

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.03.010

珊瑚礁坪地形上波生流的流场特性分析

王国玉,赵钦阳,葛 聪,陈 戈

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要:将珊瑚礁坪地形简化为向海坡为1:1的陡坡,基于SPH方法,建立了波浪在珊瑚礁坪地形上传播的数值波浪水槽,模拟规则波浪在珊瑚礁坪地形上的传播变化过程,分析珊瑚礁坪附近的流场特性,并将数值模拟结果与实验室观测结果进行对比。结果表明,在波浪传播过程中由于水深变浅,波浪发生变形和破碎,在珊瑚礁坪顶周围的水体中将产生一个与波浪传播方向相同的流动。

关键词:珊瑚礁;斜坡平台;SPH;流场分析;数值水槽;波浪传播

中图分类号:P731.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)03-0253-07

Numerical analysis on the fluid field of coral reefs based on the SPH method

WANG Guoyu,ZHAO Qinyang, GE Cong, CHEN Ge

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

Abstract: In this study, the slope of coral reef has a steep reef-face ($V:H=1:1$). Utilizing the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method, the wave propagation and the fluid field around the reef crest were analyzed. After that, the results have been compared to the experiment results. The simulations show that the wave deformation and breaking occur in the process of wave propagation due to the shoaling. As a result of the nonlinear influence, the flow withsame direction as the wave propagation will be observed around the reef crest. This paper compares the results of numerical simulation and laboratory observations, and proved that there is a greet agreement between them.

Key words: coral reef;steep slope;SPH;fluid field analysis;numerical flume;wave transformation

关于波浪在珊瑚礁盘上的传播规律,国内外学者已逐步展开研究。有学者对在不同入射波浪条件下,波浪在礁坪上传播时的水力特性以及波浪穿越过潜堤时的波浪频谱分解现象进行了研究^[1-6]。柳淑学等^[7]将珊瑚礁地形简化,研究在该地形下规则波和不规则波的波浪破碎和波高沿程衰减情况。Young^[8]通过现场观测研究了珊瑚礁坪上波浪的传播。Nwogu等^[9]通过物理模型试验和数值模拟研究了不规则波在珊瑚礁海岸传播时的变形和爬坡情况。

上述研究工作一般基于物理模型试验方法,数值模拟方法也多应用 Boussinesq 模型^[10-13]。为了模拟得到珊瑚礁系统中更详细的流场信息,同时基于光滑粒子流体动力学法 (SPH) 在自由表面流动问题的应用^[14-16],将珊瑚礁地形简化为坡度为1:1的陡坡(向海坡)地形,通过建立二维水动力学数值模型,模拟并研究了规则波在该模型中波浪的传播变化,以及在珊瑚礁坪前沿周围的流场特性,并提供较为准确的流场信息。

1 数值计算模型

1.1 SPH 的基本理论

基于文献[17]提出的 SPH 方法,对于任意一个函数 $f(\boldsymbol{r})$ 均可按积分近似(核近似)、粒子近似表达。这

基金项目: 国家自然科学基金(51679032)
作者简介: 王国玉(1977—),男,副教授,博士,主要从事海岸工程实验与数值模拟研究。E-mail: wanggyu@dlut.edu.cn
引用本文: 王国玉,赵钦阳,葛聪,等. 珊瑚礁坪地形上波生流的流场特性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):253-259.
WANGGuoyu,ZHAO Qinyang, GE Cong, et al. Numerical analysis on the fluid field of coral reefs based on theSPH method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(3):253-259.

里直接给出 SPH 核近似中函数及其导数的连续积分表达式:

$$\langle f(\mathbf{r}) \rangle = \int_{\Omega} f'(\mathbf{r}) W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' \tag{1}$$

$$\langle \nabla f(\mathbf{r}) \rangle = - \int_{\Omega} f'(\mathbf{r}) \nabla W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' \tag{2}$$

式中: $W(\mathbf{r}-\mathbf{r}', h)$ ——光滑核函数; h ——光滑长度; Ω ——包含 $\mathbf{r}$ 的积分体积; $\mathbf{r}$ ——向量, $\mathbf{r}=(x, z)$; $f(\mathbf{r})$ ——向量 $\mathbf{r}$ 的函数; $f'(\mathbf{r})$ —— $f(\mathbf{r})$ 的导数; $\langle \rangle$ ——核近似算子。

