

DOI:10.11784/tdxbz202312031

岛礁护岸结构裂缝缺陷内脉动压强特征试验研究

于通顺¹, 王安琦¹, 孟晓宇², 张振宇¹

(1. 中国海洋大学工程学院, 青岛 266404; 2. 山东省烟台市芝罘区住房和城乡建设局, 烟台 264001)

摘要: 波浪作用下珊瑚礁礁坪上会产生高速波生流, 在高速水流的冲击下岛礁护岸结构易发生破坏、失稳。因此, 开展了珊瑚礁礁坪上波生流与有裂缝缺陷护岸结构相互作用的物理模型试验, 对裂缝内脉动压强的频谱密度、特征值分布、强度分布等特征进行了研究和分析, 揭示了护岸结构裂缝缺陷内脉动压强的变化规律。研究表明, 礁坪上护岸结构裂缝缺陷特征位置处脉动压强的主频值与入射波频率对应。护岸结构上、下部沉箱间的裂缝入口处脉动压强分布较为平稳, 沿裂缝缺陷逐渐延伸分布的各测点脉动压强脉动剧烈程度提升, 且复杂湍流在裂缝缺陷内发生扩散且于垂直方向摆动幅度提升。同时, 端流的脉动作用在裂缝缺陷内形成的负压持续增大, 导致中间位置脉动压强均方根值突增, 突变数值约为入口附近 7 倍。当礁坪长度分别取 1 m、2 m 和 3 m 时, 裂缝缺陷内中间位置处脉动压强系数分别约为入口处的 1.59 倍、1.49 倍和 1.46 倍。裂缝缺陷内沿程各测点位置处的脉动压强系数对于大坡度礁前斜坡更为敏感, 且礁前斜坡率越大, 脉动压强系数越大。存在 1 个临界坡度, 当礁前斜坡率大于临界坡度且礁上相对淹没度位于 0.61~1.04 时, 脉动压强系数下降约 34%; 当礁前斜坡率小于临界坡度时, 脉动压强系数沿程分布与礁前斜坡率之间相关性较弱。

关键词: 珊瑚礁; 护岸结构; 波生流; 裂缝缺陷; 脉动压强

中图分类号: TV653.9

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)02-0199-09

Experimental Study on Pulsating Pressure Characteristics in Crack Defects of Revetment Structure on Coral Reefs

Yu Tongshun¹, Wang Anqi¹, Meng Xiaoyu², Zhang Zhenyu¹

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266404, China; 2. Housing and Urban-Rural Development Bureau of Zhifu District of Yantai City in Shandong Province, Yantai 264001, China)

Abstract: Under the action of waves, high-speed wave-induced current will occur on the plateau of coral reefs, and the revetment structure therein is prone to damage and instability under the impact of high-speed water flow. Aimed at this problem, a physical model test for the interaction between the wave-induced current on the plateau and the revetment structure with crack defects was carried out, and the spectral density, characteristic distribution and intensity distribution of pulsating pressure in cracks were studied and analyzed, thus revealing the changing law of pulsating pressure in crack defects of the revetment structure. Results showed that the main frequency value of fluctuating pressure at the characteristic positions of crack defects of the revetment structure corresponded to the frequency of incident wave. The pulsating pressure distribution at the crack entrance between the upper and lower caissons in the revetment structure was relatively stable. The pulsating degree of pulsating pressure at the measuring points gradually extending along the crack defects increased, and the complex turbulent flow spread in the crack defects with a larger swing amplitude in the vertical direction. Meanwhile, the negative pressure formed in the crack defects due to the turbulent flow's pulsating effect continued to grow, resulting in a significant increase in the root mean square value of

收稿日期: 2023-12-26; 修回日期: 2024-06-19.

作者简介: 于通顺(1986—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 于通顺, tshyu707@ouc.edu.cn.

基金项目: 山东省泰山学者工程专项经费资助项目(TS20190914); 国家自然科学基金资助项目(51739010).

Supported by the Shandong Province Taishan Scholars Project Special Funding Project(No. TS20190914), the National Natural Science Foundation of China(No. 51739010).

pulsating pressure at the middle position, and the mutation value was about 7 times that at the crack entrance. When the values of reef plateau length were 1 m, 2 m and 3 m, the values of pulsating pressure coefficient at the middle position were about 1.59, 1.49 and 1.46 times that at the crack entrance, respectively. The pulsating pressure coefficients at the measuring points along the crack defects were more sensitive to the reef front with a larger slope, and the greater the reef front slope rate, the greater the pulsating pressure coefficient. It was found that there exists a critical slope, and when the reef front slope rate was larger than this value while the relative submergence was in the range of 0.61—1.04, the pulsating pressure coefficient decreased by about 34%. In comparison, when the reef front slope rate was less than the critical slope, the correlation between the distribution of pulsating pressure coefficient along the crack defects and the reef front slope rate was weak.

Keywords: coral reef; revetment structure; wave-induced current; crack defect; pulsating pressure

近年来,随着社会经济的不断发展,人类对自然资源以及生存空间的需求不断增加,人类生产活动的范围逐渐向海洋扩展.珊瑚礁作为海洋工程的陆地依托,是深海工程建设的前沿阵地^[1-3].与陆地环境相比,海洋环境复杂多变,热带风暴和台风频发导致岛礁及近岸防护建筑更容易受到极端海浪事件的破坏^[4].在极端的天气和海浪作用下,珊瑚礁坪上会出现剧烈的水动力变化,例如波浪增水和波生流等现象^[5-6].除了极端的天气和海浪情况,护岸建筑物还承受着海洋中波浪运动所产生的长期反复作用而导致的不利影响.这些变化都会导致护岸建筑物破坏、失稳,影响其安全性和稳定性^[7-8].

