

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230529001

文章编号: 1672-9331(2023)04-0037-10

引用格式: 段自豪, 陈松贵, 钟生. 岛礁防浪建筑物水动力场数值模拟研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(4): 37-46.

Citation: DUAN Zihao, CHEN Songgui, ZHONG Sheng. A numerical study on the hydrodynamic characteristics of wave interaction with breakwaters near a reef island[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(4): 37-46.

岛礁防浪建筑物水动力场数值模拟研究

段自豪¹, 陈松贵^{1,2}, 钟生²

(1. 交通运输部 天津水运工程科学研究院, 天津 300456; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:【目的】针对岛礁防浪建筑物的水动力场变化问题, 利用数值模拟方法进行探究。【方法】采用非静压波浪数值模型SWASH模拟了筑堤岛礁的波生环流和涡量场。【结果】筑堤对模型区域内流速有较为显著的影响, 当防波堤堤长越长、防波堤堤距越小时, 模型区域内整体流速越小, 其断面内沿岸流速的变化也越小。礁坪上方最大向岸流速和沿岸流速随防波堤堤距的增大而增大。当防波堤越靠近礁坪后方、防波堤长度越短时, 裂口内的向岸流速越趋近于无堤时的流速。模型内最大涡量值随堤长和堤距的变化并不明显, 但总出现在堤尾处。【结论】SWASH模型能够较好地模拟筑堤岛礁工程周围水流的流场情况, 为复杂流环境下的岛礁筑堤建设提供科学依据。

关键词: 珊瑚岛礁; SWASH; 防波堤; 环流; 涡量

中图分类号: P731; U653.4 **文献标志码:** A

0 引言

全球大约有2.75亿人口生活在距离珊瑚礁30 km的范围内, 珊瑚礁生态系统为人类社会提供了多种多样的服务, 在渔民生计、旅游娱乐及提供海洋生物资源、建筑材料等方面发挥着重要作用^[1]。近年来, 为维护我国海洋领土完整, 合理开发南海资源, 如何在维持原有生态环境的情况下增强岛礁地形上的工程建设及灾害防护能力已成为热点工程问题, 而珊瑚礁地形上的水动力特性研究则是此类工程应用的基础^[2]。

现场调研发现, 珊瑚礁可作为天然的消浪结构, 珊瑚礁缘处波浪破碎会引起波浪增水, 使得礁坪上水位上升, 由此产生的波生流对周围的水质改善和生物多样性的增加有着重要的作用^[3-4]。现场观测数据为珊瑚礁地形和波浪间的相互作用研究奠定了一定基础, 学者们建立了相关理论分

析模型来计算礁坪附近的增水与波生流^[5]。但不同地理位置的珊瑚礁地貌和水动力条件相差较大, 现场观测也只能针对特定区域或测站, 且现场观测耗时长、费用高, 易受到自然因素的影响, 存在一定的局限性。因此, 物理模型试验和数值模拟技术受到更为广泛的应用^[6]。

基于观测数据, 一些学者相继开展了波浪在珊瑚礁上的传播特性研究, 如波浪在珊瑚礁地形上的传播破碎^[7-10], 珊瑚礁海岸的波生流特性^[11-13], 三维珊瑚礁-潟湖-裂口不同位置的波流特性^[14-16]等物理模型试验或数值模拟研究。近年来, 基于岛礁建设和防灾减灾考虑, 部分研究者开展了波流条件下珊瑚岛礁上防浪建筑物的水动力特性研究, 如岛礁上的防波堤越浪和胸墙受力试验^[17-18], 筑堤岛礁下的波浪传播模拟^[19]和波生流模拟^[11], 但未分析不同筑堤条件下岛礁周围环流及涡量场的变化, 而筑堤岛礁的环流和涡量特征变化对岛礁的稳定性具有重要影响。同时, 以上

收稿日期: 2023-05-29; 修回日期: 2023-08-04; 接受日期: 2023-08-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0104500); 中央级公益性科研院所科研创新基金项目(TKS20200204、TKS20210102、TKS20210110、TKS20230502)

通讯作者: 陈松贵(1987—)(ORCID: 0000-0003-2557-6594), 男, 副研究员, 主要从事港口、海岸及近海工程方面的研究。E-mail: chensg05@163.com

关于珊瑚礁地形的物理模型试验主要集中于狭长波浪水槽二维条件下波浪传播到岛礁地形时发生的破碎、变形和波浪增水等方面,并针对不同的礁体形状、礁面糙率等因素的影响进行了研究,但这些研究大多都忽略了潟湖与裂口同时存在的情况,而实际地形中珊瑚礁体不连续的情况较为常见。因此,对三维岛礁建立防浪建筑物的试验研究有待进一步深入。

鉴于非静压波浪数值模型SWASH在模拟波浪传播变形过程中有效地结合了 Boussinesq 模型的精确性和 Navier-Stokes 模型的高效性,可以准确地模拟珊瑚礁地形上的波浪演化及环流过程^[20-22],因此,本研究拟基于大比尺物理模型试验成果,采用SWASH模拟技术,探究规则波作用下筑堤岛礁周围的环流和涡量变化等水动力特征及其对岛礁建筑物的影响,为岛礁工程建设以及岛礁生态系统防护等提供参考依据。

1 模型介绍

1.1 控制方程

非静压波浪数值模型SWASH在 Boussinesq 模型近似下的控制方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x} = \nu_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial y} = \nu_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} + \frac{\partial q}{\partial z} = \nu_H \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_V \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中: t 为时间; u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度分量; ν_H 为水平黏滞系数; ν_V 为垂向黏滞系数; ξ 为自由表面; g 为重力加速度; q 为非静水压力。

将连续性方程(4)沿水深积分,基于自由表面和底部运动学边界条件,经莱布尼兹变换,得到水

位方程为:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\xi} u \, dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-d}^{\xi} v \, dz = 0 \quad (5)$$

式中: d 为静水深。所采用的自由表面和底部运动学边界条件分别为:

$$w|_{z=\xi} = \frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} \quad (6)$$

$$w|_{z=-d} = -u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y} \quad (7)$$

1.2 边界条件

忽略自由表面的张应力作用,计算域的压力边界条件为:

$$q|_{z=\xi} = 0 \quad (8)$$

当底部边界的垂向流速满足式(7)的边界条件时,水平流速梯度满足下式:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

