗散系数取值范围.

关键词 珊瑚礁, 波浪破碎, 波能耗散, 波浪增水

太平洋群岛和我国南海诸岛多为珊瑚礁地貌, 其周边围绕诸如岸礁、堡礁、台礁和环礁等不同形态的珊瑚礁. 深海珊瑚礁的礁坪上通常水深很浅, 伴有浅凹地、锅穴、礁斑以及泻湖等, 其礁前斜坡陡峭, 礁面上水深变化剧烈, 水深由礁底处几千米急速变化到礁缘上的几米. 当深海波浪行进到礁面时, 由于该区域水深的急剧变化, 波浪将沿礁面斜坡带发生浅水变形并在礁缘或礁坪上破碎. 虽然大部分入射波的波能由于在礁缘附近的波浪破碎作用而被耗散掉, 但是在台风和风暴潮期间, 由于波浪变形和破碎的强非线性作用, 导致礁坪上产生显著的波浪增水或低频波振荡, 从而威胁礁坪后方建筑物的安全. 此外, 由波浪破碎产生的波生流对于礁坪上泥沙运动、养分输移和生物栖息也有很大的影响. 随着我国现阶段围礁填海工程的开展, 珊瑚礁所在海区的水动力条件和生态环境也面临着严峻的挑战, 开展珊瑚礁海域海洋动力因素演变过程的影响机制研究对于保证恶劣海况下珊瑚礁上防护结构物的安全和周围

水域生态环境等具有重要的意义.

珊瑚礁的水动力学问题研究始于20世纪50年代在太平洋的珊瑚礁上开展的系列现场观测. 基于现场实测数据, 学者们得到了关于波浪在礁坪上的传播、破碎和增水过程(Gerritsen^[1], Hardy和Young^[2], Roberts等人^[3]), 波生流的形成以及波能耗散(Hench等人^[4]; Jago等人^[5]; Symonds和Black^[6]; Taebi等人^[7])等方面的基本认识. 鉴于原型观测的高昂费用和恶劣环境, 以及特定岛礁的现场观测数据不适用于其他海域岛礁, 针对不同珊瑚礁地貌及所在海域的水文条件开展物理模型试验极其必要.

自20世纪80年代开始, 学者们对不同的珊瑚礁原型进行概化, 开展了一系列的物理模型试验研究, 如Gerritsen^[1]关于檀香山Ala Moana礁, Seelig^[8]针对关岛附近岸礁, Nelson和Lesleighter^[9]关于大堡礁航道附近礁坪, Jensen^[10]针对马尔代夫的Male岛, Gourlay^[11]关于大堡礁的Hayman岛, Gourlay^[12]、柳淑学等人^[13,14]和Yao等人^[15,16]关于理想礁体等开展的礁坪上

引用格式: 任冰, 唐洁, 王国玉, 等. 规则波在岛礁地形上传播变化特性的试验. 科学通报, 2018, 63: 590–600

Ren B, Tang J, Wang G Y, et al. Experimental investigation of monochromatic wave transformation characteristics over the coral reefs (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 590–600, doi: 10.1360/N972017-01049

波浪破碎、波浪增水和波生流的试验研究. Gourlay^[17]比较了上述部分物模试验的礁体形状、水文条件和试验数据,分析了包括礁面坡度、礁坪形状和礁坪宽度等对礁坪上波浪增水高度的影响,并据此总结出,虽然试验各礁的地貌形态和入射波浪条件各不相同,但是礁盘上波浪增水基本随入射波能的增大而增大.对于礁坪上淹没水深较大的礁体,波浪在礁坪上破碎,产生的波浪增水相对较小.对于礁坪上淹没水深较小的礁体,波浪在礁面即礁盘向海侧的陡峭前坡上破碎,礁缘处越浪产生相对较大的增水. Gourlay等人^[17,18]应用波能流守恒定律分别给出了岸礁(礁坪后方接岸)和台礁上(礁坪后方是泻湖或开放水域)波浪增水的计算公式,其中由波浪破碎导致的波能损耗由Longuet-Higgins和Stewart^[19]提出的辐射应力理论计算.