国内外专家学者对岛礁护岸结构周围水动力特征展开了大量研究. Seif 等^[9]进行了关于海岸结构周围水动力特性及结构对礁坪波生流的影响的研究. Zhu 等^[10]基于渗流模型,讨论了珊瑚礁孔隙特性对波浪增水的影响,同时提出了一种预测可渗透礁坪上波浪增水的解析解. Gourlay 等^[11-12]通过物理试验探寻了礁坪上的增水和波生流规律,通过一个扩展的折射-绕射理论方程给出了波浪增水解析解形式. 胡传越^[13]探究了不规则波在珊瑚礁上的破碎特性和礁坪增水规律,并研究了礁坪上兴建直立堤后的平均越浪量规律.为进一步探究与珊瑚礁顶波浪演变相关的波浪增水和波浪辐射应力水面梯度力驱动下的波生流现象, Yao 等^[14]基于动量和质量守恒定律,建立了 1 个二维礁台模型,提供了 1 种多方位考虑礁体-航道-泻湖系统中礁槽形态和底部粗糙度对礁坪增水和波生流影响的理论分析框架. Yu 等^[15]通过数值模拟结果分析发现,礁坪上存在高速波生流现象,最大流速可达 13 m/s,岛礁护岸结构承受了高速水流的长期冲击作用.类似于水利工程中大流速水流作用在结构裂缝上诱发破坏的情况^[16-18],长期受到波浪及波生流作用的岛礁护岸、膜袋混凝土及其连接部位极易出现裂缝损伤.然而,岛礁礁坪上高速波生流对于裂缝

缺陷的作用机制尚鲜见研究.

在高速水流作用下,裂缝(缺陷)承受着巨大的荷载作用.史晓薇^[19]总结了泄洪高速水流的水力特性,简述了高速水流下缝隙中水流的变化规律.郭军等^[20]对高速水流引发的裂缝破坏进行了风险分析. Wang 等^[21]进一步研究了在高速流动下水动力荷载特征及裂缝侵蚀的发展过程.本文借鉴以上高坝泄流工程中脉动压强分布规律的分析方法,在前人结构周围水动力特征研究^[15]的基础上,建立了物理试验模型,开展了护岸结构裂缝缺陷内脉动压强的研究,探究了岛礁护岸结构裂缝缺陷内脉动压强分布特征规律.

1 物理模型试验

1.1 试验设置

在中国海洋大学工程水动力学实验室的波流水槽中进行了波浪-岛礁-护岸结构相互作用的物理模型试验.试验水槽总长 30.0 m,宽 0.6 m,深 0.9 m,一端设有液压伺服驱动的推板造波机,另一端布置了多层以多孔介质为材料的消波装置.珊瑚礁和护岸的物理模型试验场地及布置如图 1 所示.

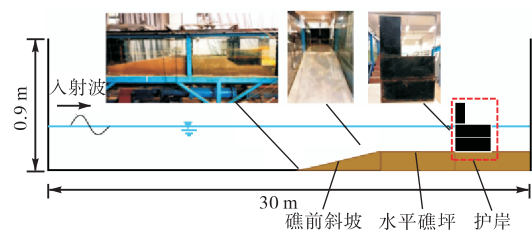


图 1 波流水槽试验布置

Fig.1 Layout of wave flow sink test

本试验依据弗劳德数相似,采用 1 : 40 的模型比尺.每个参数的各标度因子可以由长度因子表示和推导,如表 1 所示.

表 1 试验比尺

Tab.1 Experimental scales

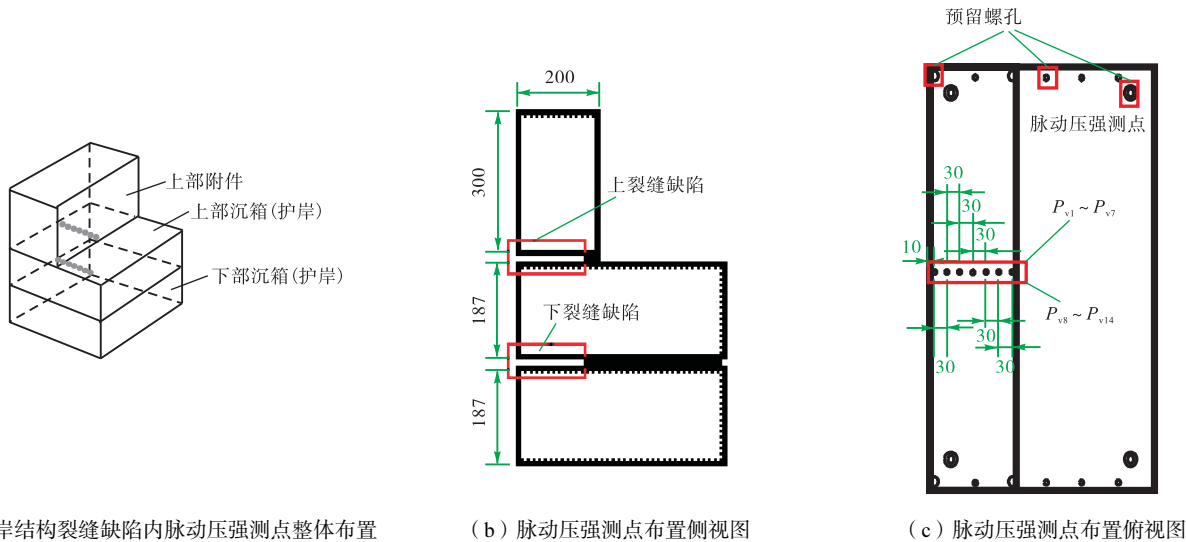
比尺名称		数值
几何比尺	长度比尺	1 : 40
	波高比尺	1 : 40
水动力比尺	速度比尺	1 : 6.32
	周期比尺	1 : 6.32
	压强比尺	1 : 64 000