在 SPH 方法中, 整个系统由具有独立质量、占有独立空间的有限的 N 个粒子表示, 故式(1)、式(2)可转化为支持域内所有粒子叠加求和的离散化形式。用 ρ 代替式(1)离散后的 $f(\mathbf{r})$, 对任一粒子 i , 可得到密度的 SPH 近似式:

$$\rho_i = \sum_{j=1}^N m_j W_{ij} \tag{3}$$

其中 $m_j = \rho_j \Delta V_j$ $W_{ij} = W(r_{ij}, h)$ $r_{ij} = r_i - r_j$
式中: m_j ——粒子 j 的质量($j=1, 2, \dots, N$); ρ_i, ρ_j ——粒子 i, j 的密度; W_{ij} ——粒子 j 对粒子 i 产生影响的光滑函数, 与 h 紧密相关; ΔV_j ——积分区域内除 i 粒子外其他粒子质点体积微元; r_i, r_j ——粒子 i, j 的空间位置; r_{ij} ——粒子 i 与粒子 j 间的距离。

1.2 水动力控制方程

本文主要研究重力水波的运动过程, 采用 Navier-Stokes 方程组来描述流体的质量守恒和动量守恒方程, 其表达式为

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \mathbf{v} \tag{4}$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + g \tag{5}$$

式中: ρ ——流体密度; $\mathbf{v}$ ——速度矢量; P ——压力; g ——重力加速度; μ ——相应液相的动力黏性系数。对于不可压缩流体, 质量守恒方程右端项为 0, 而在 SPH 方法中假设流体是轻微可压缩的, 故可得到质量守恒方程的 SPH 形式为

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} v_{ij} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_i} \tag{6}$$

其中 $\mathbf{v} = (u, w)$ $v_{ij} = v_i - v_j$
式中: u, w ——流体速度在 x, z 方向的速度分量; v_i, v_j ——粒子 i, j 的速度; v_{ij} ——粒子 i 与 j 之间的相对速度。

当考虑流体黏性耗散时, 基于 Monaghan 提出的人工黏度, 将人工黏性项加入动量方程, 得到 SPH 形式的动量方程为

$$\frac{dv_i}{dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_i} + g \tag{7}$$

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha_{\Pi} c_{ij} \varphi_{ij} + \beta_{\Pi} \varphi_{ij}^2}{\rho_{ij}} & (v_{ij} r_{ij} < 0) \\ 0 & (v_{ij} r_{ij} \geq 0) \end{cases} \tag{8}$$

其中 $\varphi_{ij} = \frac{h_{ij} v_{ij} r_{ij}}{|r_{ij}|^2 + \varphi^2}$ $c_{ij} = \frac{1}{2}(c_i + c_j)$
 $\rho_{ij} = \frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)$ $h_{ij} = \frac{1}{2}(h_i + h_j)$ $\varphi = 0.1 h_{ij}$
式中: Π_{ij} ——人工黏性; $\alpha_{\Pi}, \beta_{\Pi}$ ——常数, 对自由表面流动问题, 通常取 $\alpha_{\Pi}=0.01, \beta_{\Pi}=0$; φ ——用于避免粒子相互靠近时产生的数值发散引进的因子; c_i, c_j ——粒子 i 和粒子 j 的声速; $\rho_{ij}, c_{ij}, h_{ij}$ ——粒子 i 和粒子 j 密度、声速、光滑长度的算术平均。

对于压力 P , 一般选取 Monaghan 在计算自由表面流动问题时所用的状态方程:

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \tag{9}$$

其中

$$B = \frac{c_0^2 \rho_0}{\gamma}$$

式中： γ ——常系数，液相中取值为 7； ρ_0 ——流体初始密度，本文取水的密度为 1 000 kg/m³； B ——限制密度场的最大改变量； c_0 ——声速，其取值要保证流体的压缩率在 1% 以内。