开边界包括入流、出流边界。在入流边界给定速度分布,同时结合弱反射边界条件:

$$u_b = \pm \sqrt{\frac{g}{h}} (2\xi_b - \xi) \quad (10)$$

式中: u_b 为入流边界的初始流速; ξ_b 为边界处入射波的波幅; h 为波浪自由表面水位 ξ 与静水深 d 之和。式(10)中的边界位置用正负号来区分,如为正号,则表示入流边界的位置位于西、南方向;如为负号,则表示入流边界的位置位于东、北方向。

出流边界通常采用辐射边界条件和海绵层的方法进行消波,其中辐射边界条件为:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + c \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

式中: f 可以为波面或速度等变量; c 为波速,通常取 $c = \sqrt{gh}$ 。

固壁边界采用全反射边界,即与固壁边界垂直的速度为零。对于三维数值模型港池,与 y 轴平行的固壁边界为:

$$u = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

1.3 数值求解

非静压波浪数值模型SWASH在水平面上的计算域采用结构化网格,垂向则采用 σ 分层网格,通过布置交错网格的方式来处理变量,空间上采用守恒格式对各层水平对流项进行离散,时间上采用隐式与显式相结合的半隐格式进行离散

($0.5 \leq \theta \leq 1$)。当自由表面满足 $\partial \xi / \partial t > \alpha \sqrt{gh}$ 时,认为波浪破碎,此时网格节点处流体计算将转变为静压计算;当网格点的破碎波的波峰转化为波谷时,即自由表面满足 $\partial \xi / \partial t < \beta \sqrt{gh}$ 时,此时网格节点处的计算才会变回非静压计算。其中, α, β 是与波浪破碎形态有关的参数。

1.4 涡量计算

在非静压波浪数值模型 SWASH 中,对于深度平均流常用涡度或旋度描述流体的涡旋运动,其强度及方向用涡量值表示。当涡量值为正时,代表产生了逆时针方向的旋转涡流,当涡量值为负时,代表产生了顺时针的旋转涡流。

涡量的具体物理意义描述如下:在 M 点邻域内取一个与涡量 Ω 垂直的无限小圆,其半径为 a ,联系速度环量和涡通量的斯托克斯公式为:

$$\int_s \Omega \cdot ds = \int_L v' \cdot dr \quad (13)$$

式中: s 为小圆的面积; Ω 为流体微团的涡量; L 为小圆的圆周; v' 为流体微团的平均切向速度。

通过忽略高阶小量,定义平均切向速度及平均角速度为:

$$\bar{v}' = \frac{\int_L v' \cdot dr}{2\pi a} \quad (14)$$

$$\bar{\omega} = \bar{v}' / a \quad (15)$$

将式(14)~(15)代入式(13)中得涡量值的表达式为:

$$|\Omega| = \frac{\int_L v' \cdot dr}{\pi a^2} = 2 \frac{\bar{v}'}{a} = 2 \bar{\omega} \quad (16)$$

由此可见, M 点涡量的大小是流体微团绕该点旋转的平均角速度的两倍。

2 模型设置及验证

2.1 模型设置

本研究选取规则波作用下物理模型试验中的特征工况(礁坪水深 $h_r = 0.04$ m,入射波高 $H_0 = 0.04$ m,波周期 $T_0 = 2$ s)建立对应的数值模型进行验证。模型参照图1设置(ADV为多普勒超声流速仪,LXJ为螺旋桨式流速仪)。两侧礁坪对称布置,长度为14 m,宽度为15 m,礁坪前方为1:8的礁前斜坡,两侧礁坪之间为6 m宽的裂口通道,后方为5 m

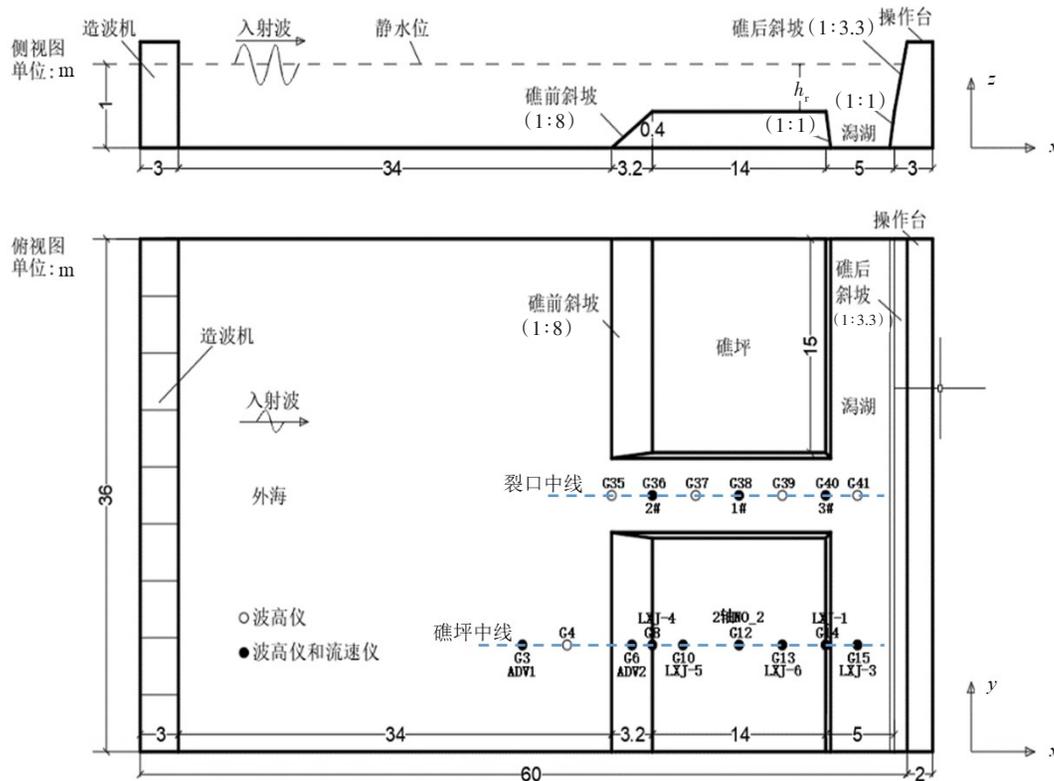


图1 模型尺寸及试验仪器设置

Fig. 1 Model size and test instrument setting

宽的潟湖区域,并在潟湖后方设置坡度为1:3.3的礁后斜坡,其余各斜坡的坡度均为1:1。波浪垂直左边界入射,在右边界内侧的计算域内设置5 m宽的海绵层。波浪破碎参数 α 和 β 分别取为0.6和0.2,底部糙率通过设置曼宁系数(取为0.005)进行控制。模型垂向分为4层,水体的涡动现象通过选取本底黏度值(取为0.002)来实现。取计算网格尺寸 $\Delta x=0.05$ m,计算时间步长 $\Delta t=0.01$ s。

