

文章编号: 1007-7294(2025)03-0363-11

岛礁地形下浮式结构动力响应分析

高艳丽¹, 黄林茜², 涂佳黄^{1,3}, 王贯宇¹, 黄小凡⁴

(1. 湘潭大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 中铁建工长沙市规划设计院, 长沙 411107; 3. 佛山大学 交通与土木建筑学院, 广东 佛山 528225; 4. 湖南鼎豪建设有限公司, 湖南 益阳 413002)

摘要: 基于 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 数值模拟方法, 本文对在近岸岛礁地形下不同类型波浪传播演化过程的变化情况与系缆式浮式结构动力响应情况进行分析。研究表明: 当在岛礁前放置系缆式浮体结构时, 浮式结构对非规则波的波高衰减效果会优于规则波, 且波高的变化对浮式结构波高衰减效果影响不大; 波浪周期的变化对浮式结构的消浪效果影响较大, 而浮式结构对长周期波浪的波高衰减效果较差; 不同规则波波高工况下, 浮式结构的最大垂向位移、最大纵摇角度以及最大横荡值随波高的增大均呈现上升的趋势, 其中最大纵摇角度对波高变化最为敏感, 最大垂向位移最不敏感; 不同波周期工况下, 浮式结构的最大垂向位移与最大横荡值都随波周期的增大而增大, 而最大纵摇角度却会减小。

关键词: 岛礁地形; SPH 方法; 系缆式浮体结构; 动力响应; 波参数

中图分类号: U674 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.03.003

Analysis of the dynamic response of floating structures in island topography

GAO Yan-li¹, HUANG Lin-xi², TU Jia-huang^{1,3}, WANG Guan-yu¹, HUANG Xiao-fan⁴

(1. College of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2. China Railway Construction Engineering Changsha Planning and Design Institute, Changsha 411107, China; 3. College of Transport and Civil Architecture, Foshan University, Foshan 528225, China; 4. Hunan Dinghao Construction Co. Ltd., Yiyang 413002, China)

Abstract: Based on the SPH numerical simulation method, this paper presents an analysis of the wave variation of regular and irregular waves propagating along an inshore island reef with a floating structure, and the dynamic response of a tethered floating structure under the island reef topography, respectively. The results show that the floating structure attenuates irregular waves better than regular waves when a tethered floating structure is installed in front of the shore reef, and changes in wave height have little effect on the attenuation of floating structure wave height. However, changes in wave period have a greater impact on the attenuation effect of the floating structure, and the floating structure is less effective in attenuating the wave height of long-period waves. The maximum vertical displacement, maximum longitudinal rocking angle and maximum transverse oscillation values of the floating structure all show an increasing trend with wave height increasing under different regular wave height conditions, with the maximum longitudinal rocking angle

收稿日期: 2024-09-18

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ50027; 2022JJ50038); 湖南省教育厅科学研究项目(21A0103); 广东省基础与应用基础研究基金(2022A1515240077)

作者简介: 高艳丽(1999-), 女, 硕士研究生; 黄林茜(1996-), 女, 硕士研究生;

涂佳黄(1982-), 男, 博士, 教授, 通讯作者。E-mail: tujiahuang1982@163.com。

being the most sensitive to changes in wave height and the maximum vertical displacement being the least sensitive.

Key words: island topography; SPH method; tethered floating structure; dynamic response; wave parameter

0 引言

波浪在浅海岛礁区传播时发生的变形以及相关的水动力学现象极其复杂。大量学者从理论研究、实地观察、物理模型试验以及数值模型等多个方面对岛礁的波动特性进行了研究。Young^[1]通过对Yonge礁的区域实地观测,探讨了沿礁坪方向波高衰减的规律,发现其衰减速率与海底摩阻原理和波高破碎衰减理论基本一致,并且观察到波浪在穿越礁坪时存在波能向高频与低频扩散的现象,说明了珊瑚礁附近波浪的绕射和折射是波高衰减的主要原因。一些学者对珊瑚岛礁环境下的增水和波生流进行了物理实验研究:Gourlay^[2]发现规则波在珊瑚礁坪上破碎所产生的增水随着礁坪水深的下降而增大;Demirbilek等^[3]的试验结果表明,非规则波在沿礁传播过程中会发生波破碎,由此产生大量的波能耗散会削弱入射波波高;Yao等^[4]进行了相关的物理模型试验研究,结果表明礁冠的存在对于增水现象的影响较大,并且礁冠处水深的变化对于波浪破碎以及增水影响较大;陈树彬等^[5]对规则波作用下珊瑚礁海岸不同位置的波浪和流场特征进行了整体物理模型实验研究,发现增水沿礁坪呈现先增大后减小的趋势;基于一种弱非线性和色散性的 Boussinesq 方程,Skotner等^[6]对规则波的传播变形与增水改变情况进行了研究;Wen等^[7]验证了 SPH 模型对于礁坪上波浪的破碎、增水以及能谱的改变;Wen等^[8]采用 SPH 模型,进一步对珊瑚礁地形上礁坪末端有无直立墙情况下的波面变化、礁坪增水以及能量转移进行了研究;任兴月等^[9]在圆形数值波浪水池中进行了斜向波浪的数值模拟实验,结果表明圆形水池有效区域位于水池中部,较传统的矩形水池有效面积显著增大,且几乎不受波浪入射角度和反射波浪的影响;Song等^[10]对浮动圆柱体之间的动态特性问题展开了物理实验研究,实验所得的模拟波与浅水理论预测结果吻合较好,当波周期发生变化时,漂浮体结构的运动特性发生较大的改变。除此之外,关于波浪与浮式结构的数值模拟研究也有许多。金哲飞等对锚链系泊单方箱浮式结构的水动力性能进行了研究,结果显示,该模型能够对二维波浪和浮动防波堤进行精确仿真模拟研究;朱仁庆等^[11]基于时域下 CFD-FEM 方法,在三维粘性数值水池中建立了畸形波浪与弹性浮体相互作用的耦合数值模型,浮体结构采用 FEM 方法进行计算,计算结果表明聚焦波的浪向、聚焦位置和频带宽度对浮板的水弹性响应均有较大影响;嵇春艳^[12]基于 STAR CCM+软件模拟了规则波与不同锚泊方式的浮式结构的相互作用,通过对浮体结构的冲击荷载和运动响应的分析,发现浮式结构承受冲击最多的是迎浪面,且随着波浪高度的增加、冲击时间的增加而降低;伏耀华等^[13]采用台阶近似法(step approximation method, SAM)和二维 Rankine 源方法(2D Rankine source method, RSM2D)建立了斜坡海底条件下浮体二维水动力数值模型(SAM-RSM2D),开发了对应的软件程序,其中台阶近似法能够求解斜底上的入射波浪速度势,二维 Rankine 源方法可以考虑绕射问题中波浪-浮体-海底的交互作用,通过对比斜上坡、斜下坡和平底地形条件下的浮体波浪激励力和激励力矩发现,斜上坡和斜下坡对浮体波浪载荷的作用规律有显著差异。