基于上述 SPH 形式的质量和动量方程，为得到更为稳定的压力场和速度场，采用经黎曼解和基于泰勒展开式的 CSPM 方法进行修正，修正后的质量和动量守恒方程为

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{\rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_{ij}^*}{\rho_{ij}^*} (u_i^R - u_{ij}^R) \nabla_i W_{ij}}{\sum_{j=1}^N (r_{ij}^* - r_i) \otimes \nabla_i W_{ij} \frac{m_{ij}^*}{\rho_{ij}^*}} \tag{10}$$

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{- \sum_{j=1}^N m_{ij}^* \frac{P_{ij}^*}{\rho_{ij}^* \rho_i} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i}}{\sum_{j=1}^N (r_{ij}^* - r_i) \otimes \nabla_i W_{ij} \frac{m_{ij}^*}{\rho_{ij}^*}} \tag{11}$$

其中

$$r_{ij}^* - r_i = (r_j - r_i) \frac{\frac{m_i}{\rho_i}}{\frac{m_i}{\rho_i} + \frac{m_j}{\rho_j}} + u_{ij}^R \Delta t$$

$$m_{ij}^* = \frac{m_i + m_j}{2} \quad \rho_{ij}^* = \left(\frac{\rho_i^3 + \rho_j^3}{2} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad \nabla_i W_{ij} = \frac{r_i - r_j}{|r_{ij}|} \frac{\partial W_{ij}}{\partial |r_{ij}|}$$

式中： Δt ——时间步长； u_i^R —— i 粒子的径向速度； u_{ij}^R ——接触点处的法向速度； P_{ij}^* ——接触点的压力； m_{ij}^* ——粒子 i 和粒子 j 质量的算术平均； u_i, x_i ——粒子 i 在 x 方向的速度和位置； ρ_{ij}^* ——粒子 i 和粒子 j 密度的体积平均； $\nabla_i W_{ij}$ —— W 函数关于 i 粒子的求导。

1.3 数值边界

SPH 方法是完全的拉格朗日方法，自由表面的边界条件自动满足。对于固边界采用双层固壁边界粒子法模拟，固壁边界粒子与流体粒子一样具有一定的质量、密度和压力，参与式 (10) 与式 (11) 的计算，其密度和压力随着时间步更新，但位置和速度始终为零。对于造波板边界，由造波板控制信号确定其边界粒子的位置和速度，而在边界粒子附近的流体粒子 i 受到边界粒子 b 的作用力为

$$f_{ib}(\mathbf{r}) = - m_b \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} \right) \nabla_i W_{ib} \tag{12}$$

其中

$$P_b(\rho) = P'_b \frac{\alpha(P_b + P_i)}{2} \quad \rho_i = \frac{\sum_{j=1}^N \rho_j}{N}$$

式中： α ——常数，按经验取值为 1.000 2； m_b ——粒子 b 的质量； P_i ——粒子 i 的压力； P_b ——粒子 b 的压力； P'_b ——由状态方程计算出的初始时刻固边界上粒子 b 的静水压力。

数值模型采用普通推板式造波形式，根据线性造波理论，对于平衡位置在原点，圆频率为 ω 的推板式造波机，其推板上粒子的运动速度为

$$v = \frac{\omega H}{2Q} \cos \omega t \tag{13}$$

其中

$$Q = \frac{4 \sinh^2(kd)}{2kd + \sinh(2kd)}$$

式中： H ——目标波高； Q ——水动力传递函数； k ——波数； d ——静水深。

在水槽的右端设置黏性消波区域，以衰减消波区域内粒子的速度和压力梯度，达到消除水槽右端边界反射的目的。消波区域内流体粒子的速度和压力表达式为

$$v_i = v_i + 0.5 \frac{x - x_0}{l} \sum_{j=1}^N \left[\frac{m_j}{\rho_{ij}} (v_j - v_i) \sum_{j=1}^N W_{ij} \frac{m_j}{\rho_j} \right]$$

(14)

$$P_{ij}^* = \frac{P_i \rho_j c_j + P_j \rho_i c_i + \left(\varepsilon + \chi \frac{x - x_0}{l} \right) \rho_i c_i \rho_j c_j (u_i^R - u_j^R)}{\rho_i c_i + \rho_j c_j}$$