2.2 模型验证

通过裂口中线上测点的波面历时曲线(图2)和向岸平均流速(图3)的对比可以看出,不同位置处的试验值与数模值吻合良好。因此,非静压波浪数值模型SWASH可以很好地模拟本研究中复杂地形下的波流传播。

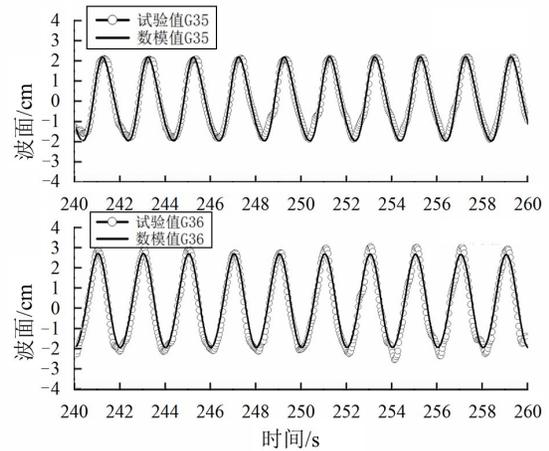


图2 G35、G36试验值与数模值对比
Fig. 2 Comparison of experimental and numerical wave surface time series at locations G35 and G36

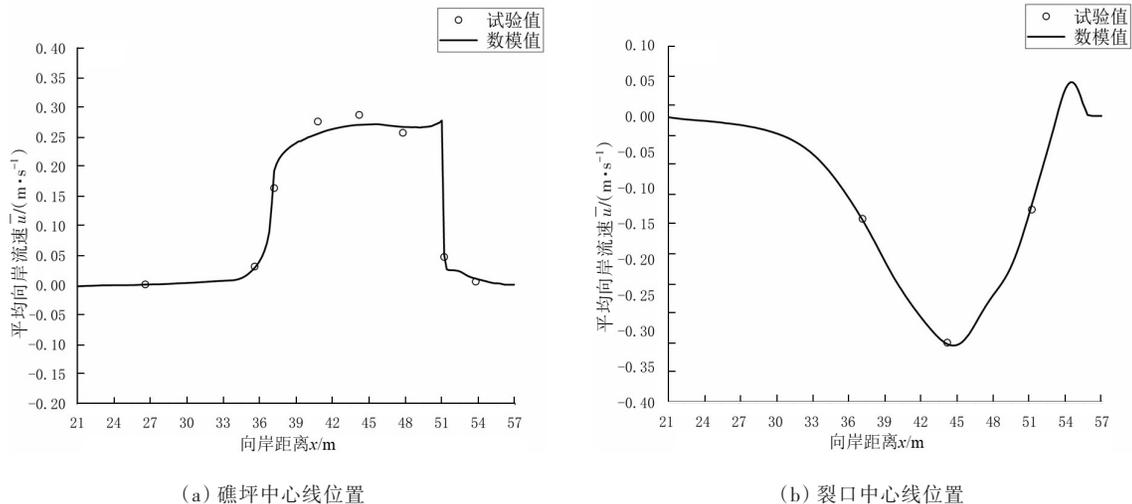


图3 平均向岸流速试验值与数模值对比
Fig. 3 Comparison of average inshore velocity between experimental and numerical results

3 结果分析与讨论

3.1 筑堤对岛礁环流的影响

筑堤会明显改变珊瑚岛礁整个系统的流速分布,本研究通过非静压波浪数值模型SWASH模拟对比筑堤岛礁系统的整体流场强度。选取规则波工况($h_r=0.04$ m, $H_0=0.04$ m, $T_0=2$ s),在 $l=(1/2)W$ 、 $d=(1/4)B$ 的条件下,用稳定后的30个入射波波周期内的流速平均值绘制流场图,如图4所示。在图4中,单侧礁坪长为 B ,礁坪宽为 W ,防波堤堤长为 l (防波堤自港池边缘到裂口方向的长度),堤距为 d (防波堤后趾到礁坪前缘的距离)。分别研究不同

防波堤堤长和堤距情况下,礁坪中线($y=7.5$ m)和裂口中线($y=18$ m)向岸流速 u 和沿岸流速 v 的沿程变化情况($z=0.416$ m),以及潟湖内流场的分布情况。分析图4可知,波浪破碎后的波生流在从礁前传播至潟湖的过程中,其向岸流速呈现出先增大后减小的趋势,在防波堤尾部和礁坪中前部流速达最大值,在礁坪后部,流速则迅速下降;沿岸流速在礁坪斜坡与裂口相接区域和防波堤尾部处较大,说明裂口中的离岸流至裂口口门附近又在礁前斜坡位置处返回礁坪浅水区域,并且从礁坪上方流入裂口形成环流,在礁坪的后部,沿岸流速变化较小,主要以向岸流为主,并流向潟湖再经裂口流出,如此往复循环。