在礁坪后方设置长 0.525 m、宽 0.595 m 的护岸结构。护岸结构分为上部附件、上部沉箱和下部沉箱共 3 部分，其中上部附件长 0.595 m、宽 0.200 m、高 0.300 m。将上部沉箱与下部沉箱结构进行垂直垒叠共同组成护岸，两部分在垂直方向高度尺寸一致，垒叠后护岸结构总垂直高度约为 0.670 m。

为了监测不同自由水面深度与护岸结构裂缝缺陷间相对位置处脉动压强的时程变化，本文在护岸结构向海壁面设置了两处裂缝缺陷以供研究分析，分别

为上部附件与上部沉箱间裂缝(以下简称为“上裂缝缺陷”)和上部沉箱与下部沉箱间裂缝(以下简称为“下裂缝缺陷”)。如图 2 所示，在护岸结构上、下裂缝缺陷内沿波浪入射方向依次设置 7 个脉动压强测点：上裂缝缺陷和下裂缝缺陷内脉动压强测点分别编号为 $P_{v1} \sim P_{v7}$ 和 $P_{v8} \sim P_{v14}$ 。定义 x 为脉动压强测点距离裂缝缺陷入口处距离， m 为上部附件沿波浪传播方向长度尺寸。为统一脉动压强测点开孔位置，两处测点均为沿箱体结构下表面中线水平等距排列，测点间距统一设置为 30 mm。各部件之间通过预留螺孔位进行各个方向自由度的限制。

本文采用脉动压强传感器及配套采集系统进行脉动压强的测量、输出和存储。脉动压强传感器感应头直径为 5 mm，通过模型表面预留的安装螺孔来从模型内部穿过并垂直于模型外表面布置实现对接。



(a) 护岸结构裂缝缺陷内脉动压强测点整体布置

(b) 脉动压强测点布置侧视图

(c) 脉动压强测点布置俯视图

图 2 护岸结构上、下裂缝缺陷内脉动压强测点实际设置(单位:mm)

Fig.2 Actual setting of pulsating pressure measuring points in upper and lower crack defects of revetment structure (unit: mm)

1.2 试验工况

本文设置了物理模型试验的工况范围，如表 2 所示。

表 2 物理模型试验工况

Tab.2 Conditions for physical model test

参数	符号	范围
试验水深/m	d	0.375 ~ 0.630
波高/m	H_0	0.063 ~ 0.135
周期/s	T	1.0 ~ 1.6
礁坪长度/m	R	1 ~ 3
礁前斜坡率	S	1 : 2.5 ~ 1 : 6.0

1.3 数据处理方法

脉动压强频率幅值谱特征、特征值分布和强度系数等是研究裂缝缺陷内脉动压强特征规律的重要指

标。脉动压强特征值分布数据处理方法采用无因次化处理形式进行表示。

脉动压强是在湍流中对任一作用面上各点脉动压强值的算数平均值。脉动量的强度可由均方根值直观地体现，脉动压强的均方根 P_u 可表示为

$$P_u = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (1)$$

式中 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为 n 个波周期内采样的瞬时脉动压强的时间序列值。

对脉动压强的均方根值进行无因次化处理，具体表达式为

$$\mu = \frac{P_u}{\gamma \sqrt{h_f H_0}} \quad (2)$$

式中: μ 为 P_u 的无因次化表达形式; γ 为水的容重, 取 9.81 kN/m^3 ; h_r 为礁上淹没度.

工程中常用无因次化脉动压强系数 C_p 来衡量脉动压强强度和振荡的剧烈程度, 参考刘昉等^[22]对消力池底板水流脉动壁压特征分析时采用的定义, C_p 可表示为

$$C_p = \frac{P_u}{0.5\rho c^2} \quad (3)$$

式中: ρ 为当地水密度, 取 1000 kg/m^3 ; c 为当地局部波速, 其可表示为

$$c = \sqrt{gh_r} \quad (4)$$

式中 g 为重力加速度的大小, 在地球表面附近的标准值大约取为 9.81 m/s^2 .

定义自相关函数的傅里叶变换为功率谱密度函数 $G(f)$, 其可表示为

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau)e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (5)$$

式中 f 为频率.

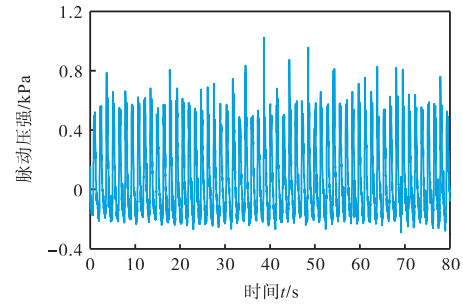
在本文物理模型试验数据处理中, 采用频率幅值谱密度对特征位置处脉动压强进行频谱分析, 即对各个频段信号的最大谱峰幅值随频率分布的情况进行探究和分析.

