



筑堤影响下岛礁三维波浪传播变形规律 SWASH 数值模拟研究*

陈汉宝¹, 钟生², 陈松贵¹, 时健²

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 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: 为了探究筑堤对岛礁系统内波浪传播变形的影响, 利用非静压波浪模型 SWASH 对三维岛礁模型试验数据进行验证对比, 继而在岛礁上方不同位置建立不同长度的防波堤进行波流模拟。结果表明: 礁坪特征断面内的波高随筑堤无明显变化, 增减水则随筑堤变化明显, 堤长越长、堤距越大, 堤前增水越大, 增水范围越广; 裂口特征断面内的波高和增减水随筑堤均有明显变化, 堤长越长、堤距越小, 断面内波高越小, 增减水越稳定。研究成果可为类似礁顶工程建设提供参考。

关键词: 岛礁; 防波堤; 波浪传播变形; 非静压波浪模型

中图分类号: P 731; U 653.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0009-08

3D wave propagation deformation law of island reef affected by embankment buildings by SWASH numerical simulation

CHEN Han-bao¹, ZHONG Sheng², CHEN Song-gui¹, SHI Jian²

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

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

Abstract: To explore the influence of embankment on wave propagation deformation in the island reef system, we use the non-hydrostatic wave model SWASH to verify and compare the three-dimensional island reef model test data, and then build breakwaters with different lengths at different positions above the island reef for wave current simulation. The results show that the wave height in the characteristic section of reef flat does not change obviously with the construction of embankment, but the increase and decrease of water changes obviously with the construction of embankment. The longer the embankment length and the larger the embankment distance, the greater the water increase in front of the embankment and the wider the range of water increase. The wave height and increase/decrease water in the fracture characteristic section change obviously with the embankment construction. The longer the embankment length and the smaller the embankment distance, the smaller the wave height in the section, and the more stable the increase/decrease water. The research results can provide reference for similar reef top engineering constructions.

Keywords: island reef; embankment; wave propagation deformation; simulation waves till shore(SWASH)

珊瑚礁主要由造礁珊瑚、造礁藻类和钙质微生物残骸经较长时间不断堆积形成, 常见有岸礁、

堡礁和环礁等类型^[1-2]。珊瑚礁地形复杂, 礁缘外通常是广阔的深水域, 礁缘附近多是较陡的斜坡,

收稿日期: 2022-01-03

*基金项目: 国家自然科学基金(52001149、52039005、51861165102); 中央级公益性科研院所基本科研项目(TKS20220301、TKS20200204、TKS20210102、TKS20210110)

作者简介: 陈汉宝(1971—), 男, 博士, 研究员, 从事港口航道及近海工程。

通讯作者: 陈松贵(1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事港口航道及近海工程。E-mail: chensg05@163.com

礁缘后方的礁坪水深极小,陡变地形会导致外海波浪传播至礁坪时波浪发生强烈变形和破碎,致使礁坪上发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和生产作业^[3-4]。因此,针对采取何种措施使珊瑚岛礁地形上的波流条件满足要求,须对珊瑚岛礁地形上的水动力特性进行充分的了解和研究。

对于波浪在天然珊瑚岛礁地形上的传播变形规律,国内外学者做了大量的研究。1948 年, Munk 等^[5]首次发现,在太平洋上的珊瑚环礁可作为天然的防波堤,承受大部分波浪力,并且发现珊瑚礁缘处波浪破碎会引起波浪增水,致使礁坪上出现较高水位; Nelson 等^[6]通过物理模型试验,研究澳洲大堡礁上波浪在陡坡珊瑚礁地形上的传播变化,分析波浪在传播过程中衰减和抬升的规律; Demirbilek 等^[7]在水槽中开展大量物理模型试验,研究风浪和不规则波共同作用下礁坪增水和礁后海岸爬高的问题;梅致等^[8]根据实测数据模拟礁坪剖面,研究波浪在珊瑚礁上的传播规律及波浪破碎指标;陈松贵等^[9]在珊瑚礁陡变地形上建立防波堤,模拟了不同水位和波高、周期条件时波浪在此种地形上的传播变形规律。现阶段有关珊瑚岛礁的研究多为二维水槽试验,三维岛礁地形下的波流研究较少,筑堤三维岛礁地形下的波浪传播变形研究更少。

随着计算机技术的进步,波浪数值模拟得到快速发展,其中基于非线性浅水方程的 SWASH 可以对复杂地形下的波面和浅水流进行大范围、长时间模拟并且具有较高的计算效率,现已被广泛应用于各类地形中的波流模拟^[10]。因此,本文利用 SWASH 在模型验证合理的基础上另建不同长度的防波堤以研究筑堤对岛礁系统波浪传播的影响。