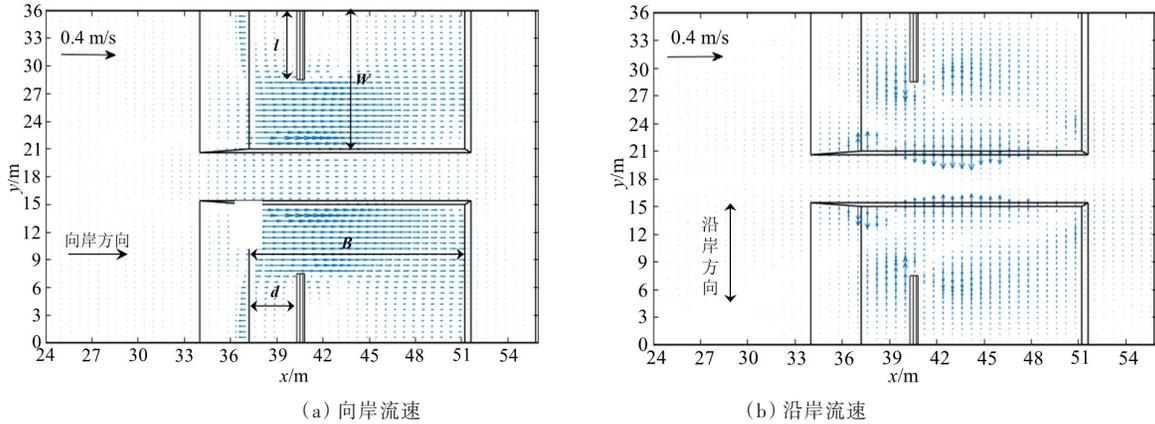


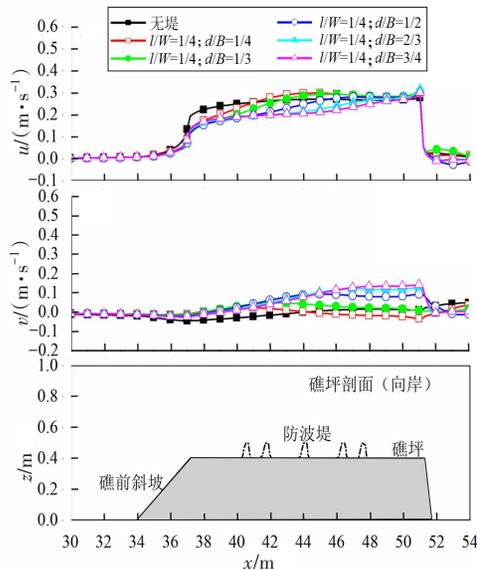
图4 模型区域流速分布
 Fig. 4 Velocity distribution in the model area

3.1.1 礁坪中线流速分布

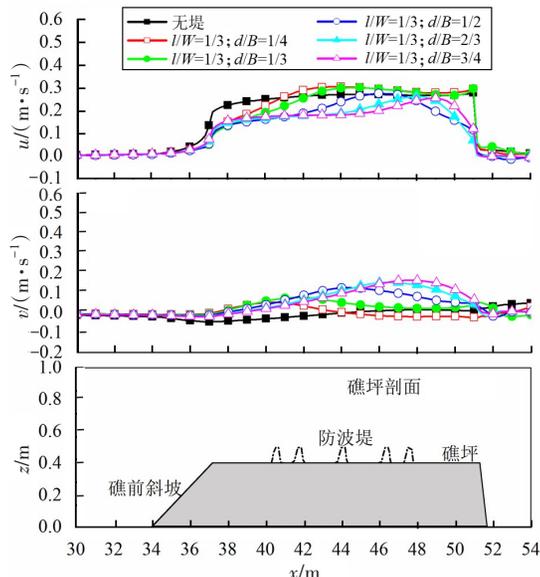
图5所示为不同防波堤组次下礁坪中线向岸流速 u 及沿岸流速 v 的分布情况。从图5中礁坪中线向岸流速的变化可以看出,当防波堤堤长 l 越大时,礁坪上方及潟湖内流速就越小;当防波堤堤长 l 一定时,礁坪上方最大向岸流速随着防波堤堤距 d 的增大而增大。当 $l/W=1/4$ 时,波浪在前礁缘处迅速增大,当防波堤堤长 l 一定时,随着防波堤堤距 d 的增大,礁坪上方的向岸流速随之减小;当 $l/W=1/2$ 时,向岸流速在堤前和堤后发生突变,原因在于此时防波堤尾部恰好位于礁坪中线的位置,向岸流在防波堤尾部形成环流场,堤后流速与堤前流速相反,因而出现了突变现象,堤后向岸流速随着堤距 d 的增大相应地减小。当防波堤堤长 l 超过礁坪中线位置时,礁坪上方流场的变化趋势

则会发生相应的变化。从图5(d)可以看出,当防波堤堤长 l 一定时,礁坪上方中段以前向岸流速随防波堤堤距 d 的增大而增大,但当 $l/W=2/3$ 、 $d/B=1/4$ 时,向岸流速变化趋势不同,这主要是由于防波堤堤长 l 较长以及堤距 d 较小,离前礁缘较近,这在很大程度上阻碍了向岸流,并在堤前、堤后形成了较大的差异。

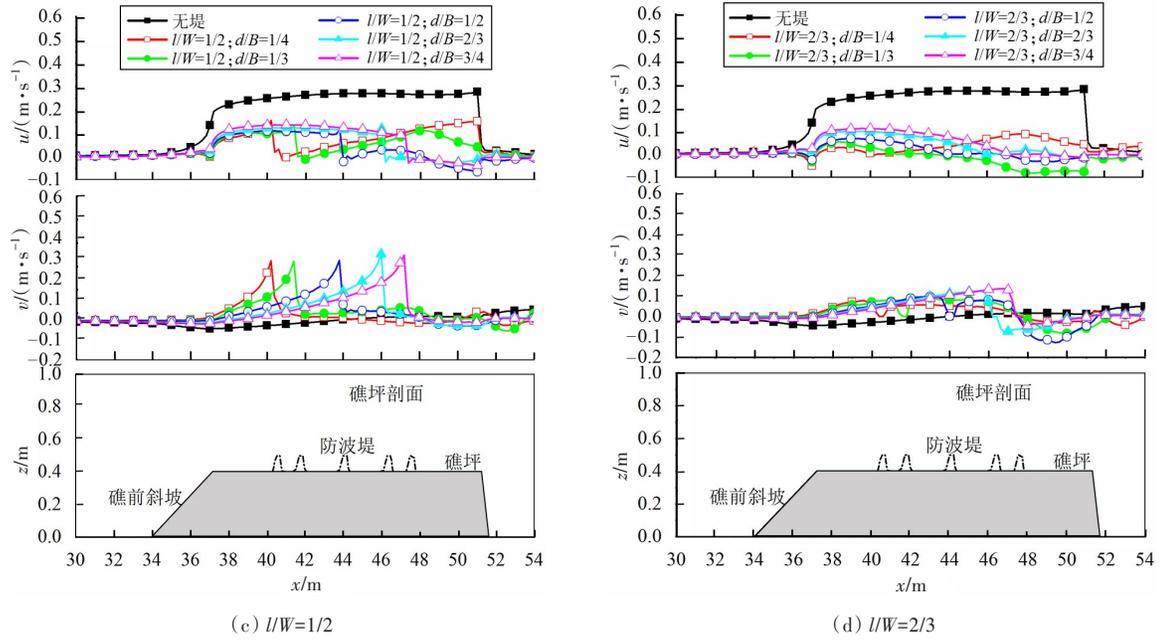
从图5中礁坪中线沿岸流速的变化可以看出,当防波堤堤长 l 一定时,礁坪上方最大沿岸流速随着防波堤堤距 d 的增大而增大;当防波堤堤距 d 一定时,其值随着防波堤堤长 l 的增大亦呈增大趋势。当 $l/W=1/4$ 、防波堤堤长 l 一定时,礁坪上方的沿岸流速随着防波堤堤距 d 的增大而增大;当 $l/W=1/2$ 时,随着堤长 l 的增加,礁坪上方整体的沿岸流速有所增大,此时防波堤堤长 l 正好位于礁坪中