1 计算理论

1.1 SPH 方法

本文采用开源程序 DualSPHysics,该程序中的 SPH 数值模型为微可压缩模型,主要通过对控制域粒子或质点的状态方程求解获取压力值而无需直接求解泊松方程,这一基本操作的实现是基于各个粒子或质点的质量不变、仅密度可变的假设。

(1) 动量方程为

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{g} + \mathbf{\Gamma} \quad (1)$$

式中, $\frac{dv}{dt}$ 为物质导数, v 为速度, t 为时间, ρ 为密度, ∇P 为压强散度, $\mathbf{\Gamma}$ 为耗散项, \mathbf{g} 为重力加速度。

根据人工粘度方法^[11], 流体微粒的动量方程表达式为

$$\frac{dv_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_b + P_a}{\rho_b \rho_a} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + \mathbf{g} \quad (2)$$

式中, a、b 均表示一个孤立的粒子, m_b 代表粒子 b 的质量, P_a 与 P_b 分别代表粒子 a、b 的压强, ρ_a 与 ρ_b 分别代表粒子 a、b 的密度, W 代表平滑的核函数。粘度项 Π_{ab} 表达式为

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha_m \mu_{ab} \bar{c}_{ab}}{\rho_{ab}} & v_{ab} r_{ab} < 0 \\ 0 & v_{ab} r_{ab} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\bar{c}_{ab} = 0.5(c_a + c_b)$ 是平均声速; $r_{ab} = r_a - r_b$, $v_{ab} = v_a - v_b$ 以及 v_a 和 r_a 分别表示粒子 a 的速度与位移; $\mu_{ab} = h v_{ab} \cdot r_{ab} / (r_{ab}^2 + \eta_c^2)$, $\eta_c^2 = 0.01 h^2$, α_m 是为保证正常的粘滞扩散而引入的校正因子, 以保证合适的消散。

从 Lo 和 Shao 的有关理论出发, 层流粘性应力表达式为

$$(v_0 \nabla^2 v)_a = - \sum_b m_b \left(\frac{4v_0 r_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab} + \eta_c^2)} \right) \nabla_a v_{ab} \quad (4)$$

式中, $v_0 = 10^{-6}$ 为水的运动粘度。在 SPH 离散表示法中, 将上式代入动量方程中, 可得到下式:

$$\frac{dv_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_b + P_a}{\rho_b \rho_a} \right) \nabla_a W_{ab} + \mathbf{g} + \sum_b m_b \left(\frac{4v_0 r_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab} + \eta_c^2)} \right) \nabla_a v_{ab} \quad (5)$$

(2) 连续性方程

在 SPH 法中, 由于颗粒的质量与其相应的密度有一定的变化, 因此利用 SPH 法可以得到相应的质量和连续的方程式。

$$\frac{d\rho_a}{dt} = - \sum_b m_b v_{ab} \nabla_a W_{ab} \quad (6)$$

(3) 状态方程

将 SPH 法中的液体看作是微可压缩流体, 利用状态方程建立颗粒密度的关系, 并由此可得到流体压强^[13]。

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma_c} - 1 \right] \quad (7)$$

式中, $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ 为流体表面的相对密度; γ_c 是几何常量, 一般取 1~7; B 的数值大小与液体可压缩度有关, $B = c^2 \rho_0 / \gamma_c$, 其中, c 为声速, $c = c(\rho_0) = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)_{\rho_0}}$, 为了使得流体密度的变化小于 1%, 满足不可压缩流体的条件, 因此, 其数值应大于 10 倍最大流体速度。

(4) 时间积分

SPH 的积分形式通常依赖于 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL) 条件、压强项和粘滞扩散项。因此 Δt 可以按 Monaghan^[14] 等提出的理论进行计算:

$$\Delta t = CFL \cdot \min(\Delta t_f, \Delta t_{cv}) \quad (8)$$

$$\Delta t_f = \min(\sqrt{h/|f_a|}) \quad (9)$$

$$\Delta t_{cv} = \min \frac{h}{C_s + \max \left| \frac{h v_{ab} \cdot r_{ab}}{(r_{ab}^2 + \eta_c^2)} \right|} \quad (10)$$

式中, Δt_f 为每单位质量力 $|f_a|$ 的时间步长, Δt_{cv} 为考虑克朗数和粘性控制的时间步长, C_s 为流体的实际声速。

1.2 边界条件

目前, DualSPHysics 中有两种边界处理方法, 一种是动态边界条件 (dynamic boundary condition, DBC), 另一种是周期性边界条件 (periodic boundary condition, PBC)。DBC 边界条件是由 Crespo 等^[15] 提出的, 它与固体动力学边界粒子的运动方程是一致的, 唯一的区别是, 在固态动力学边界上的粒子会保持不动, 或只进行预定的运动 (例如造浪板和浮动结构), 该方法的稳定性依赖于与边界颗粒交互作用的流体微粒的最大瞬间速度。本文将 DBC 边界条件应用于造波板的上游。同时, 采用 PBC 周期边界条件可以解决边界颗粒周围的数值耗散问题^[16], 并从 PBC 特性中求出了该固体颗粒的压力值。