上述各物模试验中,礁面斜坡坡度从1:14到1:1不等,大部分礁面以缓坡为主,且模型前试验水深均不足1 m,其水深波长比范围为0.04~0.55,大部分入射波属于有限水深波,甚至有部分为浅水波,与深海中珊瑚礁礁体前水深几百米到上千米的情形差别较大. Gourlay和Colleter^[18]亦指出,其研究成果对波浪增水与周期变化的关联性没有得到合理的解释.由于波浪增水以及由此引起的波生流对于珊瑚礁礁坪上的水动力环境和生态系统的影响很大,特别是在目前全球气候变暖和海平面上升的情势下,当极端天气事件发生时,礁坪上的波浪增水增加了其后方陆域遭受洪水侵害的危险.随着我国南海海域岛礁建设工程的开展,礁坪上新建水工结构物也面临着设计水位的选取缺少科学依据的难题.

本文旨在通过实验室物理模型试验,开展深水及有限水深波浪在珊瑚礁地形上的传播、变形、破碎和增水过程研究.确定不同参数的入射波在礁体上的破碎形态和破碎位置,分析波浪在礁面和礁坪上的变形与衰减过程,讨论影响礁坪上波浪增水高度的相关因素.并将本试验结果与Gourlay^[12,17]及其他学者的试验结果进行比较分析,明确礁坪上最大增水高度与入射波周期的变化关系.

1 试验设计

试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的非线性波浪水槽中进行.水槽长60 m、宽4 m、高2.5 m.水槽的前端配置液压伺服式不规则推

板造波机,造波机采用微机控制并且配有数据采集系统.末端设置有消能网,用来减弱波浪反射的影响.为避免结构物模型前的反射波在造波板处形成二次反射,水槽后半部采用长度为13.2 m的隔板分割成3 m宽度段和1 m宽度段两部分,试验工作段位于1 m宽度段内.试验布置情况如图1所示.

试验中珊瑚礁地形的概化模型由坡度为1:1的斜坡礁面和水平礁坪段组成,其表面为抹平的光滑混凝土面,礁坪高度为1.80 m.试验采用重力相似准则,模型比尺为1:25.图1中坐标原点位于礁面的坡脚,试验中共布置15个浪高测点,各测点位置及相互间的间距如图1所示.其中G1~G3位于礁体前,用于监测礁体前入射波浪和反射波浪;G4~G6位于礁面上,用于测定波浪在斜坡上的变形过程;G7位于坡顶礁缘处,G8~G15位于水平礁坪段,用来测量波浪进入礁坪后的变形和破碎以及增水过程.G1~G15的坐标位置列于表1.为避免当礁坪上水位很小时浪高仪末端脱离水面从而产生记录数据不连续的现象,实验中在礁坪上相应位置布置了深度10 cm的长方体孔洞,试验过程中浪高仪的下端10 cm一直浸在孔洞水中.

试验中坡前水深 d 分别为1.80, 1.82, 1.85, 1.90 m,对应礁坪上的淹没水深 d_r 分别为0, 2, 5, 10 cm.试验中对于不同水深、不同周期和不同波高组合进行试验.具体的波浪要素见表2.由表2中所列数据可以看出,当入射波周期 $T=1.75$ 和 2.0 s的工况,水深波长比 d/L_0 为0.30~0.40,属有限水深范畴,除此之外的所有工况, d/L_0 均大于0.50,所以试验入射波可近似视为深水波.

2 试验结果分析

2.1 波浪的传播和破碎过程

当波浪传播到礁面上时,由于水深变浅和礁体的反射作用,礁前波高迅速增大,从而在礁面、礁缘或礁坪上产生破碎.图2给出了部分试验组次,波浪在礁面斜坡或礁坪上传播和破碎的照片.由图2可知,波浪在礁缘或礁坪上破碎后,破碎后的水体将以段波形态继续沿礁坪向前传播.结合试验现象可知,在本次试验范围内,对于淹没水深较小的情形($d_r=0$ 和2 cm),波浪在礁面斜坡上破碎.而对于淹没水深较大的情形($d_r=5$ 和10 cm),大多数情形下,波浪在礁坪上破碎.图2(a)给出了波浪在礁坪上传播和破碎的试

图1 试验水槽、模型设置和测点布置示意图(单位: m)
Figure 1 The sketch-map of the experimental flume, model settings and wave gauges positions (unit: m)

表1 各浪高仪位置坐标(单位: m)
Table 1 The abscissas of all the wave gauges in the experiments (unit: m)

编号	坐标	编号	坐标
G1	-2.8	G9	2.6
G2	-2.4	G10	3
G3	-1.6	G11	3.4
G4	0	G12	3.8
G5	0.6	G13	4.8
G6	1.2	G14	6.8
G7	1.8	G15	8.8
G8	2.2		