2 结果与讨论

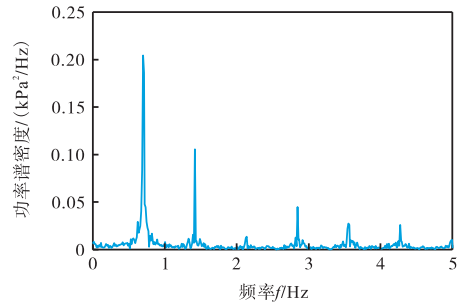
2.1 脉动压强频谱特征分布规律

图 3 给出了当礁坪长度 R 为 1 m 时, 下裂缝缺陷内 P_{v11} 处脉动压强时程测量和幅值功率谱密度分布的影响规律. 由图 3 可得, P_{v11} 处脉动压强正、负值交替出现, 极值概率明显较高, 导致脉动压强的峰度系数较大; 同时, 脉动压强的峰值出现频率较高, 总体分布趋于不规则化. P_{v11} 处脉动压强主频值均在 $0 \sim 5 \text{ Hz}$ 范围内, 5 Hz 以上的高频部分得到耗散. 同时, 4 阶及以上的高频谐波部分同样得到了大幅削减, 主频分布集中在低频段.

图 4 给出了 2 个不同测点 P_{v9} 和 P_{v13} 处脉动压强频率幅值功率谱密度. 结合图 3(b) 和图 4 可以看出, 3 个不同测点处脉动压强主频值均在 $0 \sim 5 \text{ Hz}$ 范围内, 5 Hz 以上的高频部分得到了耗散. 随着脉动压强测点在裂缝缺陷内位置的延伸, 脉动压强主频的最大谱峰振幅呈现先增大后减小的变化趋势. 测点 P_{v11} 处主频的最大谱峰振幅相较于测点 P_{v9} 处约升高 16.7% , 而测点 P_{v13} 处相较于测点 P_{v11} 处约降低 56% , 主要原因是: 当入射波传播至裂缝入口处时, 传播路径可能会更加直接, 发生较少的能量耗散, 从



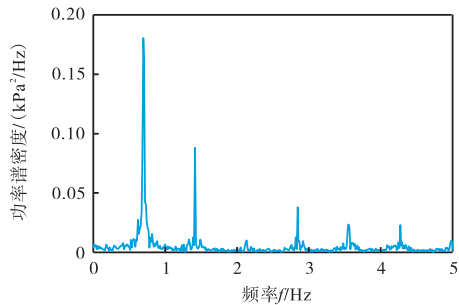
(a) 脉动压强时间序列



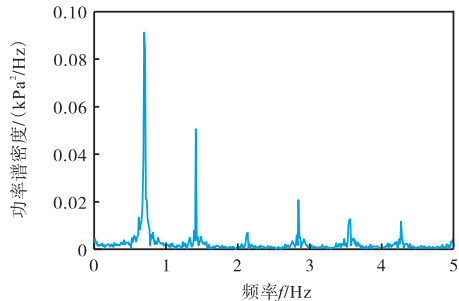
(b) 脉动压强频率幅值功率谱密度分布

图 3 P_{v11} 处脉动压强时程变化和频率幅值功率谱密度特征规律 ($h_r/H_0 = 0.79, T = 1.4 \text{ s}, S = 1 : 4.0$, 护岸与上部附件之间的相对距离 $D = 0 \text{ m}, R = 1 \text{ m}$)

Fig.3 Time-history variation of pulsating pressure and characteristic power spectral density of frequency amplitude at P_{v11} ($h_r/H_0 = 0.79, T = 1.4 \text{ s}, S = 1 : 4.0, D = 0 \text{ m}, R = 1 \text{ m}$)



(a) 测点 P_{v9}



(b) 测点 P_{v13}

图 4 P_{v9} 和 P_{v13} 处脉动压强频率幅值功率谱密度特征规律 ($h_r/H_0 = 0.79, T = 1.4 \text{ s}, S = 1 : 4.0, R = 1 \text{ m}$)

Fig.4 Characteristic power spectral density of frequency amplitude of pulsating pressure at P_{v9} and P_{v13} ($h_r/H_0 = 0.79, T = 1.4 \text{ s}, S = 1 : 4.0, R = 1 \text{ m}$)

而导致主峰的谱峰振幅增大;随着测点在裂缝缺陷内位置的延伸,入射波可能发生多次的反射和折射,导致传播路径变得更加复杂,能量耗散增大,导致谱峰振幅减小。3个不同测点处脉动压强频谱图峰值的出现有一定的相似性:第1个主峰是因为产生特定频率的压强波动而出现1个明显的峰值; P_{v11} 处峰值最大,整体呈现先增大后减小的趋势;3处测点4阶及以上的高谐波波部分同样得到大幅削减,主频分布体现更为集中。造成上述现象的原因与礁坪所带来过高的湍流能量耗散有关:波浪能量在礁坪冲浪带中进行二次分布,直至波浪与护岸结构发生相互作用时,部分高频能量已在传播过程中受到湍流耗散,而大多数低频部分得到保留,从而脉动压强主频分布体现更为集中。

2.2 脉动压强特征值分布规律

图5给出了当入射波周期 T 为1.6s时,不同礁上相对淹没度下无因次脉动压强均方根值的分布情况。可以看出,下裂缝缺陷内 $P_{v8} \sim P_{v14}$ 无因次脉动压强均方根数值间差异均较小,随脉动压强测点在裂缝缺陷内位置的延伸,均方根值整体呈现先增大后减小的趋势,脉动压强强度整体呈现先逐渐提高后逐渐降低的趋势。礁上相对淹没度较大($h_r/H_0 = 1.58$)时,脉动压强的均方根值较高,且整体分布与相对淹没度较小(h_r/H_0 位于范围0.61~1.04)时相比差异较大。当礁上相对淹没度较大时,流体在礁体表面的流动可能会更加复杂和紊乱,这可能导致在礁体表面和周围形成更多的湍流和涡流,从而增加了脉动压强的波动。相比之下,当相对淹没度较小时,流体的流动可能更加平缓,脉动压强的波动相对较小。礁上相对淹没度较大时,礁顶水流速度差异可能更大,形成更大的压强梯度,导致裂缝缺陷内脉动压强脉动剧烈。可以发现,由于沿裂缝缺陷逐渐延伸分布的各测点脉动