1 SWASH 模型及验证

1.1 控制方程

SWASH 是一款浅水非静压数值模型^[11-13],适用于近海至沿岸地区范围内的波流模拟,特别是对复杂地形下的波浪破碎所引起的波浪增水和波生流有较好的适用性。此模型在 Boussinesq 近似下的动量方程和连续性方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x} = v_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \tag{1}$$

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

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} + \frac{\partial q}{\partial z} = v_H \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial w}{\partial z} \right) \tag{3}$$

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

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

自由表面和底部运动学边界条件为:

$$\begin{cases} w|_{z=\xi} = \frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} \\ w|_{z=-d} = -u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y} \end{cases} \tag{5}$$

式中: d 为静水深; $H=d+\xi$ 为总水深。

自由表面需求解水位方程获得。将连续性方程沿水深积分同时利用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:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\xi} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-d}^{\xi} v dz = 0 \tag{6}$$

1.2 边界条件

自由表面处的压力边界条件为:

$$q|_{z=\xi} = 0 \tag{7}$$

底部边界的垂向流速满足式(5)边界条件时,水平流速梯度满足:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \tag{8}$$

固壁边界采用全反射边界条件,出流边界采用辐射边界条件,可表示为:

$$u = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + c \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \tag{10}$$

式中: f 为波面; c 为波速, 通常取 $c=\sqrt{gh}$ 。

1.3 数值求解

SWASH 模型数值求解采用有限差分格式进行空间离散, 垂向采用 σ 网格分层, 通过交错网格方式变换, 非静水压力 q 定义在单元侧边中心, 如图 1 所示。

SWASH 模型在垂向动量方程中采用 Keller-box 格式离散, 此格式仅需较少垂向分层便可准确描

述波浪的色散性。在时间离散处理问题上, 应用 θ 半隐格式, 若 $\theta=0.5$, 应用二阶 Crank-Nicolson 格式; 若 $\theta=1$, 则应用全隐格式。动边界采用干湿技术处理, 模型给定最小水深阈值, 在计算过程中对网格点进行干湿判断, 当网格点水深低于最小水深时, 则将最小水深阈值设为该网格点的水深, 避免模型运行中止。

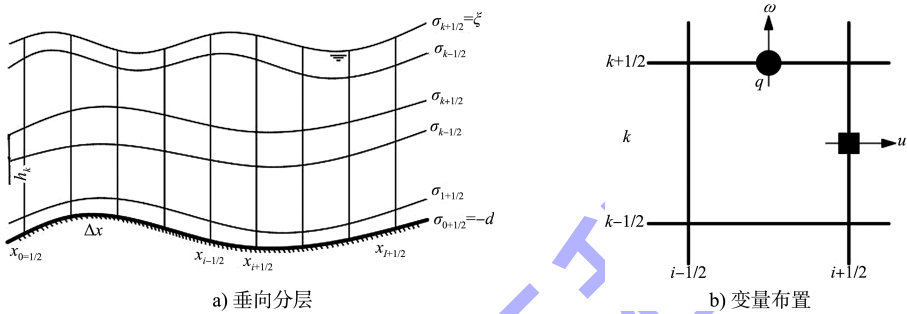


图 1 网格垂向分层和变量布置

1.4 SWASH 模型验证

模型验证以及后期模拟均建立于已开展的三维岛礁物理模型试验基础上^[14], 模型建于波浪港池中, 港池长 60 m、宽 42 m、深 1 m, 水池一侧的造波系统由 9 台推板式造波机和微机控制系统

组成。试验中使用 LG1 型电容式浪高仪采集波面, 使用 ADVs(超声多普勒流速仪)和螺旋桨式流速仪采集单点流速。由于模型对称分布, 因此所有的仪器主要布设在裂口的一侧。模型尺寸和仪器布设位置如图 2 所示。