关于波浪在礁体上的破碎位置, Gouraly^[12]指出, 当礁坪上淹没水深较大时, 即 $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 > 0.7$, 波浪在礁坪上发生破碎; 当礁坪上淹没水深较小时, 即 $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.7$, 波浪在礁面斜坡上破碎. 这里礁坪上的淹没水深取静水深 d_r 与增水高度 $\bar{\eta}_r$ 之和. 综合试验现象分析可知, 该判别标准对大多数组次的情况适用, 但是对于礁坪上淹没水深为 $d_r=5$ cm 的情况, 在入射波高较小的情形 (如 $H_0=8$ cm), 此时 $0.7 < (\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.8$, 波浪破碎位置在礁面上. 所以上述标准可调整为当 $0.7 < (\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.8$ 时, 对于入射波高较小的情形, 波浪破碎位置在礁面上.

验照片. 图2(b), (c)给出了淹没水深较大时波浪在礁坪上破碎的照片. 图2(d), (e)给出了礁坪淹没水深较小时波浪在礁面斜坡上破碎的照片.

2.2 波面高度变化

试验中通过沿水槽工作段布置的15个浪高仪记录了不同位置的波面变化历时曲线. 图3给出了当礁

表2 试验波浪要素
Table 2 The wave conditions in the experiments

礁前水深 d (m)	平均周期 T (s)	平均波长 L_0 (m)	相对水深 d/L_0	平均波高 H_0 (cm)
1.80, 1.82, 1.85, 1.90	1.0	1.56	1.15~1.22	8, 10, 12.5
	1.25	2.44	0.74~0.78	8, 10, 15, 20
	1.50	3.50	0.51~0.54	8, 10, 15, 20
	1.75	4.70	0.38~0.40	8, 10, 15, 20
	2.0	6.00	0.30~0.32	8, 10, 15, 20

图2 (网络版彩色)波浪在礁上传播和破碎过程的试验照片. (a) $d=1.80$ m, $T=1.25$ s, $H_0=10$ cm; (b) $d=1.90$ m, $T=1.25$ s, $H_0=10$ cm; (c) $d=1.90$ m, $T=1.75$ s, $H_0=10$ cm; (d) $d=1.80$ m, $T=1.25$ s, $H_0=10$ cm; (e) $d=1.80$ m, $T=1.75$ s, $H_0=10$ cm

Figure 2 (Color online) The photos of wave propagations and wave breakings over the reef-top. (a) $d=1.80$ m, $T=1.25$ s, $H_0=10$ cm; (b) $d=1.90$ m, $T=1.25$ s, $H_0=10$ cm; (c) $d=1.90$ m, $T=1.75$ s, $H_0=10$ cm; (d) $d=1.80$ m, $T=1.25$ s, $H_0=10$ cm; (e) $d=1.80$ m, $T=1.75$ s, $H_0=10$ cm

坪上淹没水深 $d_r=0$ cm和5 cm、入射波周期 $T=1.50$ s和波高 $H_0=15$ cm时部分测点的波面无量纲化历时曲线. 图中G3位于礁面坡脚前1.6 m处, 其波面为入射波和由礁面反射回的反射波叠加而成. G5位于斜坡中间位置, 水深为1.2 m, 仍然处于有限水深范畴, 此处波浪并未发生浅水变形, 其波幅大于入射波振幅的原因仍然是由于斜坡前入、反射波叠加导致. G7位于礁缘处, 其淹没水深很小, 波浪发生浅化变形, 波峰和波谷严重不对称. 随着波浪在礁缘处或其后方发生剧烈的卷破破碎后, 波面变得极不规则, 如G9, G12和G15所示波面. 波浪破碎后在礁坪上形成适应该水深下的段波(bore)继续向前传播. G9, G12和G15

的波面变化周期与入射波周期基本一致, 呈现锯齿型, 但波高明显较入射波高小. 同时还可以看出, 自礁缘上G7位置以后, 各测点的波峰和波谷相对于静水面严重不对称, 产生明显的波浪增水现象, 特别是对于位于礁坪后方的测点, 增水现象极其明显.