(15)

式中: x_0 ——消波区域的起始横坐标; x ——消波区域内流体粒子的横坐标; l ——消波区域长度; ε 、 χ ——数值参数。

2 模型算例

2.1 数值水槽的建立

为了检验上述 SPH 数值计算模型,笔者在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的波浪水槽内,开展了波浪在礁坪地形上传播变形的物理模型试验。试验布置如图 1 所示,礁前水深为 0.52 m,礁坪上水深分别为 0.04 m、0.19 m。4 个斜坡段的水平方向长度依次是 0.48 m、0.15 m、0.15 m、0.48 m,坡度均为 1 : 1,礁坪高度为 0.48 m,沿程共分布 9 个测点。其测点位置依次位于 2.42 m、2.52 m、3.02 m、3.25 m、3.50 m、3.75 m、4.0 m、6.0 m、8.0 m 处。其中 1~5 号和 7~9 号测点用于测量波面变化过程,6 号测点用于测量礁坪上的流速,试验的水深与波浪条件见表 1。

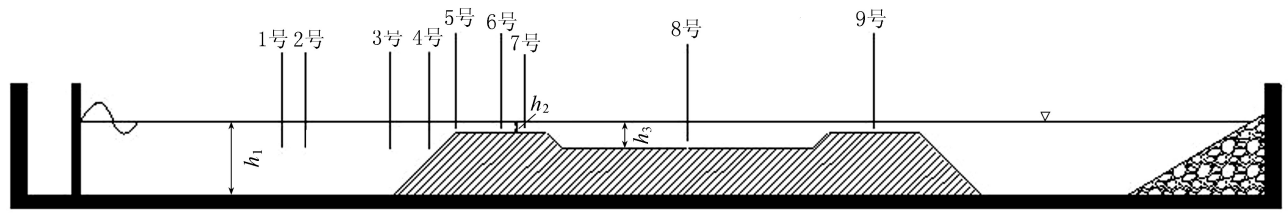


图 1 波浪水槽布置

Fig. 1 Sketch of the wave flume with a coral reef terrain

对应上述试验地形和条件,笔者建立了二维 SPH 数值计算模型,如图 2 所示。该模型用于模拟后方有凹陷地形的深水平顶珊瑚礁坪上的规则波的传播过程,坐标原点设置在水槽最左端静水面处。数值水槽总计算域为 13 m×0.8 m,造波板设置在水槽左侧,初始位置为 $x=0.2$ m。珊瑚礁地形对称设置,向海坡设置为陡坡,坡度为 1 : 1。数值水槽右端设置黏性消波区域,其长度约为入射波波长的 1.5 倍。数值模拟中沿珊瑚礁地形布置 9 个测点,对应的测点位置与测量内容均与物理模型试验保持一致。

表 1 试验验证波浪要素

Table 1 Wave parameters for the experimental verification

工况	礁前水深 h_1/m	周期 T/s	入射波高 H_0/m
1	0.52	0.55	0.03
2	0.52	0.70	0.03
3	0.52	0.70	0.07
4	0.52	1.00	0.07