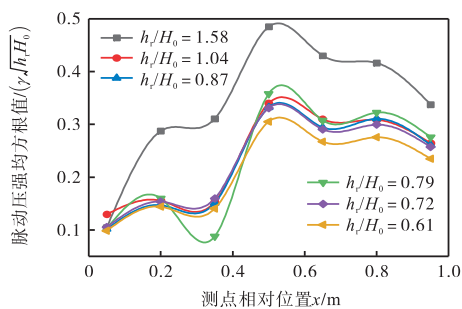


图5 下裂缝缺陷内 $P_{v8} \sim P_{v14}$ 处各无因次脉动压强均方根值变化的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of dimensionless root mean square value variation of each pulsating pressure at $P_{v8} \sim P_{v14}$ in lower crack defect

压强脉动剧烈程度提升,复杂湍流在裂缝缺陷内发生扩散且于垂直方向摆动幅度提升。同时,湍流的脉动作用在裂缝缺陷内形成的负压持续增大,导致 P_{v11} 处无因次脉动压强均方根值会产生一次突增,这表明该位置附近脉动压强强度相较于裂缝缺陷入口附近有所提升,同时 $P_{v12} \sim P_{v14}$ 处继续保持较高数值,说明裂缝缺陷内脉动压强强度以 P_{v11} 处为分界点,后半段测点($P_{v11} \sim P_{v14}$)脉动压强脉动剧烈程度高于前半段测点($P_{v8} \sim P_{v10}$)。然而, P_{v14} 处无因次脉动压强均方根值均略低于 P_{v13} 处的对应值,这是由于经裂缝尾端封闭边界反射的湍流与正向传播的水流相互作用,从而使 P_{v14} 处的脉动压强脉动强度被削弱。随着礁上相对淹没度和入射波周期的减小,裂缝缺陷内沿程分布的各脉动压强特征值均存在不同程度的衰减,脉动压强频率幅值差值和最大值的变化规律与均方根值相似。在入射波周期一定的条件下,上裂缝缺陷内 $P_{v1} \sim P_{v7}$ 处沿程分布的脉动压强均方根值与下裂缝缺陷内 $P_{v8} \sim P_{v14}$ 处的分布类似。

2.3 脉动压强系数规律

图6给出了入射波周期($T = 1.4$ s)固定时,裂缝缺陷内 P_{v11} 处脉动压强系数在不同礁上相对淹没度下受礁坪长度和礁前斜坡率影响的沿程变化。可以看出,礁上相对淹没度对脉动压强系数的影响程度较小,该现象与无因次脉动压强均方根值受礁上相对淹没度影响较小的规律类似。礁上相对淹没度对脉动压强系数和均方根值表现出了稳定性和不敏感性,即礁上相对淹没度发生变化时,脉动压强系数和均方根值都显示出相对稳定的趋势,不会发生显著的波

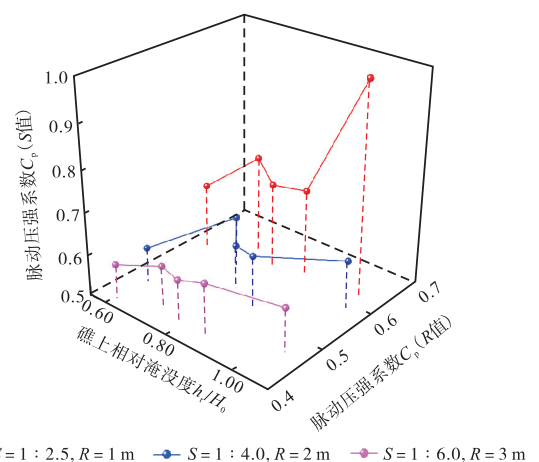


图6 周期 $T = 1.4$ s时,下裂缝缺陷内 P_{v11} 处脉动压强系数在不同礁上相对淹没度下随礁坪长度和礁前斜坡率的特征分布

Fig.6 Characteristic distribution of pulsating pressure coefficient at P_{v11} with reef plateau length and reef front slope rate under relative submergences at period T of 1.4 s

动. 引起上述现象的主要原因为: 礁上相对淹没度的变化对局部流场的影响可能相对较小, 即使水深发生变化, 礁体周围的局部流动可能仍然相对稳定. 因此, 脉动压强系数和均方根值在不同相对淹没度下可能不会发生显著的波动. 同时, 礁体的存在可能会引起一定程度的局部阻尼效应, 这可以减缓流体的运动, 并使得流场的波动减小. 从图 6 中可以看出, 随着礁坪长度的增加, 脉动压强系数呈现衰减趋势且分布更加均匀. 礁前斜坡较陡时, 裂缝缺陷内沿程分布的脉动压强系数较高, 且整体分布与礁前斜坡较缓时相比差异较大.

图 7 给出了入射波周期($T = 1.4\text{ s}$)固定时, 裂缝缺陷内各个特征测点处对应的脉动压强系数在不同礁上淹没度下受礁坪长度影响的沿程变化. 当礁坪长度分别取 1 m 、 2 m 和 3 m 时, P_{v11} 峰值处脉动压强系数分别约为入口附近 P_{v8} 处的 1.59 、 1.49 和 1.46 倍, 主要原因为: 礁坪长度的增加导致入射波经历的浅滩作用历时延长, 礁顶水流由破碎波在礁顶引起的水面梯度力决定, 而水面梯度力变化极为明显导致水流的分层现象显著, 湍流动能耗散增加, 使脉动强度降低且分布趋于平缓.