为分析礁面斜坡上入、反射波浪叠加情况, 图4给出了不同周期波浪入射时斜坡上各测点的波面历时曲线对比. 由图可以看出, G4和G7测点, 当入射波周期为1.75 s时波高最大; G5测点, 当入射波周期为1.50 s时, 合成波高最大; G6测点, 入射波周期为2.0 s时波高最大. 对于不同周期的入射波, 其在斜坡前的反射波相位不同, 由于斜坡上的水深是变化的, 因此

图3 (网络版彩色) 礁坪上各测点波面历时曲线($T=1.50$ s, $H_0=15$ cm)

Figure 3 (Color online) The wave elevations of wave gauges over the reef-top at various submerged depths ($T=1.50$ s, $H_0=15$ cm)

图4 (网络版彩色) 不同周期($T=1.50, 1.75, 2.0$ s), 波浪入射时斜坡上各测点(G4 (a), G5 (b), G6 (c), G7 (d))的波面历时曲线($d_r=0$ cm, $H_0=10$ cm)

Figure 4 (Color online) The wave elevations of the wave gauges (G4 (a), G5 (b), G6 (c), G7 (d)) over the reef-face at various wave periods ($T=1.50, 1.75, 2.0$ s) ($d_r=0$ cm, $H_0=10$ cm)

反射波的相位变化是很复杂的, 且不同周期的波浪在浅水地带的浅化程度也不同. 从试验布置来看, 礁面斜坡上从G6测点开始, 水深明显变浅, 波浪浅化作用明显. 所以对于斜坡上同一位置处, 不同周期的波浪, 由于其入、反射波相位不同, 导致其叠加后的波面高度也不同; 对于水深较浅的G6和G7测点, 不同周期的波浪浅化程度也不相同. 在本试验范围内,

当波浪沿礁面斜坡爬到坡顶礁缘位置G7测点时, 对于相同水深和入射波高的大多数试验组次, 周期 $T=1.75$ s时的波高最大.

2.3 礁坪上波高分布变化特征

图5给出了不同条件波浪在珊瑚礁地形传播过程中平均波高的沿程变化曲线. 由图可知, 在入射波周

期和波高都相同的情况下,在波浪行进到斜坡上G6测点($x=1.2\text{ m}$)之前,G1~G6各测点的波高由于入、反射波相位不同叠加后波动显著.当波浪到达斜坡上浅水地带以后,波浪发生浅化变形和破碎,波能耗散剧烈,各测点波高急剧减小.破碎后波浪以段波形式继续向前传播,由于试验地形为光滑抹面,底摩阻引起的波浪能量损失较小,所以波浪破碎后波高基本由水深控制,礁坪上各测点波高差别不大.对于不同的淹没水深,礁坪上各测点波高基本随水深的增大而增大.由试验数据可知,礁坪上各测点波高在G7测点($x=1.8\text{ m}$)之后急剧减小,到 $x=4\text{ m}$ 以后,各测点波高趋于稳定,沿程变化很小.对于淹没水深 $d_r=0, 2$ 和 5 cm 的情况,在 $x=3.8\text{ m}$ 以后,各点波高基本小于 $0.3H_0$,对于 $d_r=10\text{ cm}$ 的情况,各点波高基本小于 $0.5H_0$.

而当入射波周期不同、淹没水深和入射波波高保持不变时,在波浪爬坡到礁缘前,由于各测点处不同

周期的波浪其入、反射波浪相位不同,所以叠加后波高也不相同.当波浪破碎后,礁坪上各测点无量纲波高随周期变化较小.而当入射波周期和淹没水深保持不变、入射波高变化时,礁坪上破波带外各点无量纲波高随入射波高的变化基本不变.

2.4 礁坪上平均水面分布和变化特征

当波浪在礁面或礁坪上发生破碎后,其平均水面将增高,发生波浪增水.图6给出了各周期下平均水面(mean water level, MWL)随不同淹没水深的沿程变化.试验中平均水面值通过将一定时间段的自由液面高度求时间平均得到.当礁坪上水深较浅($d_r=0\text{ cm}$ 和 2 cm),波浪在礁面上破碎时,在礁缘G7测点处,波浪变形剧烈,产生显著的越浪,使得G7处的平均水面值明显比其附近测点大.越到礁坪上的波浪形成的段波继续沿礁坪传播,沿程波浪继续破碎,波高衰减,增水沿着波浪传播方向继续增大,并在礁坪上

图5 (网络版彩色)不同入射波浪条件下波高的沿程变化

Figure 5 (Color online) The variation of wave heights along the reef model under the various incident waves