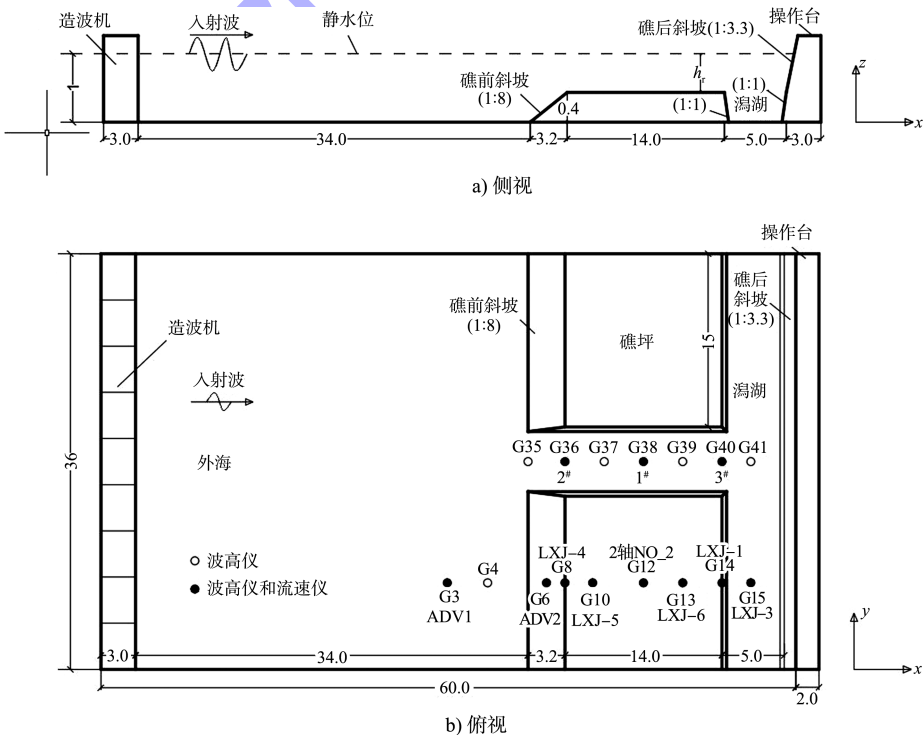


图 2 模型尺寸及试验仪器设置 (单位: m)

根据邹国良等^[15]的研究,模拟波浪传播时,SWASH模型的网格尺寸选取 $\Delta x=L/30$ 便可精确模拟波面、流速等。模拟所取特征工况为:静水深 $h=0.44\text{ m}$,礁坪淹没水深 $h_r=0.04\text{ m}$,入射波高 $H_0=0.04\text{ m}$,周期 $T_0=2\text{ s}$,计算得到波长 $L=3.847\text{ m}$,因此模型网格尺寸取为 0.1 m 。波浪垂直左侧边界入射,右侧边界处设置海绵层消波,垂向取4层,底部糙率通过设置曼宁系数实现。由于计算网格尺寸会影响模型的空间分辨率^[16],因此模拟验证时选取 $\Delta x=L/100\approx 0.04\text{ m}$ 。因侧重于礁坪上方和裂口中的波流变化,故选取礁坪中线断面和裂口中线断面的测点波高和流速值进行模型的验证对比。图3a)、b)分别为物模和数模礁坪中线和裂口中线对应测点的有效波高值对比,其整体吻合度较好,能够满足研究需求。图4a)、b)分别为物模和数模礁坪中线和裂口中线对应测点的平均流速值对比,同样发现其吻合度较好,误差均在10%以内,能够满足研究需要。