(a) $l/W=1/4$



(b) $l/W=1/3$



(c) $l/W=1/2$ (d) $l/W=2/3$
图5 不同防波堤组次下礁坪中线向岸流速和沿岸流速的分布
Fig. 5 Distribution of onshore velocity and cross-shore velocity at the midline of the reef flat under different breakwater groups

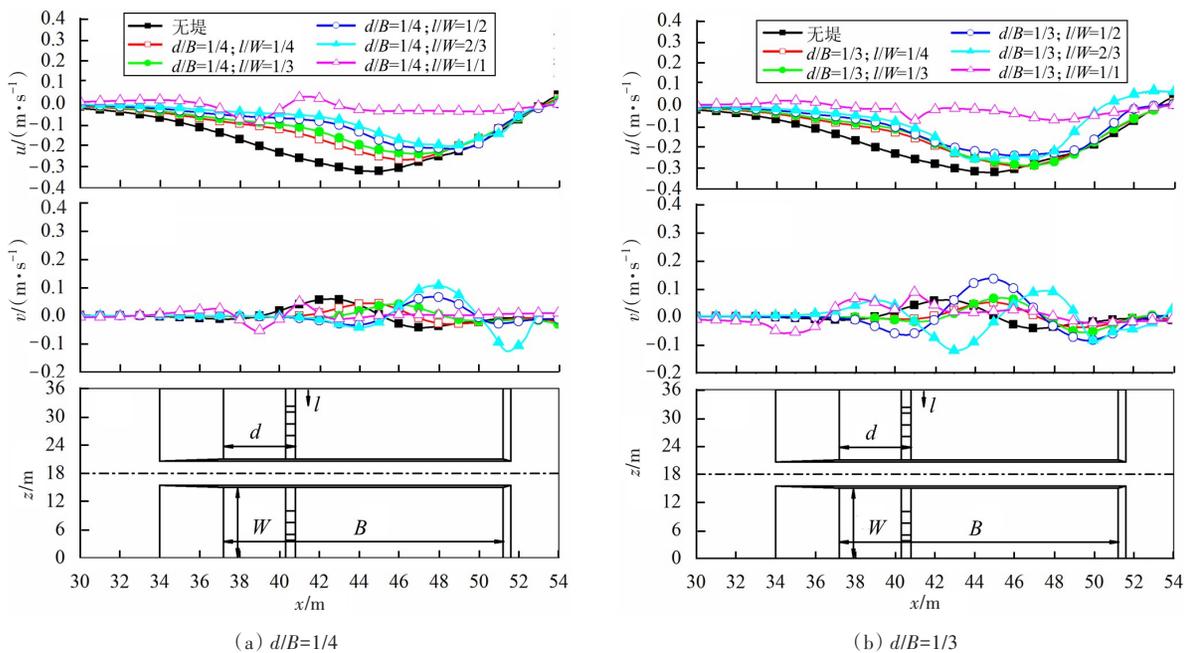
线位置,礁坪上方沿岸流速自礁缘到堤前均呈增大趋势,且随着堤距 d 的增大,最大的沿岸流速也随之增大,但堤后沿岸流速均很微弱;当 $l/W=2/3$ 时,礁坪上方最大沿岸流速随着防波堤堤距 d 的增大而增大。各组次下沿岸流速的变化趋势一致。

3.1.2 裂口中线流速分布

图6所示为不同防波堤组次下裂口中线向岸流速 u 、沿岸流速 v 的分布情况。从图6中裂口中线向岸流速的变化可以看出,当防波堤越靠近礁

坪后方、防波堤长度越短时,裂口内的流速越趋近于无堤时的流速,即防波堤堤长 l 越大、防波堤堤距 d 越小,裂口断面内流速的变化就越小,裂口内流场就越稳定。当防波堤堤距 d 一定时,裂口中最大离岸流速随着防波堤堤长 l 的增大而减小。相对于无堤情况,当 $d/B=1/2$ 、 $l/W=1/1$ 时,离岸流速减小得最多,约为82%。筑堤之后最大离岸流速的位置也会随之变化,位置发生后移。