1.3 消波处理方法

DualSPHysics 程序中的消波分为主动式消波以及被动式消波两种。为了消除波浪在传播过程中所产生的反射波的影响以及避免反射波所带来的错误计算结果, 本文在所有需要进行消波处理的工况中, 采用 Active Wave Absorption System(AWAS)主动式吸波方法。主动式吸波方法要根据水动力反馈的反射波的波浪要素控制造波板运动, 如何获得反射波的波浪要素是主动吸波式消波的关键技术之一。该方法是在通过造波板产生入射波的同时吸收与造波板相接触的反射波, 避免反射波的再反射现象与入射波能量叠加从而造成计算结果偏差。其中, 造波板的运动速度表示式为

$$u(t) = \frac{dX}{dt} = \omega [A_m \cos(\omega t) + A_{am} \cos(\omega t + \varphi)] \tag{11}$$

式中, ω 是波浪角频率, A_m 是造波板产生行进波的振幅, A_{am} 是二次反射波的振幅, φ 是相位角。

2 算例验证

本文基于文献[17]对规则波在不同岛礁地形上的波浪变形问题进行数值模拟计算, 并与试验结果进行对比。本文采用的数值水池尺寸为 36 m×0.55 m×0.6 m, 水槽末端放置珊瑚礁盘, 该珊瑚礁盘由 1 : 6 的礁前斜坡与长 9.8 m、高 0.35 m 的水平礁坪组成。采用推板式造波法, 造波板位于距水池前端 0.75 m、距礁面趾 16.35 m 处, 取造波板厚度为 0.05 m, 计算模型示意图如图 1 所示。水槽初始静水位 $d=0.45$ m, 礁坪水深 $h_r=0.1$ m, 初始入射波高为 $H=0.095$ m。在水槽中共设立 12 个浪高仪, 分别对波浪在水槽中传播时各个特殊点的波浪变形情况进行监测, 具体位置如表 1 所示。为了避免波浪反射, 在水池末端采用 AWAS 主动式吸波方法。由图 2 中可知, 本文计算结果与文献^[17] 结果吻合良好, 验证了本文方法对礁冠处波浪破碎问题求解的准确性与可靠性。

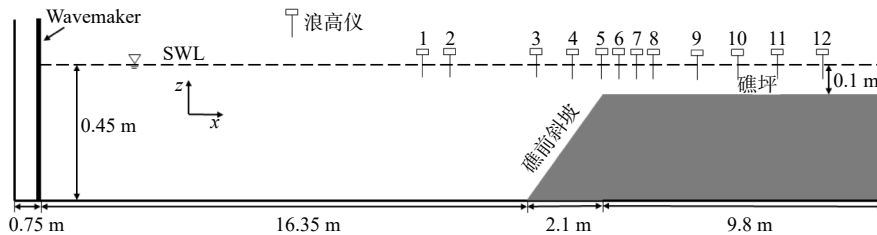


图 1 计算模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the calculation model

表 1 浪高仪 ($G_1 \sim G_{12}$) 距礁面趾距离统计

Tab.1 Statistic distances between wave height gauges and toe of the reef

浪高仪编号	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_9	G_{10}	G_{11}	G_{12}
距礁面趾距离	-4.35	-4.1	0.95	2	2.35	2.65	2.95	3.25	3.65	5.25	6.95	8.75

除此之外, 本文还对不同粒子间距下 SPH 模型在不同监测点(G_2 、 G_3 、 G_5 、 G_7 、 G_9)的表面高程时间曲线与实验值^[17]进行了对比。在数值水池中一共设立了十二个监测点($G_1 \sim G_{12}$), 这里选取的 5 个监测点为岛礁地形中特殊的五个位置, 其中 G_2 为外海监测点, 波浪传播到此处时并未受到太多岛礁地形影响; G_3 为礁面斜坡上的点, 波浪在此处开始沿坡爬升; G_5 为礁缘上的点, 波浪大多在此处发生破碎; G_7 为水平礁坪前端监测点; G_9 为水平礁坪中端监测点。由图 3 可知, 粒子间距为 0.02 和 0.018 的模拟计算情况要更加接近于实验值, 而粒子间距为 0.022 时, 其模拟计算结果明显较实验值更小, 在 G_5 与 G_7 波浪变形处的模拟情况更加明显。由于粒子间距为 0.02 和 0.018 时计算出来的结果相近, 同时考虑到计算机的计算效率, 因此本文选用粒子间距 0.02 进行计算。特殊的是, 相比较于 G_2 点、 G_3 点与 G_9 点, 模拟结果对于 G_5 与 G_7 点的结果略有偏差。这是由于 G_5 与 G_7 测量点位于礁前斜坡上, 波浪在这两个点产生波浪爬升以及波浪破碎的过程较为复杂, 因此会产生一定的误差, 但总的行进趋势不会发生改变。

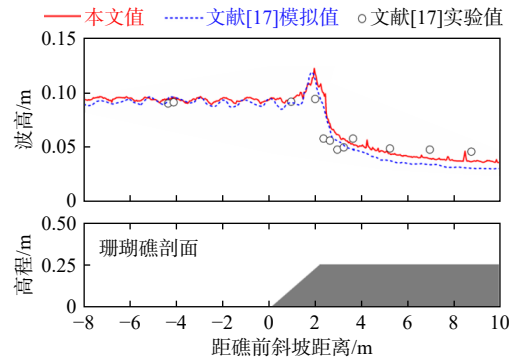


图 2 本文 SPH 模拟结果与文献^[17]结果的对比

Fig.2 Comparison of the SPH simulation results in this paper with the results of the literature^[17]