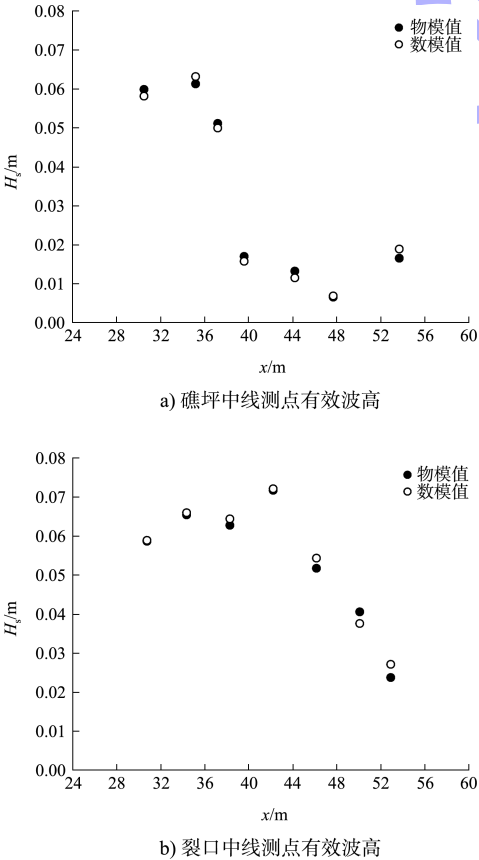


图3 礁坪和裂口中线测点有效波高

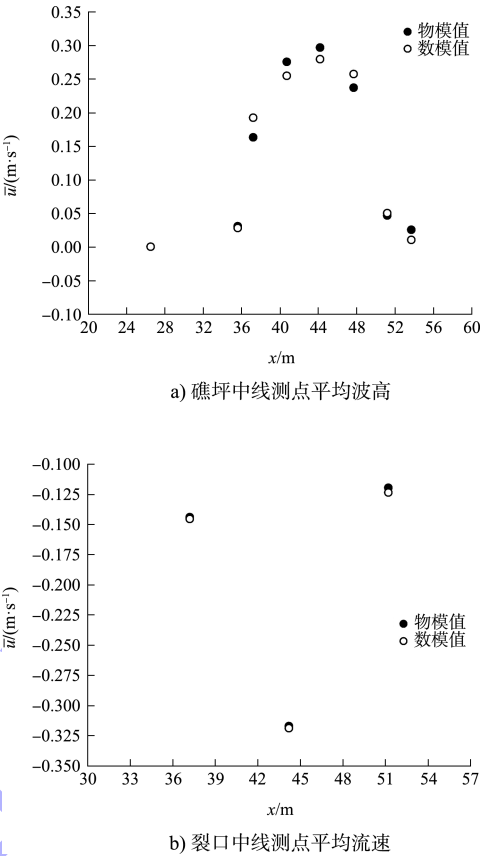


图4 礁坪和裂口中线测点平均流速

在模型验证满足要求的基础上研究筑堤对系统内波高和增水的影响。取5组堤长 l 分别为 $1/4W$ 、 $1/3W$ 、 $1/2W$ 、 $2/3W$ 、 $1/1W$,5组堤距 d 分别为 $1/4L$ 、 $1/3L$ 、 $1/2L$ 、 $2/3L$ 、 $3/4L$ 进行分析。其中,防波堤为梯形防波堤,上底宽 0.2 m ,下底宽 0.5 m ,堤前坡度为 $1:2$,堤后坡度为 $1:1$ 。另外, $L=14\text{ m}$ 表示礁坪长度, $W=15\text{ m}$ 表示礁坪宽, l 表示防波堤长度, d 表示防波堤后趾距离前礁缘长度。

2 筑堤岛礁波高分布特征

基于SWASH模型模拟规则波特征工况(静水深 $h=0.44\text{ m}$,礁坪淹没水深 $h_r=0.04\text{ m}$,外海入射波高 $H_0=0.04\text{ m}$,周期 $T_0=2\text{ s}$)在波浪场稳定后输出整体区域网格点30个波周期的波高值。由图5a)波高值对比可知,当防波堤堤距 $d/L=1/4$ 时,不同防波堤长度 $1/4W$ 、 $1/3W$ 、 $1/2W$ 、

2/3W、1/1W 下礁坪中线断面波高分布随防波堤堤长的改变变化并不明显, 主要是由于入射波传播至礁前斜坡时受浅化作用, 波高在浅水区随水深减小而增大, 随后在礁缘处发生破碎后损耗大量能量, 从破碎点迅速衰减, 到达防波堤前时, 波高衰减已达 75%~80%, 当防波堤长 $l>1/2W$ 时, 最大衰减已达 100%, 原因是堤上无越浪现象。对于防波堤堤后波高而言, 由于筑堤的掩护作用, 各组次下的波高值相近, 均在 0~0.02 m 之间。图 5b)~e) 为防波堤堤距 $d/L=1/3$ 、 $1/2$ 、 $2/3$ 、 $3/4$ 时, 不同防波堤长度 $1/4W$ 、 $1/3W$ 、 $1/2W$ 、 $2/3W$ 、 $1/1W$ 下礁坪中线断面波高分布对比, 其变化规律与图 5a) 中波高变化几乎一致, 不同点则是防波堤长 $l>1/2W$ 组次的最小波高值位置随防波堤位置发生改变, 整体波高变化并未随防波堤位置和长度发生明显变化。