从图6中裂口中线沿岸流速的变化可看出,此



(a) $d/B=1/4$ (b) $d/B=1/3$

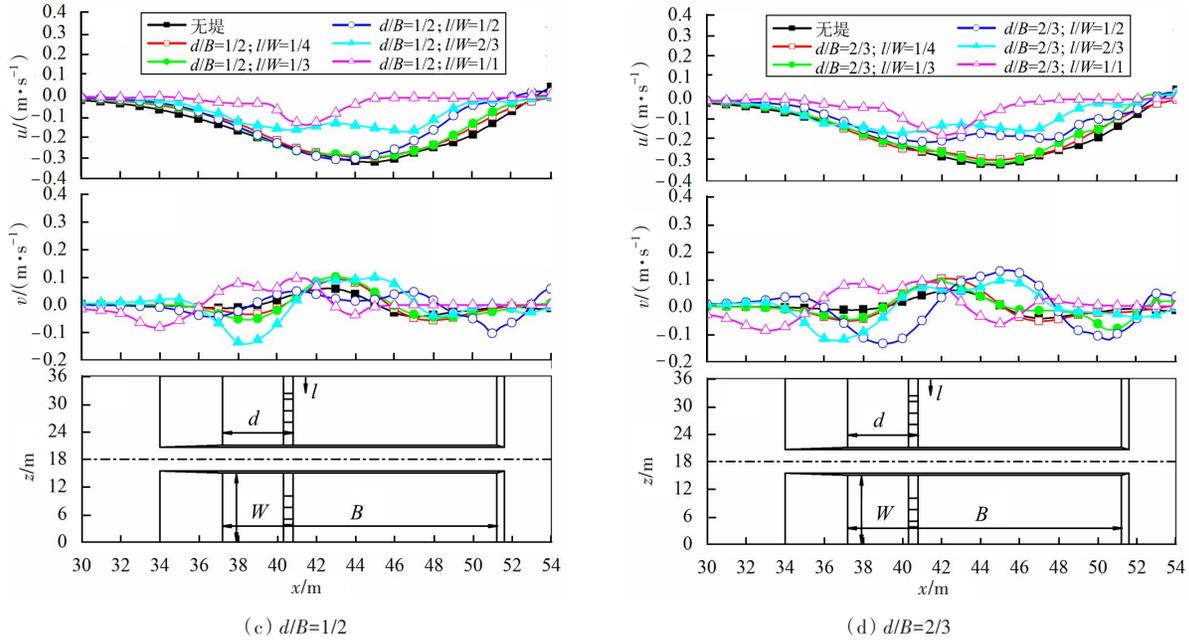


图 6 不同防波堤组次下裂口中线向岸流速和沿岸流速的分布
 Fig. 6 Distribution of onshore velocity and cross-shore velocity at the centerline of the channel under different breakwater groups

断面内的沿岸流速均有较大变化,防波堤堤长 l 越长,堤距 d 越短,其断面内的沿岸流速变化越小。当防波堤堤距 d 一定时,裂口中的最大沿岸流速随着防波堤堤长 l 的增大呈现出先增大后减小的趋势,且变化幅度随着防波堤堤距 d 的增大而增大。

3.1.3 湖内流场分布

图 7 为礁坪水深 $h_r=0.04$ m,入射波高 $H_0=0.04$ m,波周期 $T_0=2$ s,防波堤堤长 $l=(1/2)W$, $d=(1/4)B$ 时,潟湖内流速矢量分布图。潟湖内流场的对称分布是由裂口中心线两侧的流体受到相同的影响而产生的。在礁坪上的向岸流进入潟湖后,受到地形和水深变化的影响,导致水流发生偏转。这些因素使得流体在潟湖内产生类似于声波反射的

现象,沿裂口中心线对称分布。此外,裂口内的离岸出流也需要得到补偿流的支持,以维持稳定的水流运动。潟湖内的沿岸流量较大,可以为裂口补充水量,从而保持裂口内的流场运动稳定。同时,向岸流的强度较小,但也是不可忽略的重要组成部分,其对于裂口内的水流运动同样具有一定的影响。

3.2 筑堤对岛礁涡量的影响

主要在两侧礁坪靠近裂口处和防波堤尾部,水流的流速旋度较大,水流也存在较大的涡动变化。由于模型沿裂口中心线对称布置,为便于观察局部较大的涡旋强度,取模型半侧涡量场进行分析。当 $d/B=1/4$ 时,不同防波堤堤长 $l=(1/4)W$ 、 $l=(1/3)W$ 、 $l=(1/2)W$ 、 $l=(2/3)W$ 和 $l=W$ 下,模型区域内的涡量分布云图见图 8。

从图 8 可以看出,当防波堤堤距 d 一定时,模型区域内的涡量分布随着防波堤堤长 l 的增大而发生着变化,特别是当防波堤堤长 $l>(1/2)W$ 后,涡量分布发生了明显变化;当 $l=W$ 时,防波堤尾部的涡量值大幅增大。在两侧礁坪靠近裂口的位置和防波堤尾部,由于存在较大的旋转流,因此涡量值在这两处较大。在进行筑堤工程防护时,应重点加强这两个位置的防护措施。