图6 (网络版彩色)不同淹没水深下平均水面沿程变化。(a) $T=1.25$ s, $H_0=15$ cm; (b) $T=1.50$ s, $H_0=15$ cm; (c) $T=1.75$ s, $H_0=15$ cm; (d) $T=2.0$ s, $H_0=15$ cm

Figure 6 (Color online) The variations of the MWL at various submerged depths. (a) $T=1.25$ s, $H_0=15$ cm; (b) $T=1.50$ s, $H_0=15$ cm; (c) $T=1.75$ s, $H_0=15$ cm; (d) $T=2.0$ s, $H_0=15$ cm

行进约一倍波长后其增水达到最大值。当礁坪上水深较深,尤其是当 $d_i=10$ cm时,波浪在行进到礁坪上后发生破碎,在礁缘G7测点处甚至出现微小减水,直至波浪在礁坪上破碎后才产生增水,礁坪后方测点受潟湖绕射影响,使得G15的增水略微减小。

图7给出了礁坪上最大增水的绝对值随入射波要素变化的关系图。表3给出了本试验中得到的礁坪上最大增水值。由表3和图7可以看出,礁坪上最大增水基本随入射波高增大而增大。当礁坪上的淹没水深减小,波浪在礁坪上的破碎更加剧烈,故礁坪上的最

大增水随礁坪上淹没水深的减小而增大。但是最大增水与周期的变化关系较为复杂,在本次试验范围内,最大增水基本发生在周期 $T=1.75$ s处。而Gourlay^[12]的试验结果是当周期 $T=1.50$ s时礁坪上增水值最大, Goulay^[12]的分析没有解释此种现象的原因。综合前文的波浪破碎过程和波高分布可以看出,在本次试验中,当周期 $T=1.75$ s时,波浪发生破碎时的波高最大。虽然本试验地形坡度与Gourlay^[12]相同,但是斜坡前水深差别很大,本实验礁体前水深大于1.8 m,而Gourlay^[12]礁体前最大水深仅为0.42 m,其他研究的试

图7 (网络版彩色)礁坪上最大增水与波浪要素的关系。(a) 增水与入射波高关系;(b) 增水与入射周期关系;(c) 增水与淹没水深关系

Figure 7 (Color online) The relationship between the maximum wave set-up and the various wave conditions. The maximum wave set-up versus incident wave heights (a), versus incident wave periods (b), versus submerged depths (c)

表3 所有入射波况下礁坪上最大增水

Table 3 The maximum wave set-up over the reef-top under the all wave conditions

平均周期 T (s)	平均波高 H_0 (cm)	$d_r=0$ cm 最大增水 $\bar{\eta}_r$ (cm)	$d_r=2$ cm 最大增水 $\bar{\eta}_r$ (cm)	$d_r=5$ cm 最大增水 $\bar{\eta}_r$ (cm)	$d_r=10$ cm 最大增水 $\bar{\eta}_r$ (cm)
1.0	8	2.3	1.8	1.2	0.1
	10	2.7	2.2	1.5	0.5
	12.5	3.5	2.7	2.0	0.5
1.25	8	2.4	1.9	0.8	0.2
	10	2.9	2.5	1.2	0.3
	15	3.9	3.3	2.2	0.6
	20	5.0	4.6	3.3	0.8
1.50	8	2.6	2.1	1.2	0.3
	10	3.1	2.6	1.7	0.4
	15	4.1	3.7	2.9	0.9
	20	5.1	4.8	3.7	1.8
1.75	8	3.0	2.4	1.5	0.4
	10	3.8	3.1	2.1	0.7
	15	5.5	4.6	3.3	1.4
	20	6.5	5.8	4.5	2.0
2.0	8	2.8	2.3	1.4	0.3
	10	3.4	2.8	1.7	0.6
	15	4.9	4.3	3.0	1.4
	20	6.3	5.6	4.2	1.8

验条件(如Gerritsen^[1], Seelig^[8], Nelson和Lesleighter^[9], Gourlay^[11], Yao等人^[15,16])也远小于深水波条件. 这导致波浪行进到礁面上时的入、反射波相位不同、波浪变形形态也不相同, 所以本试验相近波况的波浪破碎位置和破碎波高与Gourlay^[12]也不同, 由此可以解释为不同试验水深导致了最大增水发生的周期不同.