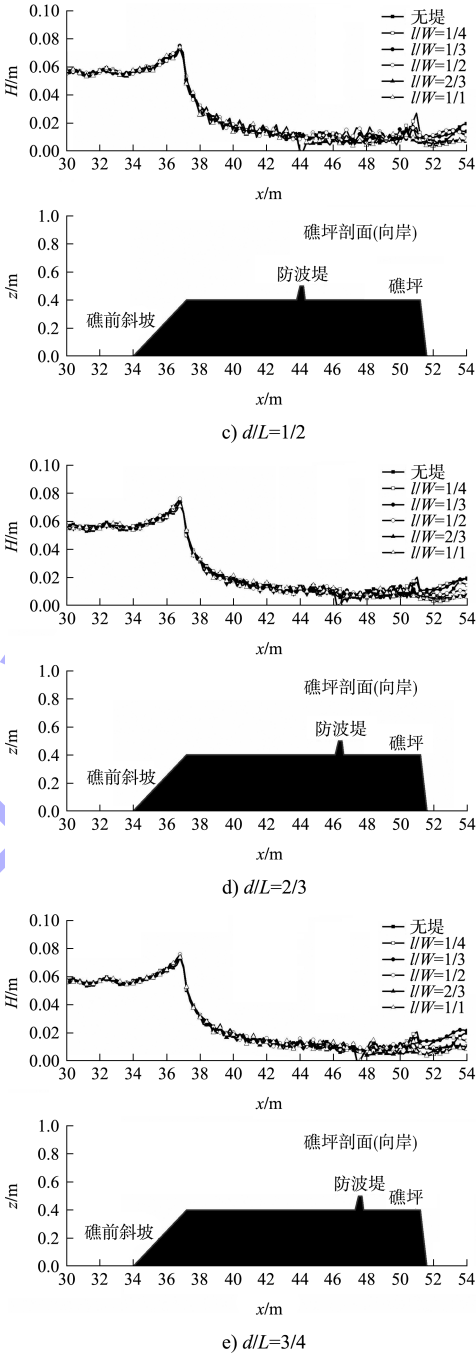
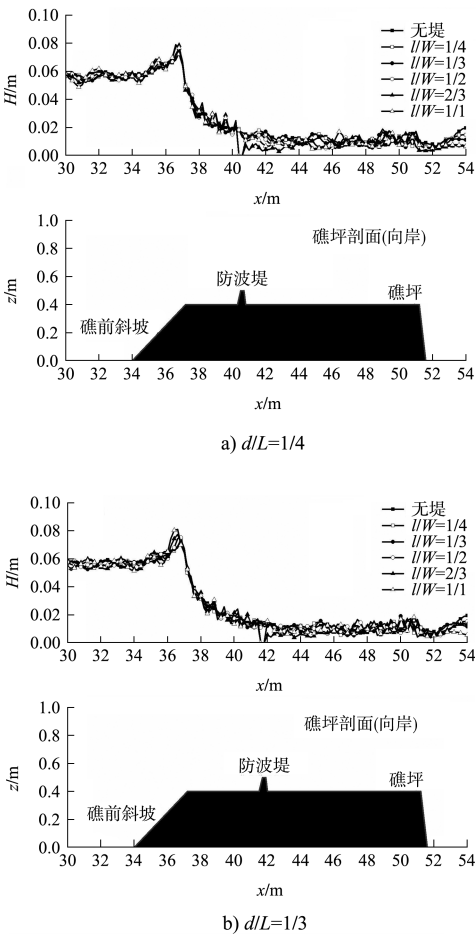


图 5 不同防波堤组次下礁坪中线断面波高变化

由图 6a) 波高值对比可知, 当防波堤堤距 $d/L=1/4$ 时, 不同防波堤长度 $1/4W$ 、 $1/3W$ 、 $1/2W$ 、 $2/3W$ 、 $1/1W$ 下裂口中线断面波高分布随防波堤长度的改变自裂口口门到裂口后方有明显的衰减, 并且其衰减幅度随防波堤堤长的增大而增大, 当 $l/W=1/1$ 时, 最大衰减达 81%。图 6b)~e) 为防波堤堤距 $d/L=1/3$ 、 $1/2$ 、 $2/3$ 、 $3/4$ 时, 不同防波堤长度 $1/4W$ 、 $1/3W$ 、 $1/2W$ 、

2/3W、1/1W下裂口中线断面波高分布对比。其变化规律与图 6a) 的不同点在于，当防波堤堤距 d 增大时，裂口中后段的波高值随之增大，另外可看出，防波堤堤长越小、堤距越大，其波高值与无堤时的波高值越接近，即筑堤位置越靠后、筑堤长度越短，对裂口中线断面波高的影响程度越小。