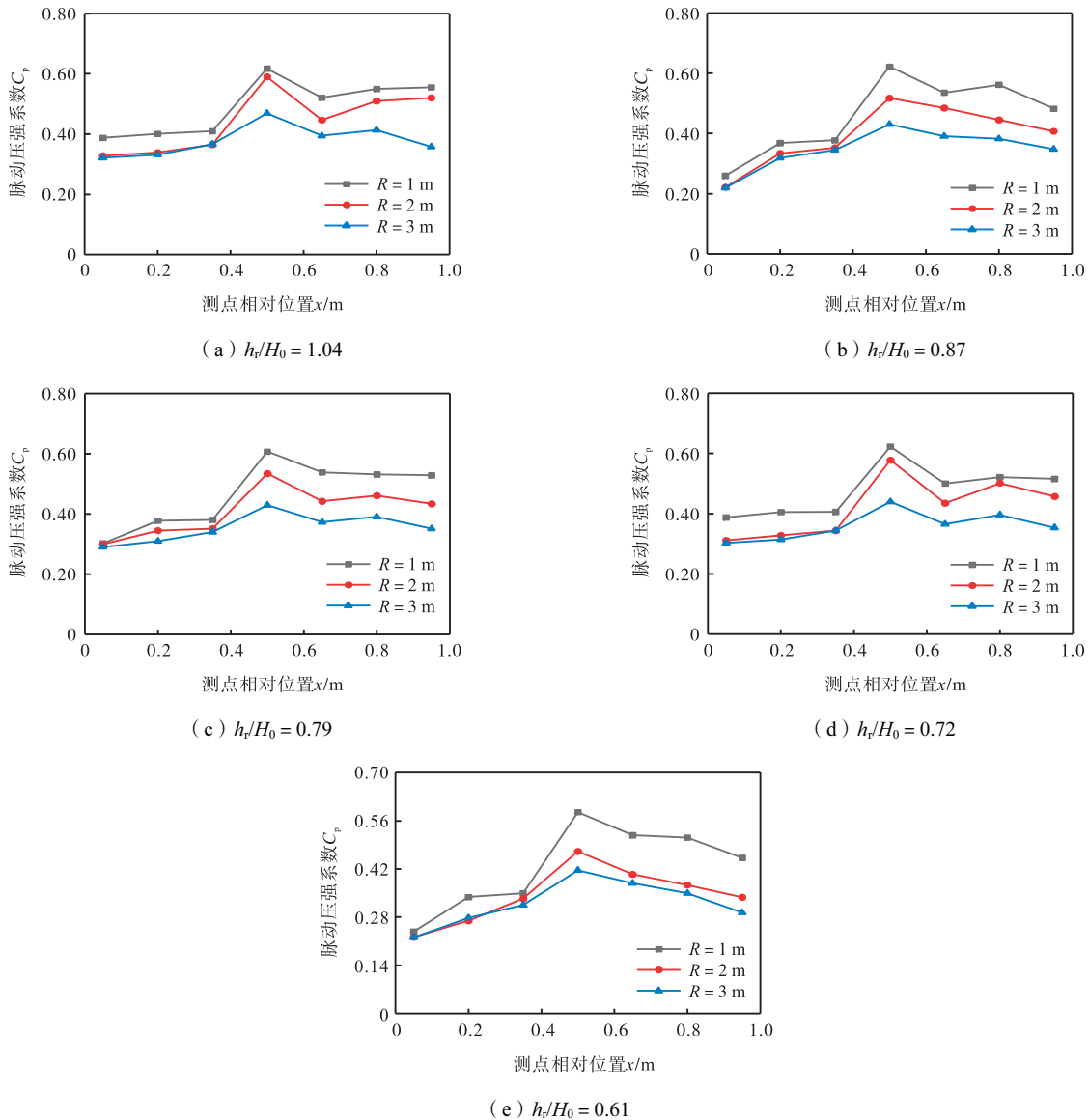


图 7 周期 $T = 1.4\text{ s}$ 时, 下裂缝缺陷内 $P_{v8} \sim P_{v14}$ 处脉动压强系数在不同礁上相对淹没度下随礁坪长度变化的特征分布
Fig.7 Characteristic distribution of pulsating pressure coefficient at $P_{v8} \sim P_{v14}$ varying with reef plateau length under different relative submergences and period T of 1.4 s

图 8 给出了入射波周期($T = 1.4\text{ s}$)固定时, 裂缝缺陷内沿程各测点处对应的脉动压强系数在不同礁上相对淹没度下受礁前斜坡率影响的变化. 可以看

出, 礁前斜坡较陡($S = 1 : 2.5$)时, 裂缝缺陷内沿程分布的脉动压强系数较高, 且整体分布与礁前斜坡较缓($S = 1 : 4.0$ 和 $S = 1 : 6.0$)时相比差异较大, 这是由于

坡度越大,入射波经礁缘处形成的破碎波造成的能量耗散越少,同时,在破碎波辐射应力产生的水面梯度力驱使下形成了向岸高速波生流,从而导致裂缝缺陷内压强脉动剧烈.在裂缝缺陷入口附近 P_{v9} 处脉动压强系数首次产生峰值,于 P_{v11} 处产生二次峰值,其分

别约为 $S = 1 : 4.0$ 和 $S = 1 : 6.0$ 时相应位置处的 1.71 倍和 1.43 倍.随着礁前斜坡率变小,裂缝缺陷内脉动压强系数沿程分布出现一定的程度衰减,且当 $S = 1 : 4.0$ 和 $S = 1 : 6.0$ 时其整体沿程分布差异较小.