为了进一步分析礁坪上波浪增水高度与入射波要素的变化关系, 文中将礁坪上的淹没水深和波浪增水高度两个参数进行了无量纲化处理, 即相对淹没水深和相对增水高度, 前者取礁坪上淹没水深(含增水)与外海入射波高的比值, 即 $(\bar{\eta}_r+d_r)/H_0$, 后者取 $\bar{\eta}_r/T\sqrt{gH_0}$. 图8给出了本试验结果与Gourlay^[12], Nelson和Lesleighter^[9], Jensen^[10]的试验结果的比较. 由图8可以看出, 本试验结果在相对淹没水深 $(\bar{\eta}_r+d_r)/H_0=0.3\sim 0.5$ 时, 所测得的相对增水值较Gourlay^[12]的结果小约25%, 经比较分析可以发现, 这几组数据是 $d_r=0$ cm的结果, 在相近的入射波况下, 虽然Gourlay^[12]试验地形坡度与本试验相同, 但是其实验地形坡前水深为 $d=0.32\sim 0.42$ m, 远小于深水波条件, 由此波高受水深影响较大, 导致波浪破碎时波

高可能大于本试验中的对应组次. 由图8还可以看出, 在相对淹没水深 $(\bar{\eta}_r+d_r)/H_0=0.6\sim 1.4$ 时, 在相近的入射波况下, 本文的相对增水不到Nelson和Lesleighter^[9]值的30%, 比Nelson和Lesleighter^[9]的结果小得多. 在Nelson和Lesleighter^[9]的试验中, 其地形为缓坡前的台阶地形(坡度为1:30, 台阶前水深约为70 cm). 由于波浪在台阶地形上与在斜坡地形上的变形过程差别很大, 因而导致二者试验增水值差异也很大.

Gourlay^[17]应用波能流守恒和辐射应力理论给出了礁坪上波浪增水的经验公式:

$$\frac{\bar{\eta}_r}{T\sqrt{gH_0}} = \frac{3}{64\pi} K_p \times \left[1 - K_R^2 - 4\pi\gamma_r^2 \left(\frac{\bar{\eta}_r+d_r}{H_0} \right)^2 \frac{1}{T} \sqrt{\frac{(\bar{\eta}_r+d_r)}{g}} \left(\frac{H_0}{\bar{\eta}_r+d_r} \right)^{3/2} \right], \quad (1)$$

其中, K_p 为礁体形状参数, 表示波能耗散程度, K_R 为礁面反射系数, γ_r 为破碎指标.

图8中还给出了由式(1)得到的计算结果与本文实验结果的比较, 本文对于系数 K_R , 根据实验中入射波分离结果, 取值为0.45. 对于系数 K_p , Gourlay^[17]

图8 (网络版彩色)最大增水值与其他试验结果的对比. 虚竖线表示 $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 = 0.7$, 横坐标为相对淹没水深, 纵坐标为相对增水. (a) $K_p=0.35$; (b) $K_p=0.50$

Figure 8 (Color online) The comparisons between the nondimensional maximum wave set-up and other results. The virtual vertical lines denote $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 = 0.7$. (a) $K_p=0.35$; (b) $K_p=0.50$

的建议值是针对理想光滑礁坪, 当其礁坪上坡度为0时, 建议值为1.0. 考虑到礁坪上还有着波生流、紊能耗散和底摩阻等能耗, 而这部分在Gourlay^[17]的理论公式(1)的推导中没有考虑进去, 所以当 K_p 适当取小一些时, 相当于考虑了其他能流损失的影响.

为确定上述波能耗散参数 K_p 的取值, 本文分析了不同的 K_p 下式(1)拟合值与试验值的均方根误差RMSE, 具体表达式见式(2).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N=19} \left[\left(\frac{\bar{\eta}_r}{T\sqrt{gH_0}} \right)_{o,i} - \left(\frac{\bar{\eta}_r}{T\sqrt{gH_0}} \right)_{m,i} \right]^2}{N}}, \quad (2)$$

其中“o”表示试验值, “m”表示拟合值. 每一种淹没水深条件下, 一共有 $N=19$ 种试验工况. 4种不同的淹没水深下均方根误差RMSE分布如图9所示. 由图可以看出, 在 $d_r=0, 2$ 和10 cm时, K_p 取值0.35对应的均方根误差较小; 在 $d_r=5$ cm时, $K_p=0.50$ 对应的均方根误差最小.