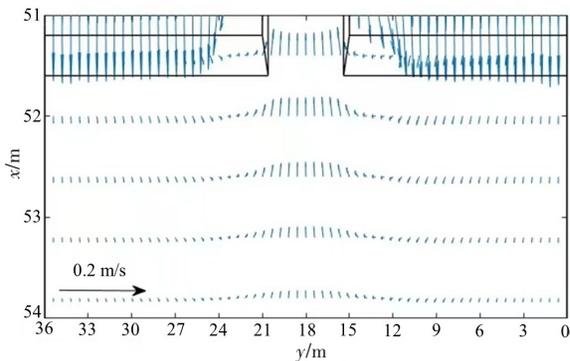


图 7 潟湖内流速矢量分布图
 Fig. 7 Velocity distribution in lagoon

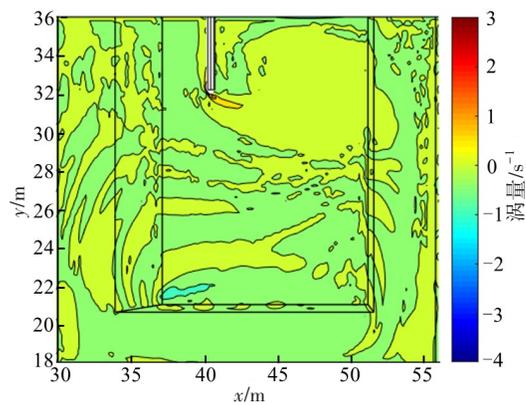
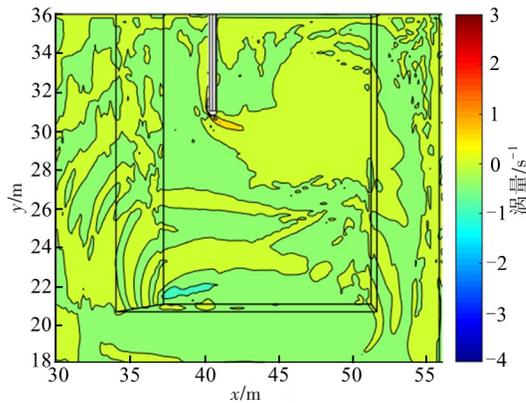
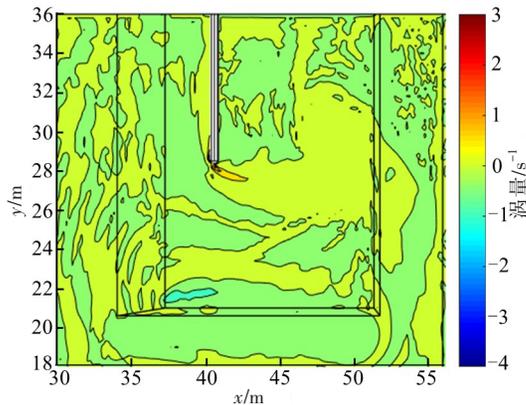
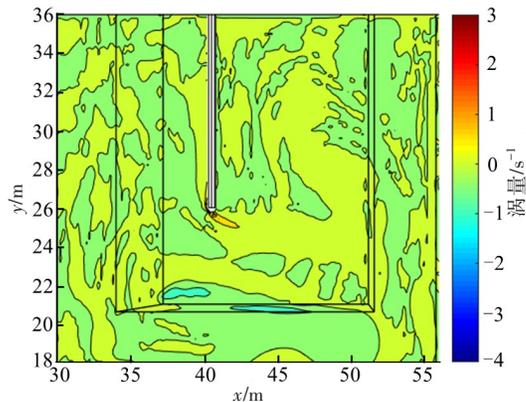
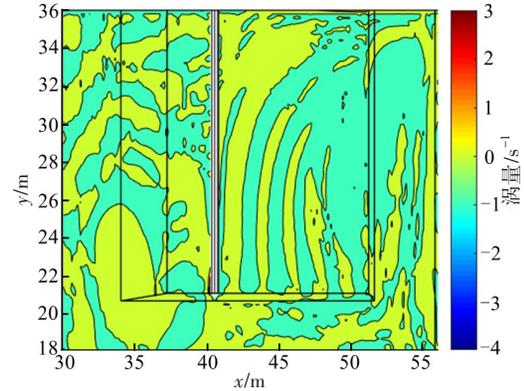
(a) $l=(1/4)W$ (b) $l=(1/3)W$ (c) $l=(1/2)W$ (d) $l=(2/3)W$ (e) $l=W$

图8 不同防波堤堤长下模型区域的涡量分布云图

Fig. 8 Vorticity distribution in model area under different breakwater lengths

4 结论

本研究基于非静压波浪数值模型SWASH,研究了防浪建筑物对岛礁水动力场的影响,针对特定地形(外海-珊瑚礁-潟湖-裂口系统)的波生流和涡量等特征量进行了分析。主要结论如下:

1) 波浪破碎后的波生流在从礁前传播至潟湖的过程中,向岸流速呈现出先增大后减小的趋势,在防波堤尾部和礁坪中前部附近流速达最大值,到达礁坪后部,流速则迅速下降。筑堤对模型区域内流速有较为显著的影响,防波堤堤长越长,防波堤堤距越小,模型区域内整体流速就越小。相对于无堤情况,当 $d/B=1/2$ 、 $l/W=1/1$ 时,裂口中线处离岸流速减小得最多,约为82%。

2) 礁坪上方及潟湖内流速随着堤长的增加而减小,礁坪上方最大向岸流速和沿岸流速随着防波堤堤距的增大而增大。当防波堤越靠近礁坪后方、防波堤堤长越小时,裂口内的向岸流速越接近于无堤时的流速;防波堤堤长越长、堤距越短,其断面内沿岸流速的变化越小。

3) 模型区域内涡量值变化较大的位置主要位于流体产生涡旋的地方,分布在两侧礁坪靠近裂口处和防波堤尾部。当筑堤长度与礁坪宽度相同时,防波堤尾部的涡量值大幅增大。在修建筑堤工程时,应重点加强裂口和堤尾的防护措施。

[参考文献]

- [1] BURKE L, REYTAR K, SPALDING M, et al. Reefs at risk revisited [M]. Washington DC: World Resources Institute, 2011.