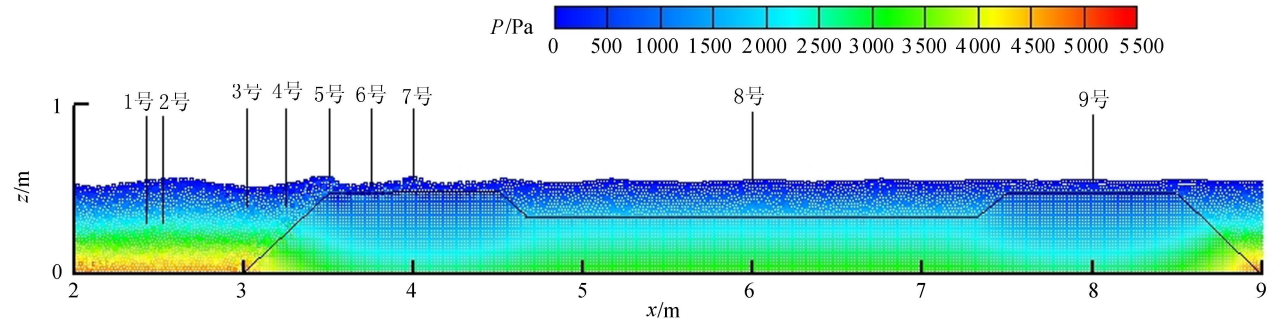


图 2 珊瑚礁地形的几何模型

Fig. 2 Geometry of the coral reef terrain

2.2 模型验证

基于上述 SPH 数值波浪水槽,提取表 1 所列 4 种工况下 6 个测点(2 号、4 号、5 号、7 号、8 号、9 号)的波面信息,并将数值模拟结果与试验结果进行对比,如图 3 所示。可以发现,在这 4 种工况下,各测点波面 η 历