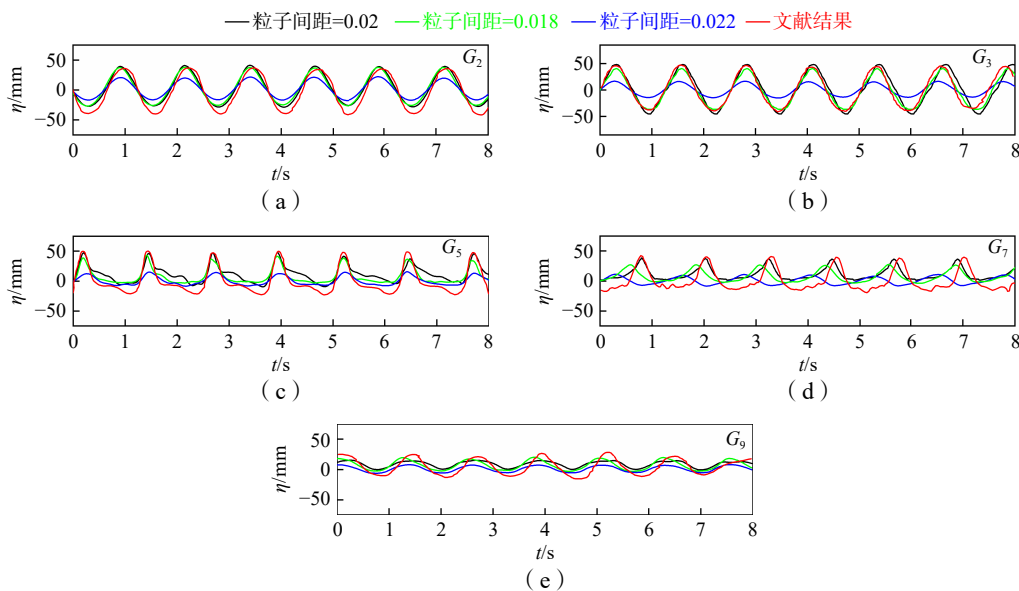


图 3 不同测量点表面高程时间序列与实验值^[17]对比

Fig.3 Comparison of time series of surface elevation simulated at different measurement points with experimental results in the literature

为了进一步验证二维波浪数值水池中 SPH 方法模拟系缆式浮体结构在波浪作用下的运动受力特性, 本文根据文献[18]、[19]中的实验模型, 建立了 SPH 数值模型, 并将计算出来的模拟结果与实验值进行了对比。文献中的试验是一个二维实验, 图 4 为该箱型浮式结构计算简图, 初始静水位为 1 m, 设定计算波高为 0.1 m, 试验中规则波周期设定为 1.1 s、1.2 s、1.4 s、1.6 s 和 1.8 s。水槽正中间放置箱式系缆式浮体结构, 浮箱长为 0.76 m, 宽为 0.5 m, 高为 0.2 m。锚链初始长度为 1.6 m, 刚度为 1.97 kN/m, 两条锚链关于结构对称布置, 两锚点之间的距离为 2.8 m。

本文对浮体在不同周期规则波作用下的浮体动力响应进行了对比, 如图 5 所示, 发现 SPH 数值模拟结果与实验结果吻合良好, 两者之间虽有偏差但并不大, 造成偏差的原因主要是计算时对弹性系缆索

进行了简化。从图 5 可观察到横荡幅值随周期增大而增大,而规则波波浪周期的改变对垂荡影响变化不大,横摇幅值随周期增大而减小。SPH 计算结果与试验数据的误差较小,这表明本文所建立的 SPH 计算模型能够用于进一步的研究和计算。

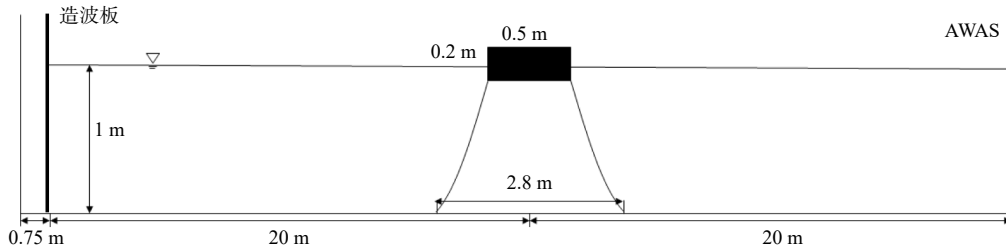


图 4 箱型浮式结构计算简图

Fig.4 Calculation sketch of box-type floating structure

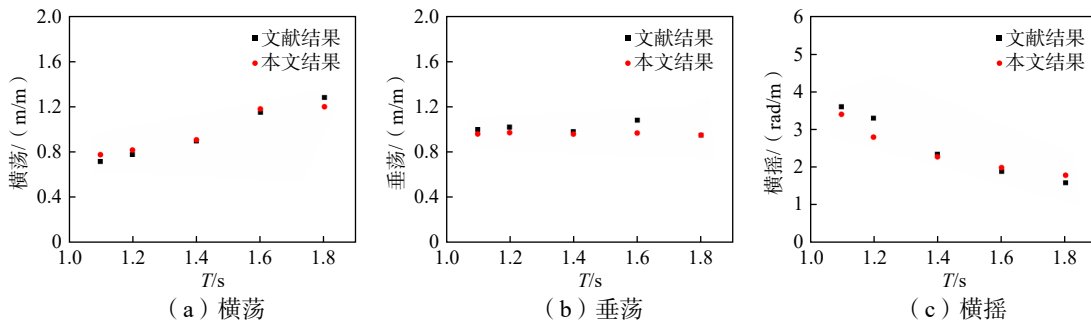


图 5 不同波浪周期浮体动力响应与文献[18]、[19]结果对比

Fig.5 Comparison of floating body dynamic response between results of this paper and the literatures for different wave periods

3 问题描述

基于 SPH 数值模拟方法,对规则波、非规则波在经过浮式结构后沿岛礁的传播情况,以及岛礁地形下不同波浪与系缆式浮式结构相互作用进行了模拟计算,并对计算结果进行了分析。

本文模型在水槽末端布置珊瑚岛礁,该岛礁由 1 : 6 的礁前斜坡与长 9.8 m、高 0.35 m 的水平礁坪组成,系缆式浮体结构布置在岛礁前 1.15 m,两根锚链呈对称性分布,两锚固点之间的距离为 2.8 m,其中一端锚链与礁前斜坡底部相连,具体计算模型详见图 6。系缆式浮体结构形状为箱型,其尺寸大小为 0.76 m×0.5 m×0.2 m(长×宽×高),系缆式浮体结构的相对密度为水密度的一半,质心位置为(0 m, 0 m, 0.4 m),锚链上下两端分别与水池底部和浮体底部连接,锚链与波浪水池底部锚接,锚链的线刚度为 2.31 MPa,锚链直径为 3.656×10^{-3} m,锚链长度 $l=l_{\min}+0.005 18$ m。本文所采用的数值水池尺寸为 40 m×0.8 m×0.5 m(长×宽×高),静水深度 $d=0.5$ m,浮体结构中心位于距造波板 26.35 m 处。本文采用 AWAS 主动式消波,造波板位于距上游边界 0.75 m 处,其厚度固定为 5 倍粒子间距。