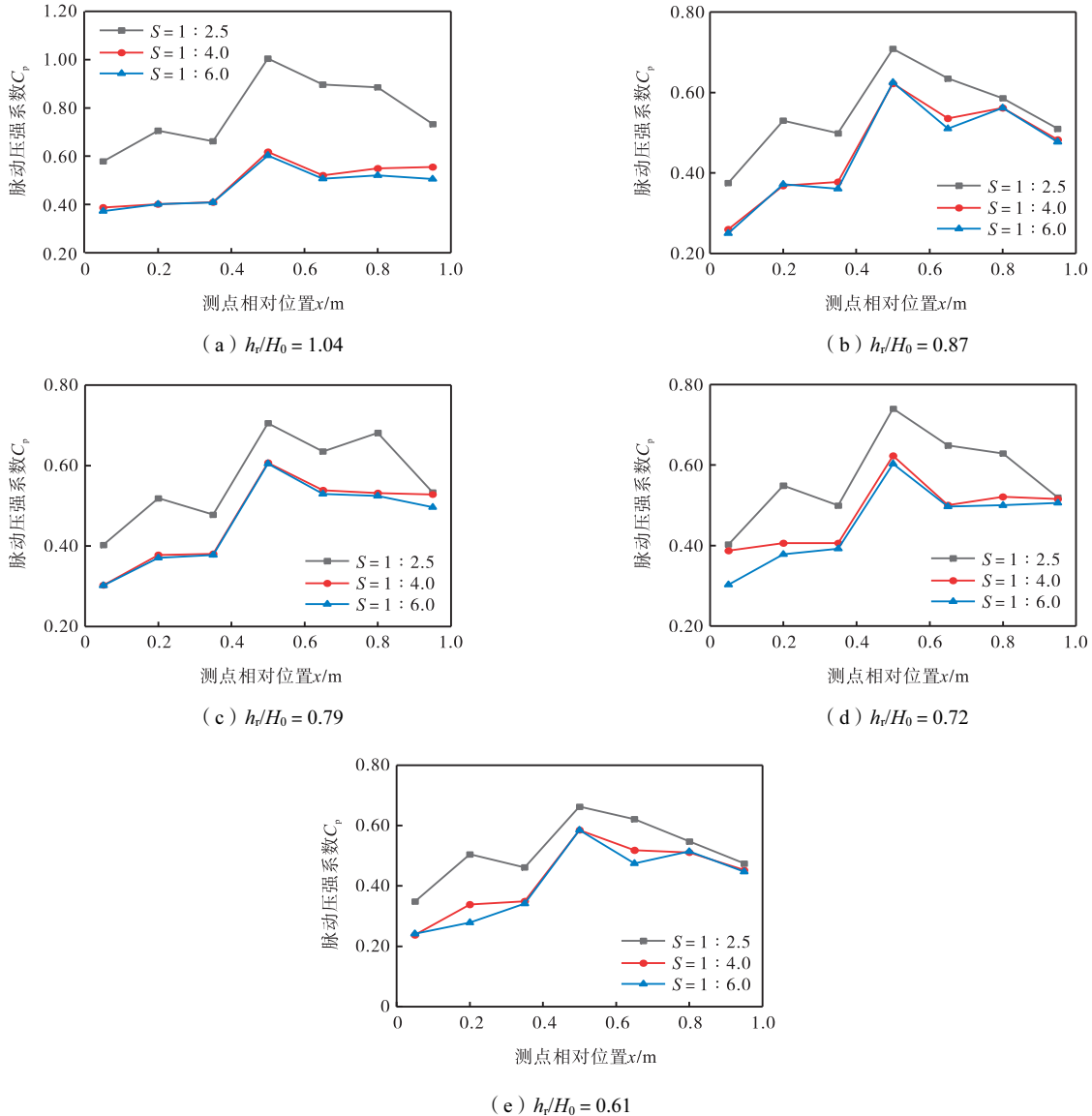


图 8 周期 $T = 1.4$ s 时,下裂缝缺陷内 $P_{v8} \sim P_{v14}$ 处脉动压强系数在不同礁上相对淹没度下随着礁前斜坡率变化的特征分布
 Fig.8 Characteristic distribution of pulsating pressure coefficient at $P_{v8} \sim P_{v14}$ varying with reef front slope rate under different relative submergences and period T of 1.4 s

礁前斜坡较缓时,随着礁上相对淹没度的增加,脉动压强系数变化较小.脉动压强系数对于大坡度礁前斜坡更为敏感,且坡度较大的礁前斜坡造成的脉动压强系数分布更大,同时存在 1 个临界坡度 S^* ,使得当礁前斜坡率大于临界坡度时,脉动压强系数沿程分布随礁前斜坡率增加而增大;当礁前斜坡率小于临界坡度时,脉动压强系数沿程分布与礁前斜坡率之间相关性较弱.对比分析图 8,在大礁前斜坡率($S > S^*$)下,脉动压强系数受礁上相对淹没度影响较大;当礁

上相对淹没度位于 0.61 ~ 1.04 时,脉动压强系数值下降约 34%;礁前斜坡率较小($S < S^*$)时,脉动压强系数受礁上相对淹没度影响较小,可忽略.