时的数值结果与试验结果吻合较好,说明本文所建立的数值波浪水槽可以较好地模拟波浪在该珊瑚礁地形上的传播过程。

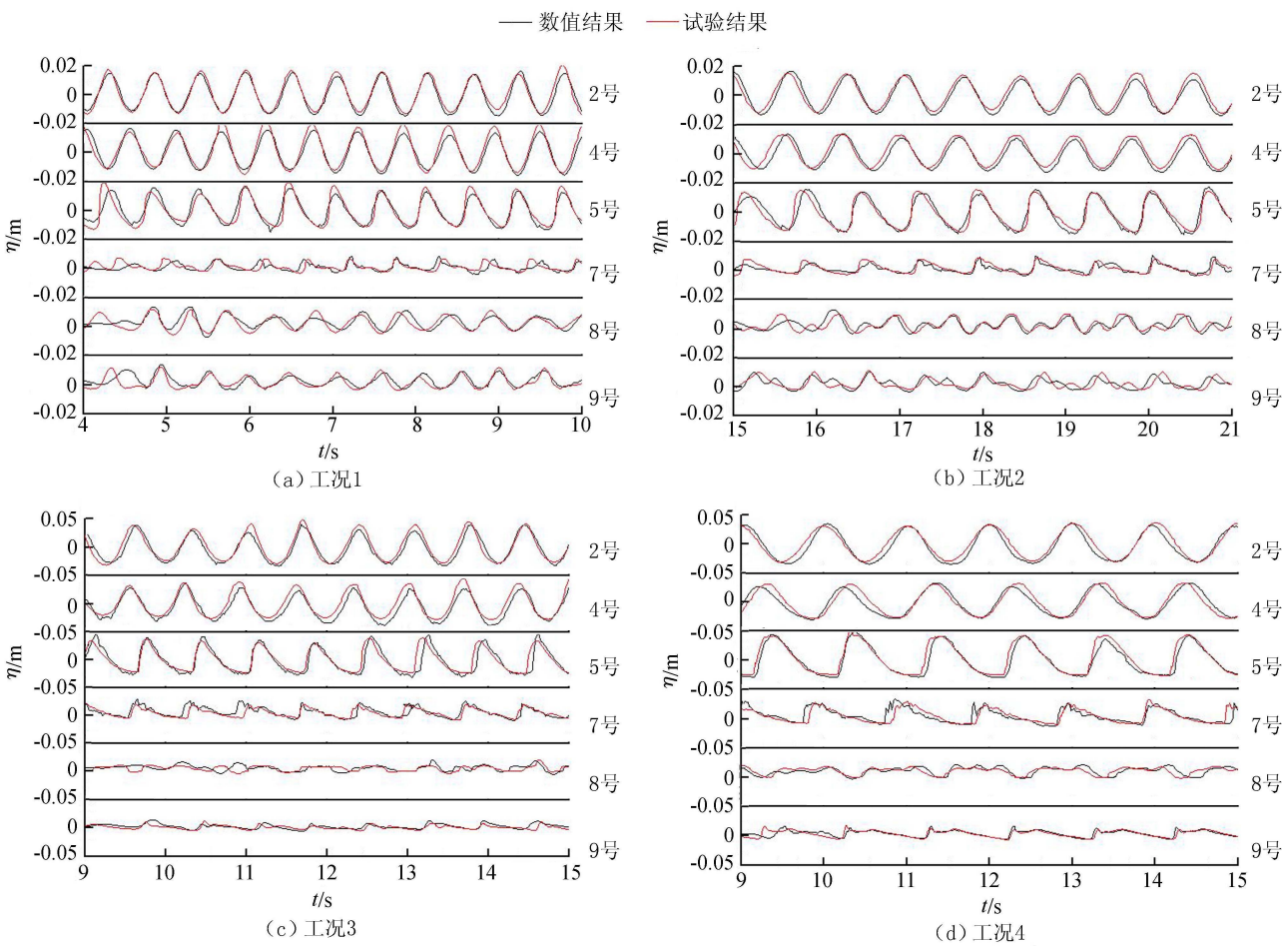


图3 波面历时曲线对比

Fig.3 Comparison of time-series of the surface elevations

规则波在珊瑚礁地形上传播过程中,当入射波高较小时(图3(a)、图3(b)),波浪在向海坡坡面上(4号)浅水作用不明显,波形稳定,随着水深迅速变浅,波浪受非线性影响增大,波峰变尖,波形表现出不对称性(5号),当入射波高增大时如(图3(c)、图3(d)),波浪受水底影响增大,这种变形加剧,此外由观察可见,5号测点的波高比4号测点有所增大;当波浪传播至礁坪上方7号测点时,由于持续的非线性影响,波峰继续变尖,波谷变平坦,波形呈现锯齿状,波高明显变小;在8号和9号测点位置,波高进一步减小。

另外,为了更好地验证本文所建立的数值模型可以很好地模拟该地形上珊瑚礁礁坪顶点周围的流场信息,笔者提取了上述4种情况中6号测点的流速信息与物理模型试验结果进行对比分析,对比结果如图4所示。

从图4可以看出,数值模拟结果与物理模型试验观测数据吻合较好,可以明显反映流场中流体质点的正向速度大于反向速度,说明波浪传播至礁坪坡顶后,在礁坪地形的上方,流体质点除了在波浪作用下做往复运动外,受波浪破碎的影响,流体中还存在一个向右的流动,这与试验中观察到的现象一致。

2.3 流场分析

图5给出了工况3下,波浪在珊瑚礁地形上传播过程中,珊瑚礁向海坡坡顶周围一个波浪周期内的流场变化。

从图5中可见,在 $t=9.84\text{ s}$ 时,波峰传播至坪顶前方,在平顶处水体有回流现象;在 $t=10.08\text{ s}$ 时,波峰传播至礁坪正上方,由于水深急剧变浅,波浪明显发生浅水变形,波峰面前沿几近垂直,受礁坪地形的影响,坡顶处水体呈上涌趋势,而坡顶处水体仍保持回流现象;在 $t=10.28\text{ s}$ 时,波浪的浅水变形加剧,呈现出卷破的形态,波峰顶端流体质点运动速度增大,水体的运动方向与波浪传播方向保持一致,且速度较大;在 $t=10.48\text{ s}$ 时,变形破碎后的波浪在礁坪上继续向前传播,大部分礁坪上水体以水流的形式向前流动。