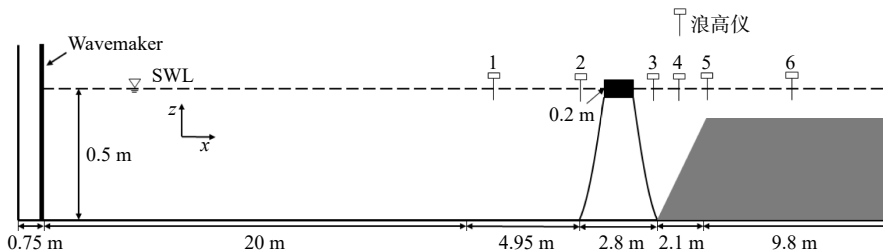


图 6 系缆式浮体结构布置示意图

Fig.6 Schematic diagram of the structure arrangement of moored floating body

基于上述问题,考虑不同波高值($H=0.1\sim 0.18\text{ m}$)与不同波周期($T=1.1\sim 1.8\text{ s}$)工况下的规则波与非规则波经过系缆式浮体结构后,沿岛礁的传播变形情况以及岛礁地形下不同波浪与系缆式浮体结构相互作用的动力响应情况。为了方便描述与分析,预定义一个基本波(Wave0)工况,其具体参数详见表2,非规则波是由波数 $N=1024$ 的线性规则波组成。另外,为了探究不同类型波浪沿岛礁传播变形情况,在数值水池中设立了六个监测点($G_1\sim G_6$),具体位置如表3所示。

表2 基本波况参数统计

Tab.2 Basic wave condition parameters

	周期 T/s	波高 H/m	静水位 d/m	淹没深度 b/m	波数 k/m^{-1}	波长 L/m
规则波	1.1	0.1	0.5	0.1	3.06	2.05
非规则波	1.1	0.1	0.5	0.1	—	—

表3 浪高仪 ($G_1\sim G_6$) 距礁面趾距离统计

Tab.3 Statistic distances between wave height gauges and toe of the reef

测量点	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6
距礁面趾距离	-17.4	-2.8	0	1.1	2.1	7.1

4 结果分析与讨论

4.1 规则波与岛礁环境下系缆式浮式结构相互影响

4.1.1 规则波沿礁体与海岸线垂直的传播与变形

图7给出了规则波沿有系缆式浮式结构的近岸岛礁传播时,不同测量点(G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 、 G_6)波浪的传播变形情况。当入射波高 $H=0.1\text{ m}$, $T=1.1\text{ s}$ 时,如图7(a)所示,当规则波由 G_2 点传播到 G_3 点处时(G_2 为浮式结构前监测点, G_3 为系缆式浮体结构后礁面趾监测点),规则波波浪自由液面下降明显,说明浮式结构对此工况下的规则波影响较大。当消波后的规则波沿岸礁继续传播时,波浪自由液面接近于零,没有出现波浪沿岸礁爬升时在礁缘处的破碎现象。水平岛礁上的各监测点(G_5 与 G_6)处规则波波形接近于无。当波浪周期 $T=1.1\text{ s}$,波高增大至 $H=0.16\text{ m}$ 时,如图7(b)所示,从图中可观察到,波高的增加使得浮式结构前的监测点(G_1 与 G_2)处规则波波形更加明显。当规则波从 G_2 点传播到 G_3 点处时,系缆式浮式结构对波浪影响较大,从礁面趾 G_3 处开始到沿岸礁传播结束,规则波波形几乎消减于零。当波浪波高 $H=0.1\text{ m}$,波周期增大至 $T=1.6\text{ s}$ 时,如图7(c)所示,当规则波沿 G_2 点传播到 G_3 点处时,发现规则波经过浮式结构后在 G_3 点处保留着较明显的波形。相较于 $T=1.1\text{ s}$ 工况,发现浮式结构对长周期波浪阻碍效果较差。规则波在礁前斜坡 G_4 上传播时,由于此时浅化作用波高会变大,波浪在礁缘 G_5 处未出现明显的波浪破碎现象,但较之其他测量点波形呈现前陡后缓的形状。由图7可知,平均水位有所抬升。礁坪上初始淹没程度较小,甚至在未淹没的情况下,波浪会在礁前斜坡上破碎,产生较大的增水。由于浮体结构的作用,未出现明显的波浪破碎现象,但也会使平均水位抬升,其本质上是由礁缘处的漫溢造成的。

4.1.2 规则波作用下岛礁环境浮体结构运动特性变化

图8给出了岛礁环境下系缆式浮体结构动力响应随规则波波高变化的情况。由图8可知,在不同波高的规则波作用下,随着波高的增大,浮体结构的最大垂向位移、最大纵摇角度、最大横荡值均呈现上升趋势。其中最大垂向位移变化幅度最小,最大纵摇角度变化幅度最大。

为了进一步探究波周期对系缆式浮体结构运动的影响,取波高 $H=0.1\text{ m}$ 工况为例。由图9可知,浮体结构的最大横荡位移值随波周期的增大而增大,不同波周期下规则波对系缆式浮体结构最大垂向位移的影响呈现先增后减的变化趋势,对最大纵摇角度的影响则相反。