由本试验结果来看, 当取 $K_p=0.35$ 时, 由式(1)得到的最大增水值在多数情况下与本文的试验值吻合很好. 但是, 对于礁坪静淹没水深 $d_r=5$ cm的情况却例外, 此时取 $K_p=0.50$, 由式(1)得到的最大增水值在与此条件下与实验值吻合较好. 由于 K_p 系数在这里还包括了可能的能流损失, 对于淹没水深较小的情形($d_r=0$ 和2 cm), 波浪破碎现象严重, 湍流耗散和底摩擦影响大, 所以 K_p 系数应该取小一些; 而对于淹没水深较大的情形($d_r=10$ cm), 此时波能流速度大于小水深情形(Gourlay和Colleter^[18]), 由波生流引起的波

能损耗更大(Gourlay和Colleter^[18]), 所以式(1)中 K_p 系数取值也应该取小一些. 对于实验中 $d_r=5$ cm的情况, 其湍流耗散和底摩擦较 $d_r=0$ 和2 cm的情形要小, 波能流损耗较 $d_r=10$ cm的情形要小, 所以 K_p 系数取值0.50时与实验值吻合较好. 参考图8中相对淹没水深数值, 上述规律大致可以归纳为: 当 $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.5$ 和 $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 > 0.8$ 时, K_p 值建议取0.35, 当 $0.5 < (\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.8$ 时, K_p 值建议取0.50.

图8中还给出了波浪在礁面或礁坪上破碎位置的标识, 对于礁坪上静淹没水深 $d_r=5$ 和10 cm的情况, 三角形标识点表示波浪在礁坪上破碎, 正方形标识点表示波浪在礁面上破碎. 图8中标识可以补充说明前文中关于当 $0.7 < (\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.8$ 时, 对于入射波高较小的情形, 波浪破碎位置在礁面上的情况.

图9 (网络版彩色)不同淹没水深条件下, 不同 K_p 下的RMSE分布
Figure 9 (Color online) The distributions of RMSE for various K_p at different submerged depths over the reef-top

3 结论

本文开展了陡峭岛礁地形上规则波传播变化特性的试验研究,对于不同的礁坪淹没深度、不同入射波要素情况下,波浪经过陡峭礁面和水平礁坪后的波面变形、波高衰减以及波浪增水变化特性进行了分析比较,所得到的主要结论如下:

(1) 波浪在陡峭珊瑚礁地形上传播时,当礁坪上淹没水深较大时,即 $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 > 0.7$,波浪在礁坪上发生破碎;当礁坪上淹没水深较小时,即 $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.7$,波浪在礁面斜坡上破碎。但是当 $0.7 < (\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.8$ 时,对于入射波高较小的情形,波浪破碎位置可能在礁面上。

(2) 礁坪上最大增水随入射波高增大而增大,随

礁坪上淹没水深减小而增大。但是最大增水与入射波周期的变化关系较为复杂,在本次试验范围内,最大增水基本发生在周期 $T=1.75$ s 处。由于不同周期的波浪行进到礁面上时的入、反射波相位不同、波浪变形形态也不相同,所以不同周期的波浪发生破碎时的波高不同,由此导致了本试验最大增水发生在周期 $T=1.75$ s 时。

(3) Gourlay^[17]根据波能流守恒提出的经验公式可以预测礁坪上最大波浪增水范围,但是公式中波能耗散系数 K_p 的取值需要根据不同礁坪形状和礁坪上淹没水深适当调整,对于光滑平直礁坪,当 $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.5$ 和 $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 > 0.8$ 时, K_p 值建议取 0.35,当 $0.5 < (\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.8$ 时, K_p 值建议 0.50。