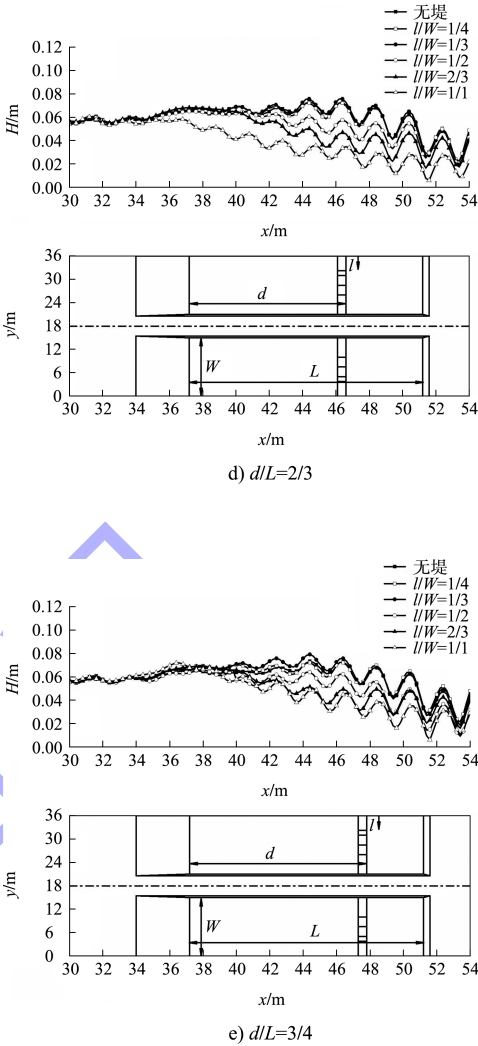
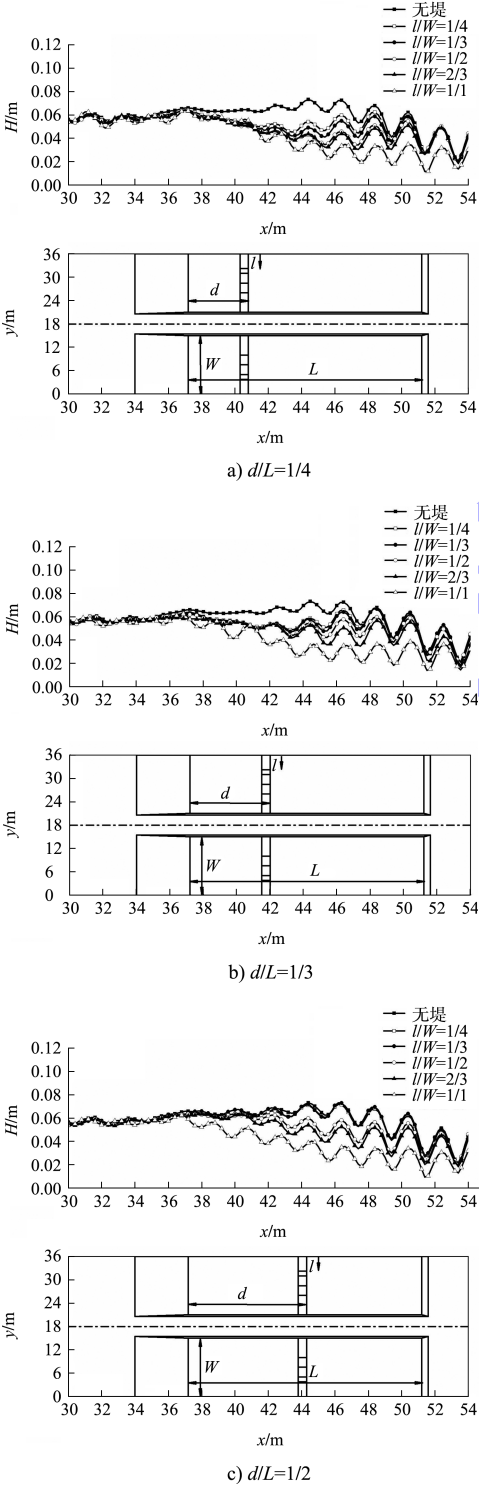
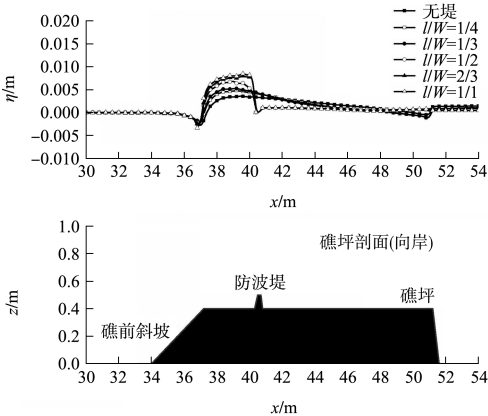


图 6 不同防波堤组次下裂口中线断面波高变化

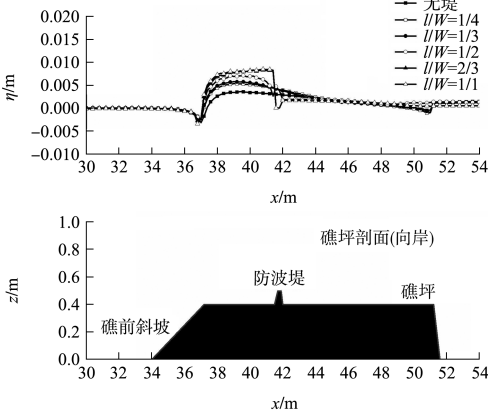
3 筑堤岛礁增减水分布特征

图 7a) 为 $d/L=1/4$ 时，不同防波堤长度 $1/4W$ 、 $1/3W$ 、 $1/2W$ 、 $2/3W$ 、 $1/1W$ 下礁坪中线断面增减水分布变化。从图 7a) 可以看出，建堤与无堤时相比，增水的主要变化位于礁缘至堤前这一范围，并且其增水幅度随着防波堤长度的增大而增大，当 $l>2/3W$ 时，断面内增水达到最大幅度。此外，对于防波堤长 $l>1/2W$ 的组次，因防波堤上方并不存在越浪，堤上增水为 0，所以在堤前位置增水会迅速减小，并且堤后增水也有所减小，同时趋于更加稳定的状态。图 7b) ~ e) 为 $d/L=1/3$ 、 $1/2$ 、 $2/3$ 、 $3/4$ 时，不同防波堤长度 $1/4W$ 、 $1/3W$ 、 $1/2W$ 、 $2/3W$ 、 $1/1W$ 下礁坪中线断面增减水分