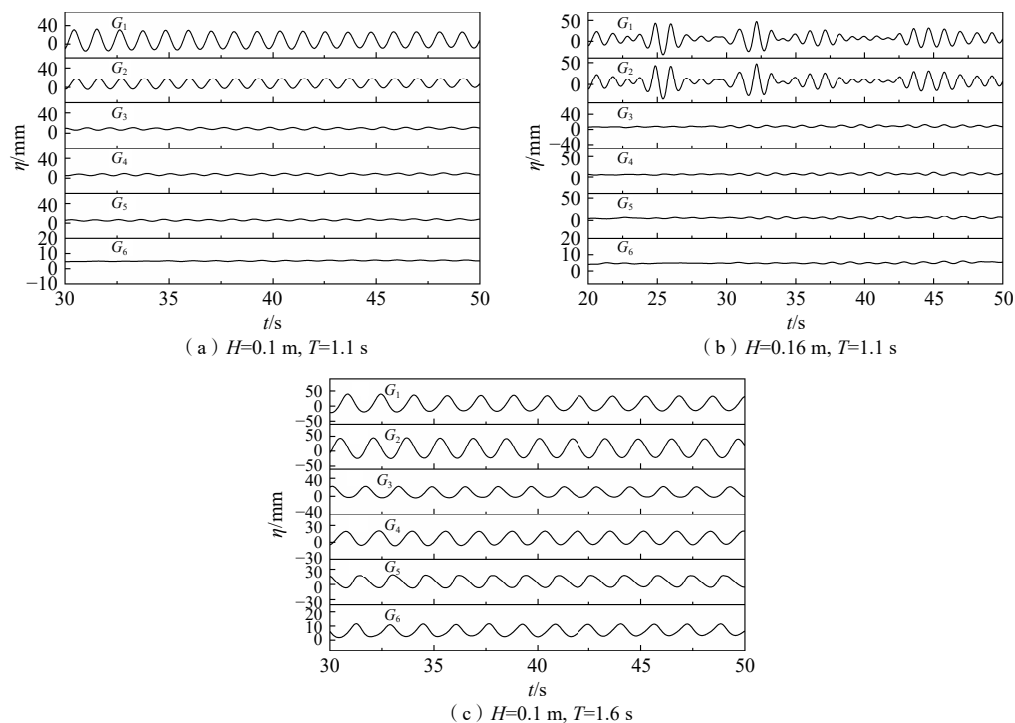


图7 规则波垂直于岸线方向沿礁不同位置自由液面 (η) 的时程曲线

Fig.7 Time profile of regular waves in the direction perpendicular to the shoreline at different locations along the reef

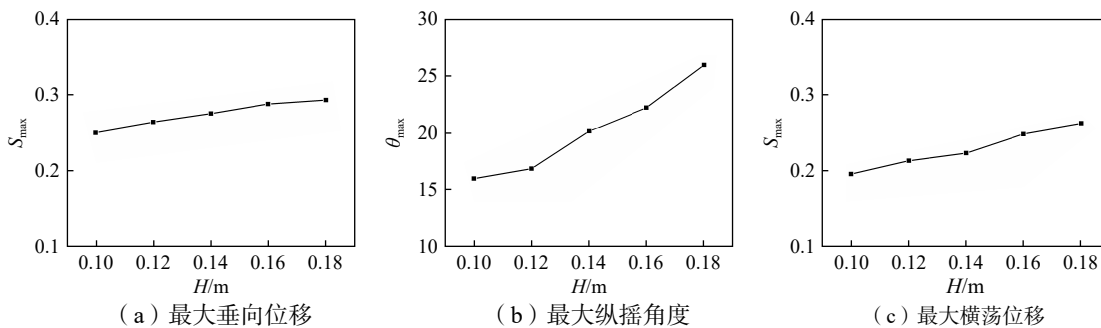


图8 系缆式浮体结构动力响应随不同波高规则波的变化

Fig.8 Variation of dynamic response of moored floating structures with different wave heights of regular waves

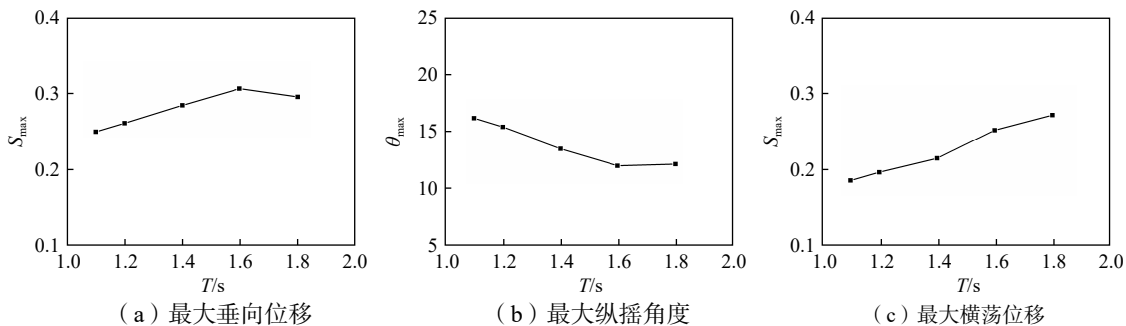


图9 系缆式浮体结构动力响应随不同周期规则波的变化

Fig.9 Variation of the dynamic response of moored floating structures with different wave periods of regular waves

4.2 非规则波与岛礁环境下系缆式浮体结构相互影响

4.2.1 非规则波沿礁体与海岸线垂直的传播与变形

图 10 给出了非规则波沿有系缆式浮体结构的近岸岛礁传播时,不同测量点(G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 、 G_6)波浪的传播变形情况。非规则波在岸礁礁缘处破碎后,波浪波峰会转变成前陡后缓的陡峰状,破碎波在水平礁面传播过程中,波峰变成细陡状且随着波能耗散非规则波中长频波变少、短频波变多。当在岸礁前放置一个系缆式浮体结构时,由于浮体结构对波浪的阻碍作用,使得经过浮体后的波浪沿岸礁传播过程发生了较大的改变。