- [2] 高冉,叶剑红.中国南海吹填岛礁钙质砂动力特性试验研究[J].岩土力学,2019,40(10):3897-3908,3919. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.2085.
GAO Ran, YE Jianhong. Experimental investigation on the dynamic characteristics of calcareous sand from the reclaimed coral reef islands in the South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10): 3897-3908, 3919. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.2085.
- [3] LOWE R J, FALTER J, KOSEFF J, et al. Spectral wave flow attenuation within submerged canopies: implications for wave energy dissipation[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(C5):C05018. DOI: 10.1029/2006JC003605.
- [4] HENCH 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(6): 2681-2694. DOI: 10.4319/lo.2008.53.6.2681.
- [5] WIJESEKERA H W, WESSON J C, WANG D W, et al. Observations of flow separation and mixing around the northern Palau Island/Ridge[J]. Journal of Physical Oceanography, 2020, 50(9): 2529-2559. DOI: 10.1175/jpo-d-19-0291.1.
- [6] 郑金海,时健,陈松贵.珊瑚岛礁海岸多尺度波流运动特性研究新进展[J].热带海洋学报,2021,40(3):44-56. DOI: 10.11978/YG2020013.
ZHENG Jinhai, SHI Jian, CHEN Songgui. Recent research advances on multi-scale coastal wave and current characteristics of coral reefs and islands [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2021, 40(3): 44-56. DOI: 10.11978/YG2020013.
- [7] 陈松贵,王泽明,张弛,等.珊瑚礁地形上直立式防浪堤越浪大水槽实验[J].科学通报,2019,64(增刊2):3049-3058.
CHEN Songgui, WANG Zeming, ZHANG Chi, et al. Experiment on wave overtopping of a vertical seawall on coral reefs in large wave flume [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(sup 2): 3049-3058.
- [8] 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. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2015.02.005.
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. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2015.02.005.
- [9] 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[J].科学通报,2018,63(增刊1):590-600.
REN Bing, TANG Jie, WANG Guoyu, et al. Experimental investigation of monochromatic wave transformation characteristics over the coral reefs [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(sup 1): 590-600.
- [10] YAO Y, HUANG Z H, MONISMITH S G. Characteristics of monochromatic waves breaking over fringing reefs [J]. Journal of Coastal Research, 2012, 29(1): 94-104. DOI: 10.2307/23353574.
- [11] 陈松贵,王建平,高骏,等.基于SWASH模型的珊瑚岛礁波生环流模拟研究[J].水道港口,2022,43(3):281-288,369. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8443.2022.03.002.
CHEN Songgui, WANG Jianping, GAO Jun, et al. Simulation of wave-induced circulation in coral reef by SWASH model [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2022, 43(3): 281-288, 369. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8443.2022.03.002.
- [12] 姚宇,唐政江,杜睿超,等.珊瑚礁破碎带附近波浪演化和波生流实验研究[J].海洋科学,2017,41(2):12-19. DOI: 10.11759/hyxx20160313001.
YAO Yu, TANG Zhengjiang, DU Ruichao, et al. Experimental study of wave transformation and wave-driven current around the surf zone over coral reefs [J]. Marine Sciences, 2017, 41(2): 12-19. DOI: 10.11759/hyxx20160313001.
- [13] LIU Y, LIAO Z L, FANG K Z, et al. Uncertainty of wave runup prediction on coral reef-fringed coasts using SWASH model [J]. Ocean Engineering, 2021, 242: 110094. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110094.
- [14] 陈树彬,陈松贵,姚宇,等.珊瑚礁海岸波流运动特性整体物理模型实验研究[J].海洋学报,2021,43(5):110-119.
CHEN Shubin, CHEN Songgui, YAO Yu, et al. Three dimensional physical modelling study on wave and current characteristics in coral reef coastal system [J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(5): 110-119.
- [15] ZHENG J H, YAO Y, CHEN S G, et al. Laboratory study on wave-induced setup and wave-driven current in a 2DH reef-lagoon-channel system [J]. Coastal Engineering, 2020, 162: 103772. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2020.103772.
- [16] 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. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107907.
- [17] 陈松贵,郑金海,王泽明,等.珊瑚岛礁护岸对礁坪上极端波浪传播特性的影响[J].水利水运工程学报,2019(6):59-68. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2019.06.007.
CHEN Songgui, ZHENG Jinhai, WANG Zeming, et al. Experimental study on impact of revetments on extreme wave propagation characteristics on coral reefs [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 59-68. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2019.06.007.
- [18] 陈松贵,陈汉宝,赵洪波,等.珊瑚礁地形上胸墙波浪力大水槽试验[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):65-70. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.010.
CHEN Songgui, CHEN Hanbao, ZHAO Hongbo, et al.

- Experimental study of wave forces on the seawall of coral reef in large wave flume [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(1): 65–70. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.010.
- [19] 陈汉宝, 钟生, 陈松贵, 等. 筑堤影响下岛礁三维波浪传播变形规律 SWASH 数值模拟研究[J]. *水运工程*, 2022(8): 9–16, 23. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20220711.007.
- CHEN Hanbao, ZHONG Sheng, CHEN Songgui, et al. 3D wave propagation deformation law of island reef affected by embankment buildings by SWASH numerical simulation [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2022(8): 9–16, 23. DOI: 10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20220711.007.
- [20] 房克照, 孙家文, 刘忠波, 等. 近岸波浪传播的非静压数值模型[J]. *水科学进展*, 2015, 26(1): 114–122. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.01.015.
- FANG Kezhao, SUN Jiawen, LIU Zhongbo, et al. A non-hydrostatic model for water waves in nearshore region [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(1): 114–122. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.01.015.
- [21] MA G F, SHI F Y, KIRBY J T. Shock-capturing non-hydrostatic model for fully dispersive surface wave processes [J]. *Ocean Modelling*, 2012, 43/44: 22–35. DOI: 10.1016/j.ocemod.2011.12.002.
- [22] UMESH P A, BEHERA M R. On the improvements in nearshore wave height predictions using nested SWAN-SWASH modelling in the eastern coastal waters of India [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 236: 109550. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109550.

A numerical study on the hydrodynamic characteristics of wave interaction with breakwaters near a reef island

DUAN Zihao¹, CHEN Songgui^{1,2}, ZHONG Sheng²

(1.Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., Tianjin 300456, China;

2.College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: [Purposes] The construction of wave-sheltering structures near reef islands can alter the wave and flow boundary conditions, resulting in significant impacts on the hydrodynamic fields around these reef-channel-island systems. [Methods] In this study, a non-hydrostatic wave numerical model, SWASH, was utilized to simulate the wave-induced circulation and vorticity fields around constructed islands and reefs. [Findings] The results show that the breakwaters have a significant influence on the flow velocities within the model region. As the breakwater length increases and the distance between the breakwaters decreases, the overall flow velocity within the model region decreases, and the transverse variations within the cross-sections become smaller. The maximum onshore and cross-shore flow velocities above the reef platform increase with an increasing distance between the breakwaters. When the breakwaters are positioned closer to the rear of the reef platform and are shorter in length, the onshore flow velocity within the gap approaches the velocity when there is no breakwater. The maximum vorticity value within the model does not significantly vary with changes in the breakwater length and distance between breakwaters, but is consistently located at the tail of the breakwater. [Conclusions] This model effectively simulates the flow field around island and reef systems with constructed breakwaters, providing scientific evidence for the design and construction of breakwaters in complex flow environments.

Key words: coral reef; SWASH; breakwater; circulation; vorticity

Manuscript received: 2023-05-29; **revised:** 2023-08-04; **accepted:** 2023-08-21

Foundation item: Project (2022YFE0104500) supported by the National Key Research and Development Program of China; Projects (TKS20200204, TKS20210102, TKS20210110, TKS20230502) supported by Research Funds for Central Universities

Corresponding author: CHEN Songgui (1987—) (ORCID: 0000-0003-2557-6594), male, associate researcher, research interest: port, waterway and coastal engineering. E-mail: chensg05@163.com

(责任编辑:石月珍;校对:赵冰;英文编辑:许从昊)