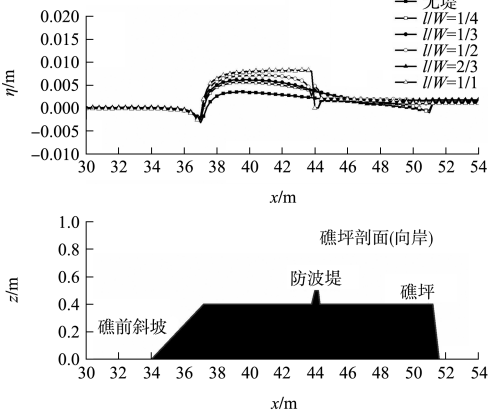
布变化, 整体趋势与图 7a) 大致相同。不同点在于, 防波堤堤距 d 越大, 礁坪上的增水范围越广。



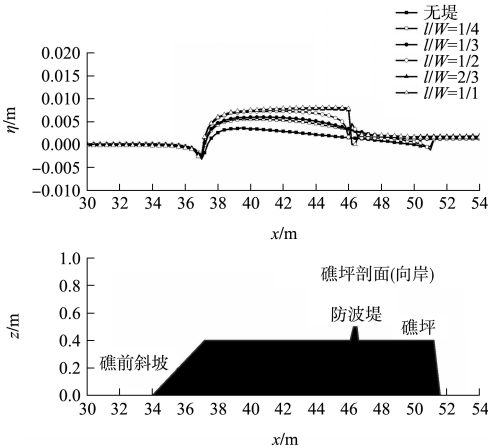
a) $d/L=1/4$



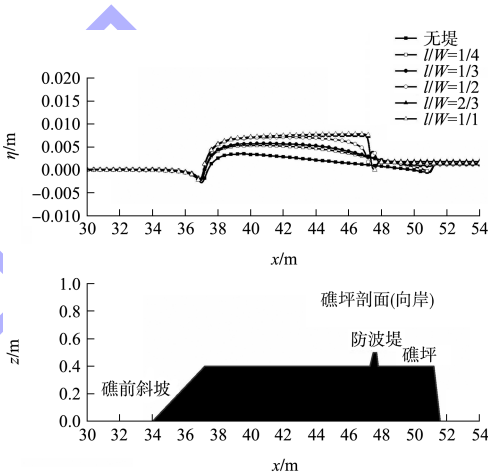
b) $d/L=1/3$



c) $d/L=1/2$



d) $d/L=2/3$



e) $d/L=3/4$

图 7 不同防波堤组次下礁坪中线断面增减水变化

图 8a) 为 $d/L = 1/4$ 时, 不同防波堤长度 $1/4W$ 、 $1/3W$ 、 $1/2W$ 、 $2/3W$ 、 $1/1W$ 下裂口中线断面增减水分布变化。从图 8a) 可以看出, 建堤相较于无堤时的断面最大减水幅度有所减小, 并且随着防波堤堤长增长而减小, 此时水体流动越稳定, 越利于通行, 当 $l/W = 1/1$ 时, 断面增减水几乎为 0。图 8b) ~ e) 为 $d/L = 1/3$ 、 $1/2$ 、 $2/3$ 、 $3/4$ 时, 不同防波堤长度 $1/4W$ 、 $1/3W$ 、 $1/2W$ 、 $2/3W$ 、 $1/1W$ 下裂口中线断面增减水分布变化。可以发现, 断面内的增减水变化随着防波堤堤距 d 的增大而增大, 即水体紊动更加强烈, 更不利于通航。