参考文献

- Gerritsen F. Wave attenuation and wave set-up on a coastal reef. Doctoral Dissertation. Trondheim: University of Trondheim, 1981. 444–461
- Hardy T A, Young I R. Field study of wave attenuation on an offshore coral reef. *J Geophys Res Oceans*, 1996, 101: 14311–14326
- Roberts H H, Murray S P, Suhayda J N. Physical process in a fringing reef system. *J Mar Res*, 1975, 33: 233–260
- 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
- Jago O K, Kench P S, Brander R W. Field observations of wave-driven water-level gradients across a coral reef flat. *J Geophys Res Oceans*, 2007, 112: 1496–1504
- Symonds G, Black K. Predicting wave-driven currents on surfing reefs. *J Coast Res*, 2001, 29: 102–114
- Taebe S, Lowe R J, Pattiaratchi C B, et al. Nearshore circulation in a tropical fringing reef system. *J Geophys Res Oceans*, 2011, 116: 143–149
- Seelig W N. Laboratory study of reef-lagoon system hydraulics. *J Waterw Port Coast Ocean Eng*, 1984, 109: 380–391
- Nelson R C, Lesleighter E J. Breaker height attenuation over platform coral reefs. In: *Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering*. Barton: Institution of Engineers, 1985
- Jensen O J. Waves on coral reefs. In: *Coastal Zone'91*. New York, 1991. 2668–2680
- Gourlay M R. Wave transformation on a coral reef. *Coast Eng*, 1994, 23: 17–42
- Gourlay M R. Wave set-up on coral reefs. 1. Set-up and wave-generated flow on an idealised two dimensional horizontal reef. *Coast Eng*, 1996, 27: 161–193
- 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]
- Liu S X, Wei J Y, Li J X, et al. Experimental study on characteristics of 3D waves broken on the reefs terrain (in Chinese). *Ocean Eng*, 2017, 35: 1–10 [柳淑学, 魏建宇, 李金宣, 等. 三维波浪在岛礁地形上破碎特性试验研究. *海洋工程*, 2017, 35: 1–10]
- Yao Y, Huang Z H, Monismith S G, et al. Characteristics of monochromatic waves breaking over fringing reefs. *J Coast Res*, 2013, 29: 94–104
- Yao Y, He W, Du R, et al. Study on wave-induced setup over fringing reefs in the presence of a reef crest. *Appl Ocean Res*, 2017, 66: 164–177
- Gourlay M R. Wave set-up on coral reefs. 2. Set-up on reefs with various profiles. *Coast Eng*, 1996, 28: 17–55
- Gourlay M R, Colleter G. Wave-generated flow on coral reefs—An analysis for two-dimensional horizontal reef—tops with steep faces. *Coast Eng*, 2005, 52: 353–387
- Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Radiation stresses in water waves: A physical discussion with applications. *Deep Sea Res Oceanogr Ab*, 1964, 11: 529–562

Summary for “规则波在岛礁地形上传播变化特性的试验”

Experimental investigation of monochromatic wave transformation characteristics over the coral reefs

Bing Ren^{*}, Jie Tang, Guoyu Wang & Gancheng Zhu

State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

^{*} Corresponding author, E-mail: bren@dlut.edu.cn

Due to the shallow water depth on the coral reef flat, most of the incident wave energy is dissipated by waves breaking on the frontal reef slope. However, extensive damages have been occasionally reported in low-lying coastal areas fronted by coral reefs during storms. It has long been known that waves breaking on a reef will cause wave set-up on the reef top. Wave set-up may be significant in determining water levels on coral reefs particularly in micro tidal environments. So it is important for the design and the stability of reef top structures. With the construction of artificial island in South China Sea, coral reefs are becoming a very popular research topic now.

Laboratory experiments are carried out on an idealized platform reef in a wave flume located in the State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian. The flume is 60 m long, 4 m wide and 2.5 m deep. The reef model consists of a reef face with a slope of 1:1 and a horizontal reef flat with 8.6 m in length. The reef flat is built 1.80 m high above the flume bottom. The water depth in front of the reef model is from 1.80 to 1.90 m, so the submergence of the reef top is from 0 to 10 cm. The water surface elevations and wave set-up over the reef top are measured using the wave gauges.

The experimental results show that when waves propagate from deep water to the shallow water on the reef face and reef top, wave shoaling and wave breaking happen over the reef face or reef top. When $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 > 0.7$, wave breaking occurs over the reef top, while for $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.7$, wave breaking can be observed on the reef face. It should also be noticed that wave breaking may happen over the reef face when $0.7 < (\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.8$ for the small incident wave heights.

As we expected wave set-up increases with the increasing wave heights and the decreasing submergence, while the wave periods have a complicated influence on the wave set-up. Our study indicates that wave set-up reaches the maximum value at $T=1.75$ s. The relationship between the relative wave set-up and relative submergence of the reef top is compared with the theoretical relationship of Gourlay and other available experimental data. In order to include the effect of wave-generated flow in Gourlay's equation, a small value of the wave energy dissipation factor K_p in the Gourlay's equation is recommended. In our experiment, K_p is different for the different submergence over the reef top. When $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.5$ or $(\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 > 0.8$, K_p is advised to be 0.35; while $0.5 < (\bar{\eta}_r + d_r)/H_0 < 0.8$, K_p is suggested to be 0.50.

coral reef, wave breaking, wave energy dissipation, wave set-up

doi: 10.1360/N972017-01049