研究论文

潜堤上规则波辐射应力的数值研究

穆浩然^{1,2},马小舟^{1,2}*,毛艳军^{1,2},高 翔^{1,2}

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要:在近岸波浪相关研究中,辐射应力是波动在水体中引起的剩余动量流,是波浪运动的重要物理量。在波浪 从深水逐渐传向浅水的过程中,波浪的非线性逐渐增强,甚至会发生破碎等剧烈变形,引起辐射应力的强烈变化, 对次重力波生成等有重要贡献。应用 OpenFOAM 精细模拟波浪在潜堤上的传播,得出波浪运动的详细流场信息, 计算了有波浪破碎情况下潜堤地形上波浪的辐射应力和波浪增减水情况。研究结果表明,在潜堤地形下,辐射应 力值在堤前平底处受波幅变化影响较敏感,波浪完全破碎后其值在堤后坡面处呈增大趋势直至平底处趋于平稳。 辐射应力沿程变化对波浪增减水的影响趋势与波浪增减水方程符合良好。

关键词:波浪辐射应力;波浪增减水;潜堤;OpenFOAM

中图分类号:TV131.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-6647(2021)01-0158-09

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2021.01.016

引用格式: MU H R, MA X Z, MAO Y J, et al. Numerical study of radiation stress on the submerged bars by regular wave[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(1): 158-166. 穆浩然,马小舟,毛艳军,等. 潜堤上规则波辐射应力的数值研究[J]. 海洋科学进展, 2021, 39(1): 158-166.

辐射应力概念最初是由 Longuest-Higgins 和 Stewart^[1]提出并给出了适用于计算微幅波辐射应力值的 简化公式。在近岸波浪的传播运动中,由于海水深度变浅导致了波浪产生严重变形甚至破碎,从而引起辐射 应力的强烈改变,辐射应力变化对沿岸波生流、波浪增水(set-up)、波浪减水(set-down)有着重要影响,也是 低频波浪生成的重要驱动力。Longuest-Higgins 和 Stewart^[2]认为波浪辐射应力的增加将促使波群中自由 长波的释放;Symonds 等^[3]建立了控制方程中含有辐射应力受迫项的碎波拍模型,认为波群中波浪破碎点 前后移动引起辐射应力在时间及空间上的改变产生了低频波浪;Kostense^[4]定性地验证了短波群波浪破碎 点移动导致低频波浪产生的理论。因此,为了更加准确地了解辐射应力这一波浪特性,众多学者通过理论分 析,数值和实验模拟的手段进行辐射应力的计算。对于常水深 Graham^[5]提出用有限差分法计算辐射应力 张量;郑金海和严以新^[6]利用线性波理论研究波浪辐射应力张量随深度变化的分布规律,并给出适用于任意 波向角的辐射应力的表达式;Xia 等^[7]提出了辐射应力垂向剖面的定义和计算公式,并利用斜坡上波生流的 实验结果证明了模型的准确性;Stive 和 Wind^[8]利用实验数据,通过线性外推法近似求得湍流波浪速度剖面 来计算辐射应力沿程变化;温秀媛等^[9]利用改进色散关系的 Boussinesq 方程推导出了全新的辐射应力计算 公式,探究辐射应力对波浪增减水的影响。然而,上述辐射应力计算方法都难以获得碎浪带内详细的流场信 息,并存在着一定程度的条件假设和公式简化,因此计算所得辐射应力结果误差较大。

基于 OpenFOAM^[10]软件开源程序建立数值水槽则是模拟波浪破碎区流场信息的一个较为可行的手段,可以详细研究完整计算域内波浪辐射应力随波浪传播而产生的变化过程。查晶晶和万德成^[11]基于

收稿日期:2020-03-22

资助项目:国家重点研发计划项目——港湾低频振荡精细化预测与港口安全评估技术(2017YFC1404205);中央高校基本科研业务费资助——深海岛礁水动力及港湾震荡研究(DUT18ZD214)

作者简介:穆浩然(1994—),女,硕士研究生,主要从事低频波浪方面研究. E-mail: haoran.mu@qq.com

*通信作者:马小舟(1977—),男,副研究员,博士,主要从事港湾振荡和低频波浪方面研究. E-mail: maxzh@dlut.edu.cn

(王佳实 编辑)