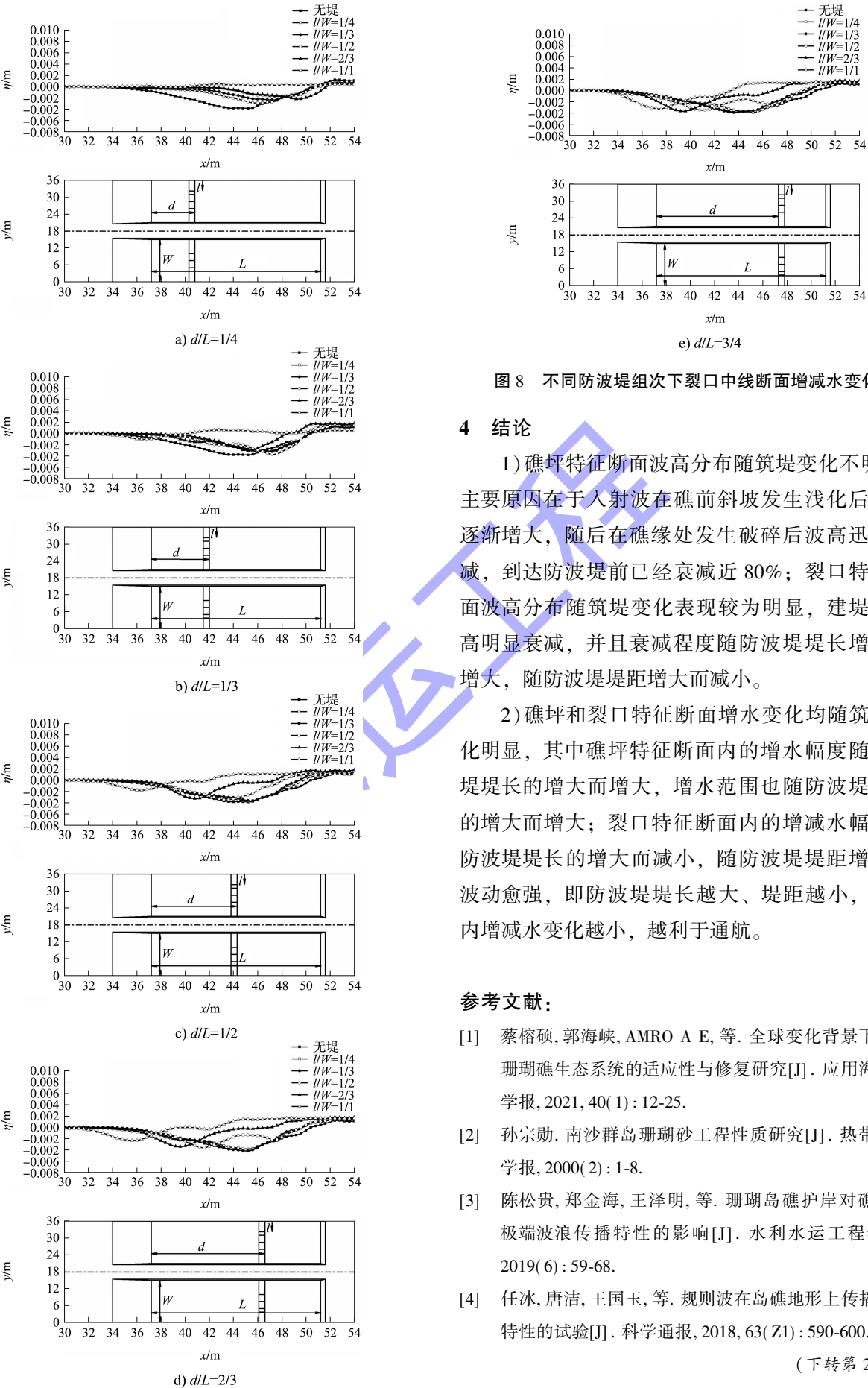


图 8 不同防波堤组次下裂口中线断面增减水变化

4 结论

1) 礁坪特征断面波高分布随筑堤变化不明显, 主要原因在于入射波在礁前斜坡发生浅化后波高逐渐增大, 随后在礁缘处发生破碎后波高迅速衰减, 到达防波堤前已经衰减近 80%; 裂口特征断面波高分布随筑堤变化表现较为明显, 建堤后波高明显衰减, 并且衰减程度随防波堤堤长增大而增大, 随防波堤堤距增大而减小。

2) 礁坪和裂口特征断面增水变化均随筑堤变化明显, 其中礁坪特征断面内的增水幅度随防波堤堤长的增大而增大, 增水范围也随防波堤堤距的增大而增大; 裂口特征断面内的增减水幅度随防波堤堤长的增大而减小, 随防波堤堤距增大而波动愈强, 即防波堤堤长越大、堤距越小, 断面内增减水变化越小, 越利于通航。

参考文献:

[1] 蔡榕硕, 郭海峡, AMRO A E, 等. 全球变化背景下暖水珊瑚礁生态系统的适应性与修复研究[J]. 应用海洋学报, 2021, 40(1): 12-25.

[2] 孙宗勋. 南沙群岛珊瑚砂工程性质研究[J]. 热带海洋学报, 2000(2): 1-8.

[3] 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.

[4] 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(Z1): 590-600.