3 结 论

本文以珊瑚礁地形下护岸结构内部存在的裂缝缺陷为研究对象,基于数理统计理论,通过模型试验对裂缝缺陷内脉动压强频谱密度、特征值分布以及强

度分布等综合因素进行研究分析,得出裂缝缺陷内脉动压强特征分布规律如下。

(1) 护岸结构裂缝缺陷中部位置处脉动压强时程极值概率较高,总体分布趋于不规则化。该位置处主频值与入射波频率对应。随着脉动压强测点在裂缝缺陷内的延伸,裂缝缺陷中部位置处脉动压强峰值最大,整体呈现先增大后减小的趋势。

(2) 护岸结构下裂缝缺陷内入口处脉动压强分布较为平稳,中部位置处脉动压强均方根值出现突增,暗示该位置附近的动水压强脉动程度开始增强,并在裂缝缺陷尾端附近脉动压强幅值差异达到峰值。

(3) 裂缝缺陷内沿程各测点处对应的脉动压强系数与礁坪长度成负相关,与礁前斜坡率成正相关。脉动压强系数对于大坡度礁前斜坡更为敏感,且礁前斜坡率越大,脉动压强系数越大。同时,存在 1 个临界坡度,使得当礁前斜坡率大于临界坡度时,裂缝缺陷内沿程各测点处对应的脉动压强系数随礁前斜坡率增加而增大;当礁前斜坡率小于临界坡度时,脉动压强系数沿程分布与礁前斜坡率之间相关性较弱。

参考文献:

- [1] Zhang Y, Ye J H. Physical modelling of the stability of a revetment breakwater built on reclaimed coral calcareous sand foundation in the South China Sea—Random waves and dense foundation[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 219: 108384.
- [2] 周胜男, 施 祺, 周桂盈, 等. 南沙群岛珊瑚礁砾洲地貌特征[J]. *海洋科学*, 2019, 43(6): 48-59.
Zhou Shengnan, Shi Qi, Zhou Guiying, et al. Geomorphic features of coral shingle cays in the Nansha Islands[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(6): 48-59(in Chinese).
- [3] Elliff C I, Kikuchi R K P. Ecosystem services provided by coral reefs in a Southwestern Atlantic Archipelago[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2017, 136: 49-55.
- [4] Tajima Y. Case study on impact of storm waves on inundation characteristics[J]. *Procedia IUTAM*, 2017, 25: 36-43.
- [5] 蔡晓禹. 波浪对三峡库区路基边坡的侵蚀作用及边坡坍塌破坏试验研究[D]. 重庆: 重庆交通学院, 2004.
Cai Xiaoyu. Study on the Wash-Out and Cave-In Method of Roadbed Slopes by Wave in Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2004(in Chinese).
- [6] Feng A C, Cai H Y, You Y X. Freely floating body motion responses induced by wave and current in seabed conditions[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 172: 396-406.
- [7] Yao Y, Chen S G, Zheng J H, et al. Laboratory study on wave transformation and run-up in a 2DH reef-lagoon-channel system[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 215: 107907.
- [8] Chen S G, Yao Y, Guo H Q, et al. Numerical investigation of monochromatic wave interaction with a vertical seawall located on a reef flat[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 214: 107847.
- [9] Seif A K, Kuroiwa M, Abualtayef M, et al. A hydrodynamic model of nearshore waves and wave-induced currents[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2011, 3(3): 216-224.
- [10] Zhu G C, Ren B, Wen H J, et al. Analytical and experimental study of wave setup over permeable coral reef[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 90: 101859.
- [11] 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.
- [12] Gourlay M R, Colleter G. Wave-generated flow on coral reefs—An analysis for two-dimensional horizontal reef-tops with steep faces[J]. *Coastal Engineering*, 2005, 52(4): 353-387.
- [13] 胡传越. 珊瑚礁水动力特性实验及数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2018.
Hu Chuanyue. Experimental and Numerical Study on Hydrodynamic Characteristics of Coral Reef[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2018(in Chinese).
- [14] Yao Y, Huang Z H, He W R, et al. Wave-induced setup and wave-driven current over quasi-2DH reef-lagoon-channel systems[J]. *Coastal Engineering*, 2018, 138: 113-125.
- [15] Yu T S, Meng X Y, Li T Y, et al. Numerical simulation of interaction between wave-driven currents and re-

- vetment on coral reefs[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 254: 111346.
- [16] 李会平. 消力塘底板缝隙水流脉动压力传播规律研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2007.
- Li Huiping. Study on Pressure Fluctuations Propagation within Joints of Plunge Pool Slabs[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2007 (in Chinese).
- [17] Xu T J, Dong G H, Tang M F, et al. Experimental analysis of hydrodynamic forces on net panel in extreme waves[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 107: 102495.
- [18] 王浩霖, 张华昌, 董 胜. 直立堤上任意方向入射波的波压力研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(5): 246-256.
- Wang Haolin, Zhang Huachang, Dong Sheng. A study on arbitrary incident wave pressure on vertical breakwaters[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(5): 246-256 (in Chinese).
- [19] 史晓薇. 泄洪高速水流水力特性的三维数值模拟研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学水利与土木工程学院, 2016.
- Shi Xiaowei. Research on 3D Numerical Simulation of Hydraulic Characteristics of High-Speed Flood Discharge Flow[D]. Urumqi: College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, 2016 (in Chinese).
- [20] 郭 军, 张 东, 刘之平, 等. 大型泄洪洞高速水流的研究进展及风险分析[J]. *水利学报*, 2006, 37(10): 1193-1198.
- Guo Jun, Zhang Dong, Liu Zhiping, et al. Achievements on hydraulic problems in large spillway tunnel with a high head and large discharge flow and its risk analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(10): 1193-1198 (in Chinese).
- [21] Wang X, Xie T Q. Cavitation erosion behavior of hydraulic concrete under high-speed flow[J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2022, 69(1): 81-93.
- [22] 刘 昉, 丁瑞琳, 张建赫, 等. 孔板泄洪洞宣泄含沙水流脉动壁压特性研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2018, 51(8): 879-886.
- Liu Fang, Ding Ruilin, Zhang Jianhe, et al. Characteristics of fluctuating wall-pressure when discharging silty flow in a tunnel with orifices[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2018, 51(8): 879-886 (in Chinese).

(责任编辑: 武立有)