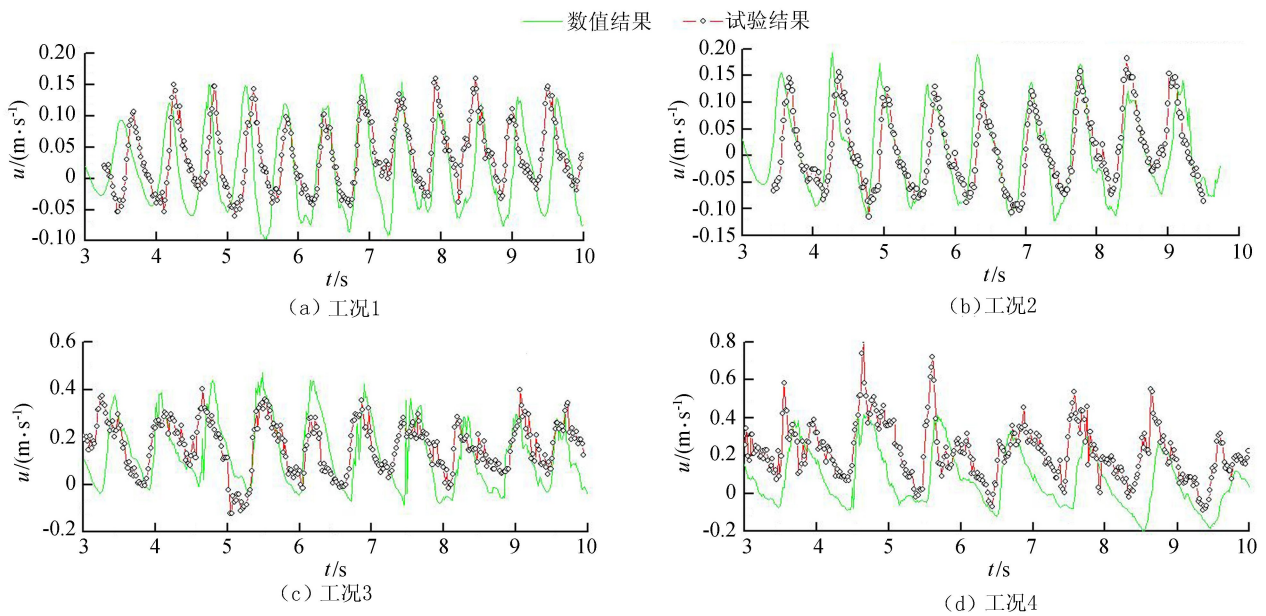


图4 珊瑚礁礁坪上方6号测点流速值对比

Fig.4 Comparison of the velocity in the horizontal direction at the 6th monitoring point on the coral reef flat