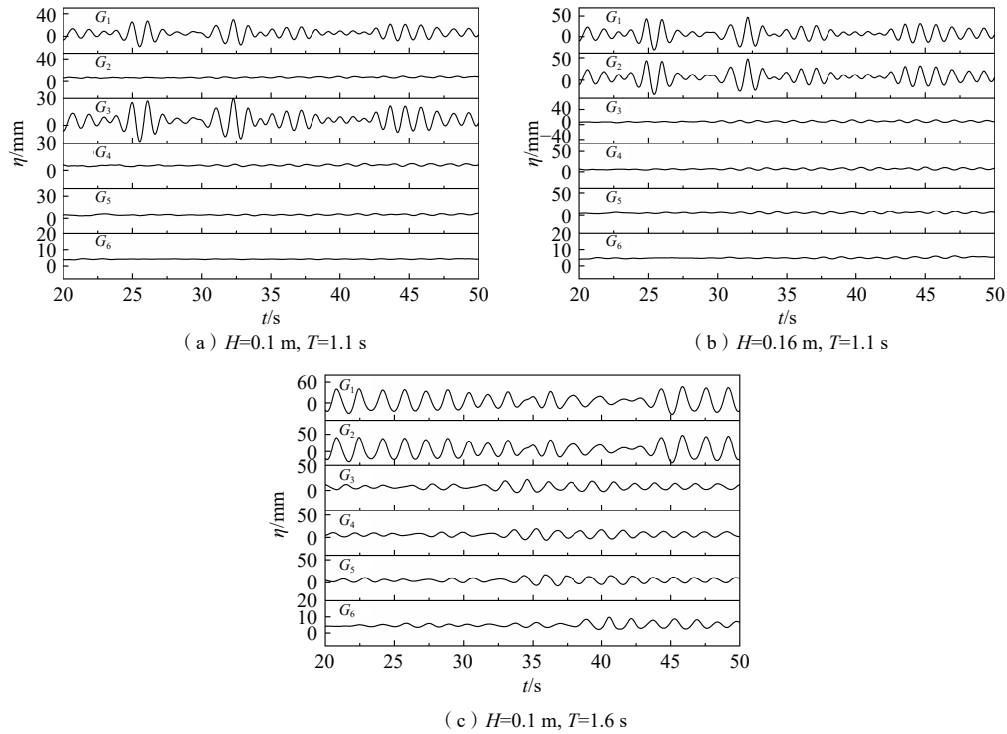


图 10 非规则波垂直于岸线方向沿礁不同位置自由液面 (η) 的时程曲线

Fig.10 Time profile of irregular waves in the direction perpendicular to the shoreline at different locations along the reef

当入射波高 $H=0.1$ m, $T=1.1$ s 时,如图 10(a)所示, G_1 为外海监测点, G_2 为浮式结构前监测点,非规则波在传播到这两个监测点时还保留着完整的 JONSWAP 谱波形,长频波与短频波过渡自然。 G_3 为浮式结构与后礁面趾监测点,当非规则波由 G_2 点传播到 G_3 点处时,非规则波波浪自由液面下降明显,几乎没有完整的非规则波波形存在,表明浮式结构对此工况下的非规则波消浪效果较好。当消波后的非规则波沿岸礁继续传播时,此时波浪自由液面接近于零,没有出现波浪沿岸礁爬升时在礁缘处的破碎现象,水平岛礁上的各监测点(G_5 与 G_6)处自由液面几乎变成水平线。

如图 10(b)所示,保持波浪周期 $T=1.1$ s 不变,增大波高至 $H=0.16$ m,随着波高的增加,浮体结构前的监测点(G_1 与 G_2)处非规则波波形更加明显。当非规则波从 G_2 点传播到 G_3 点处时,浮体结构消浪效果较好,从礁面趾 G_3 处开始到沿岸礁传播结束,非规则波波形几乎消减为零,自由液面几乎成水平直线,表明波高的增大对浮体结构消浪效果影响不大。当 $H=0.1$ m,波周期增大至 $T=1.6$ s 时,如图 10(c)所示,当非规则波沿 G_2 点传播到 G_3 点处时,非规则波在经过浮式结构后在 G_3 点处消浪效果明显,但相较于 $T=1.1$ s 工况,仍保留着较明显的非规则波波形。非规则波在礁前斜坡 G_4 上传播时,由于浅化作用波高会变大。此时,波浪在礁缘 G_5 处未出现明显的波浪破碎现象,破碎波在沿水平礁坪传播时,由于摩擦耗散,自由液面接近于零。

4.2.2 非规则波作用下岛礁环境浮体结构运动特性变化

图 11 给出了岛礁环境下系缆式浮体结构动力响应随非规则波波高变化的情况。从图中可以观察到,不同波高工况下浮体结构最大垂向位移、最大纵摇角度、最大横荡位移值随着波高的增大均呈现出上升的趋势,其中最大垂向位移变化幅度较小。

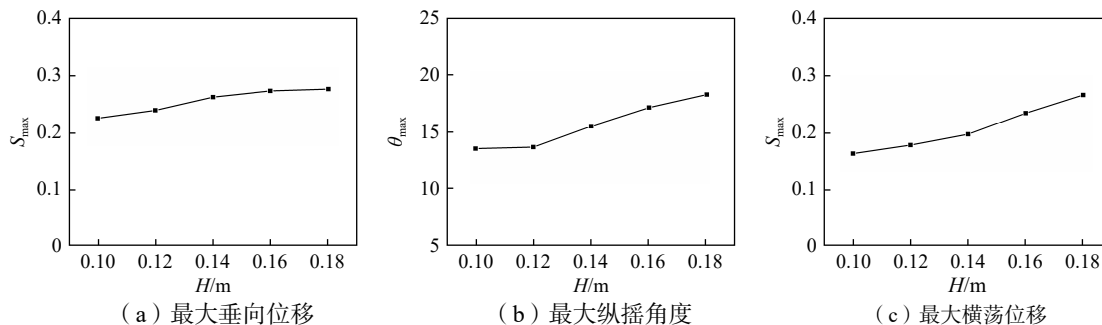


图 11 系缆式浮体结构动力响应随非规则波高的变化

Fig.11 Variation of dynamic responses of moored floating structures with different wave heights of irregular waves

为了进一步探究波周期对系缆式浮体结构运动的影响,取波高 $H=0.1$ m 工况为例。如图 12 所示,在不同周期非规则波作用下。浮体结构最大垂向位移与最大横荡位移值均随波周期的增大而增大,而浮体结构的最大纵摇角度随波浪周期的增大而减小。