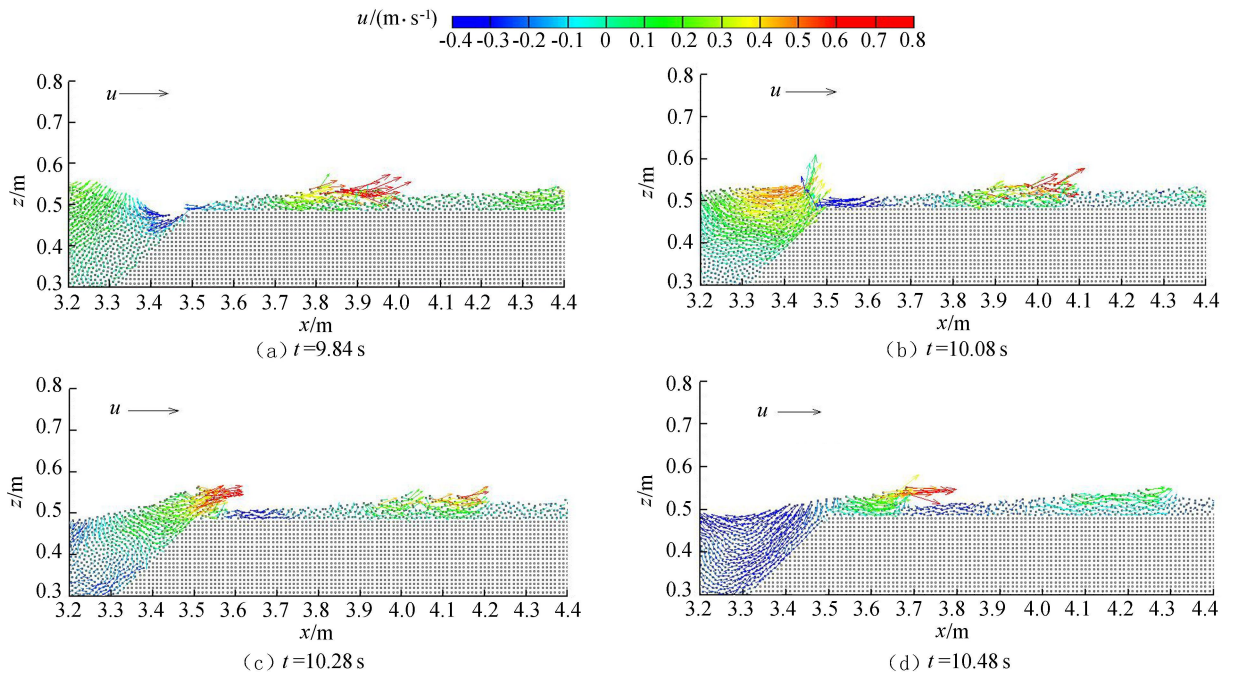


图5 珊瑚礁向海坡坡顶周围流场变化

Fig.5 Variation of the flow field in the local of the reef flat

3 结 语

基于 SPH 方法建立了二维数值波浪水槽,用于模拟波浪在珊瑚礁坪上的传播过程,并通过数值计算将得到的 4 种波况下的波面历时曲线及定点流速图与实验室结果进行对比,从而验证了数值模型的有效性。研究表明,该模型可以较为准确地模拟波浪传播至深海珊瑚礁坪时礁坪周围的流场信息;由于波浪的破碎作用,在礁坪地形上产生一个与波浪传播方向一致的流动。

参考文献:

[1] GERRITSEN F. Wave attenuation and wave set-up on a coastal reef [C]//Anon. Proc of the 17th International Conference on

- Coastal Engineering. [s.l.]: The Institution of Engineers, 1980: 444-461.
- [2] SEELIG W N. Wave induced design conditions for reef lagoon system hydraulics[R]. Letter Report Prepared for the U. S. Army Corps of Engineers, Pacific Ocean Division, 1982.
- [3] SEELIG W N. Laboratory study of reef-lagoon system hydraulics[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 1984, 109(4):380-391.
- [4] BEJI S, BATTJES J A. Experimental investigation of wave propagation over a bar[J]. Coastal Engineering, 1993, 19(1):151-162.
- [5] BEJI S, BATTJES J A. Numerical simulation of nonlinear wave propagation over a bar[J]. Coastal Engineering, 1994, 23(Sup1/2):1-16.
- [6] BENXIA L I, XIPING Y U. Wave decomposition phenomenon and spectrum evolution over submerged bars[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 28(3):82-92.
- [7] 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 propagation characteristics on reefs terrain[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(2):42-49. (in Chinese))
- [8] YOUNG I R. Wave transformation on coral reefs[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1989, 94(C7):9779-9789.
- [9] NWOGU O, DEMIRBILEK Z. Infragravity wave motions and runup over shallow fringing reefs[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2014, 136(6):295-305.
- [10] YAO Y, HUANG Z, MONISMITH S G, et al. 1DH Boussinesq modeling of wave transformation over fringing reefs[J]. Ocean Engineering, 2012, 47(10):30-42.
- [11] 房克照, 刘忠波, 唐军, 等. 潜礁上孤立波传播的数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(3):295-300. (FANG Kezhao, LIU Zhongbo, TANG Jun, et al. Simulation of solitary wave transformation over reef profile[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(3):295-300. (in Chinese))
- [12] FANG Kezhao, YIN Jiwei, LIU Zhongbo, et al. Revisiting study on Boussinesq modeling of wave transformation over various reef profiles[J]. Water Science and Engineering, 2014, 7(3):306-318.
- [13] 黄英丽, 王国玉, 房克照, 等. 基于 Boussinesq 方程的陡峭礁坪上波浪传播变形数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(1):38-42. (HUANG Yingli, WANG Guoyu, FANG Kezhao, et al. Numerical modeling of wave propagation on steep reef based on Boussinesq equation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1):38-42. (in Chinese))
- [14] MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics[J]. Reports on Progress in Physics, 2005, 68:1703-1759.
- [15] WEN Hongjie, REN Bing, DONG Ping, et al. A APH numerical wave basin for modeling wave-structure interactions[J]. Applied Ocean Research, 2016, 59:366-377.
- [16] 林鹏智, 刘鑫. 光滑粒子水动力学在水利与海洋工程中的应用研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5):36-46. (LIN Pengzhi, LIU Xin. Recent advances application of smoothed particle hydrodynamics in hydraulic and ocean engineering[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5):36-46. (in Chinese))
- [17] LIU G R, LIU M B. Smoothed particle hydrodynamics: a mesh free particle method[M]. Singapore: World Scientific, 2003.

(收稿日期: 2017-03-07 编辑: 张志琴)