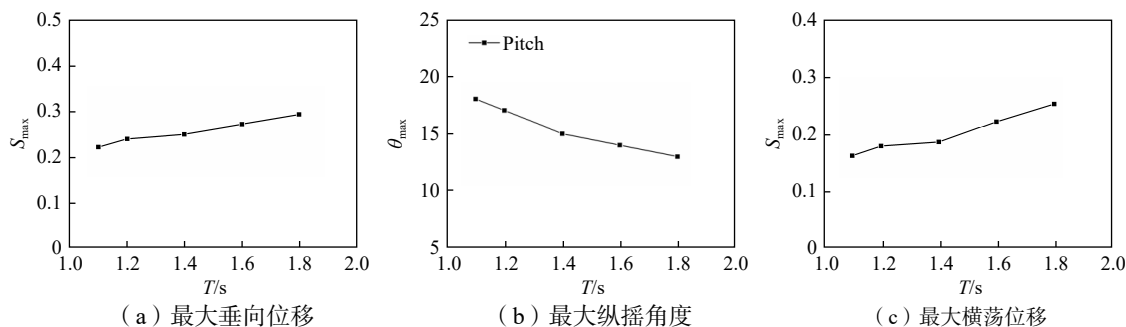


图 12 系缆式浮体结构动力响应随非规则波周期的变化

Fig.12 Variation of the dynamic responses of moored floating structures with different wave periods of irregular waves

5 结 论

本文采用 SPH 方法分别就不同类型的波浪对近岸岛礁环境浮式结构的动力响应进行了研究,探究了不同入射波高与波周期两个波浪参数对波浪传播特性与浮式结构耦合运动的影响,主要结论如下:

(1) 在岛礁前放置系缆式浮式结构,波浪在经过浮式结构的消浪作用后沿着岸礁继续传播时没有出现波浪破碎现象,且礁坪上自由液面接近于零。其次,浮式结构对非规则波的波高衰减效果比规则波的波高衰减效果更好,且波高的变化对浮式结构波高衰减效果影响不大。然而,波浪周期的变化对浮式结构的消浪效果影响较大,浮式结构对长周期波浪的波高衰减效果较差。

(2) 对于规则波,不同波高工况下,浮式结构物的最大垂向位移、最大纵摇角度以及最大横荡位移都随波高的增大呈现增大的趋势。另一方面,随着波周期的增大,浮式结构物的最大垂向位移与最大横荡位移均会增强,然而最大纵摇角度会减弱。

(3) 对于非规则波,波高与波周期对浮式结构动力响应的影响与规则波工况相似,主要区别在于:非规则波对于浮体结构最大垂向位移、最大纵摇角度以及最大横荡位移的影响均小于规则波。另外,与波高相比,波周期的变化影响更为敏感。

参 考 文 献:

- [1] Young I R. Wave transformation on coral reefs[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(C7): 9979–9989.
- [2] 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): 161–193.
- [3] Demirbilek Z, Nwogu O G, Ward D L. Laboratory study of wind effect on runup over fringing reefs[R]. Washington: U S Army Corps of Engineers Washington, 2007.
- [4] Yao Y, Lo E Y M, Huang Z, et al. An experimental study of wave-induced set-up over a horizontal reef with an idealized ridge[C]//International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2009: 383–389.
- [5] 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 S B, Chen S G, Yao Y, et al. Experimental study on the overall physical model of coral reef coastal wave motion characteristics[J]. *Journal of Oceanography*, 2021, 43(5): 110–119.
- [6] Skotner C, Apelt C J. Application of a Boussinesq model for the computation of breaking waves: Part 2: Wave-induced set-down and set-up on a submerged coral reef[J]. *Ocean Engineering*, 1999, 26(10): 927–947.
- [7] Wen H, Ren B. A non-reflective spectral wave maker for SPH modeling of nonlinear wave motion[J]. *Wave Motion*, 2018, 79: 112–128.
- [8] Wen H, Ren B, Zhang X, et al. SPH modeling of wave transformation over a coral reef with seawall[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2019, 145(1): 04018026.
- [9] 任兴月, 陶军, 彭伟. 圆形数值波浪水池斜向和多向入射波浪模拟研究[J]. *海洋工程*, 2018, 36(4): 78–87.
Ren X Y, Tao J, Peng W. Simulation study of oblique and multidirectional incident waves in a circular numerical wave pool[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 36(4): 78–87.
- [10] Song J H, So S H, Lim H C. Dynamic characteristics between waves and a floating cylindrical body connected to a tension-leg mooring cable placed in a simulated offshore environment[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2016, 8: 375–385.
- [11] 朱仁庆, 谢彤, 刘一, 等. 畸形波作用下的浮式结构水弹性响应分析[J]. *船舶力学*, 2022, 26(10): 1473–1484.
Zhu R Q, Xie T, Liu Y, et al. Analysis of hydroelastic response of a floating structure under the action of deformed waves[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(10): 1473–1484.
- [12] 嵇春艳, 孟小峰, 郭建廷, 等. 不同锚泊方式下浮式结构砰击载荷及其运动响应研究[J]. *舰船科学技术*, 2021, 43(11): 95–99+162.
Ji C Y, Meng X F, Guo J T, et al. Study on thumping load and motion response of floating structure under different anchoring methods[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(11): 95–99+162.
- [13] 伏耀华, 张可成, 赵亮, 等. 斜上坡和斜下坡地形条件下浮体波浪载荷的对比分析研究[J]. *船舶力学*, 2022, 26(11): 1657–1667.
Fu Y H, Zhang K C, Zhao L, et al. Comparative analysis of wave loads on floating bodies in uphill and downhill terrain[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(11): 1657–1667.
- [14] Monaghan J J, Kos A. Solitary waves on a Cretan beach[J]. *Journal of Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1999, 125: 145–154.
- [15] Crespo A J C, Gómez-Gesteira M, Dalrymple R A. Boundary conditions generated by dynamic particles in SPH methods[J]. *Computers, Materials and Continua*, 2007, 5: 173–184.
- [16] Gómez-Gesteira M, Rogers B D, Crespo A J C, et al. SPHysics-development of a free-surface fluid solver-Part1: Theory and formulations[J]. *Computers and Geosciences*, 2012, 48: 289–299.
- [17] Yao Y, Huang Z, Monismith S G, et al. 1DH Boussinesq modeling of wave transformation over fringing reefs[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 47(2): 30–42.
- [18] Ji C Y, Cheng Y, Cui J, et al. Hydrodynamic performance of floating breakwaters in long wave regime: An experimental study[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 152: 154–166.
- [19] Ji C Y, Yang K, Cheng Y, et al. Numerical and experimental investigation of interactions between free-surface waves and a floating breakwater with cylindrical-dual/rectangular-single pontoon[J]. *China Ocean Engineering*, 2018, 32(4): 388–399.