OpenFOAM 软件进行的数值造波实验验证了此数值方法造波和消波方式的可靠性;王东旭等^[12]利用此软件较好地模拟了孤立波在潜礁上的波浪破碎及水跃现象;毛艳军等^[13]应用 OpenFOAM 软件求解了箱式浮式防波堤的水动力性能,并分析了其作为垂荡浮子式波能转换装置的能量转换性能;姚宇等^[14]运用 OpenFOAM 软件模拟孤立波在岛礁地形的传播,数值输出的破碎区内波形及流速与实验结果对比良好;张陈浩和郑茜^[15]利用 OpenFOAM 软件模拟规则波在浅滩上的破碎变形,模拟结果与实验结果相吻合,且输出了能较好体现波浪破碎整体过程的流场信息。

本文拟应用 OpenFOAM 软件来模拟波浪在潜堤地形下的传播破碎,在进行平底水槽线性波的数值模 拟和数值模型模拟波浪的准确性及计算辐射应力方法的有效性验证后,进行规则波在潜堤地形下传播破碎 的模拟研究,在此基础上对辐射应力沿程变化的特点及其对波浪增减水的影响开展了研究,并探讨了平底地 形下辐射应力与波幅偏移量之间的关系。

1 理论基础

1.1 控制方程

本文采用基于 OpenFOAM 软件的造波模块 waves2Foam^[16]开展波浪传播变形的数值模拟。坐标系统为笛卡尔坐标系, *x* 方向为波浪的入射方向, *y* 方向为垂向, *z* 方向为沿水槽的宽度方向,基于不可压缩流体的运动特点,控制方程为:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \boldsymbol{u}}{\partial t} + \nabla \boldsymbol{\cdot} (\rho \boldsymbol{u} \otimes \boldsymbol{u}) = -\nabla p + \nabla \boldsymbol{\cdot} \mu \nabla \boldsymbol{u} - g \boldsymbol{\cdot} \boldsymbol{x} \nabla \rho + \boldsymbol{f}_{\sigma}, \qquad (2)$$

$$\boldsymbol{f}_{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}\boldsymbol{\kappa} \,\, \nabla \! \boldsymbol{\alpha} \,\,, \tag{3}$$

$$\boldsymbol{n} = \frac{\nabla \alpha}{\mid \nabla \alpha \mid},\tag{4}$$

$$\boldsymbol{\kappa} = -\nabla \boldsymbol{\cdot} \boldsymbol{n} \,, \tag{5}$$

式(1)~式(5)中, ρ 为混合流体的密度;u为流体的速度场;t为时间; μ 为动力黏性系数;g为重力加速度; x为位置矢量; f_{σ} 为自由表面的张力; σ 为张力系数; κ 为自由表面的平均曲率;n为界面单位法向量; α 为流体体积分数。

对于自由表面的处理,根据 VOF 法将 2 种流体看作一种混合流体,实现每个单元相界面的追踪,引入相函数:

在求解时,式(2)中的混合流体的密度 ρ 可用液体密度 ρ_1 和 气体密度 ρ_2 表示,动力黏性系数 μ 可用液体黏 性系数 μ_1 和气体黏性系数 μ_2 来表示:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2, \qquad (7)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \, . \tag{8}$$

同时, α 满足输运方程:

$$\frac{D\alpha}{Dt} = \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u) = 0_{\circ}$$
(9)

传统的 VOF 法需要反复地进行自由表面的重构,降低了计算效率,因此 Weller^[17]引入了额外的人工压 缩项来实现对自由水面的精确捕捉,式(9)可变为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \boldsymbol{u}) + \nabla \cdot [\alpha (1-\alpha) \boldsymbol{u}_{c}] = 0, \qquad (10)$$

39 卷

式中:u。为适用于压缩自由面及调整自由面尖锐程度的速度场,新增加的人工压缩项只对界面过渡区起作用,不会影响到周围流场。

1.2 辐射应力公式

将作用于单位面积水柱体的总动量流的时均值减去没有波浪作用时的静水压力定义为波浪辐射应力。 Longest-Higgins 和 Stewart^[18]给出的水平 *x* 方向辐射应力(*S_{xx}*)的定义公式为

$$S_{xx} = \overline{\int_{-h}^{\eta} (p + \rho u^2) dz} - \int_{-h}^{\overline{\eta}} \rho g(\overline{\eta} - z) dz, \qquad (11)$$

式中: u 为质点速度在 x 方向的分量; h 为水深; η 为水面高程; i 为平均水面高程; p 为总压。

对于微幅波,辐射应力计算公式可简化为

$$S_{xx} = E(2n - \frac{1}{2}), \qquad (12)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\operatorname{sh} 2kh}\right). \tag{13}$$

2 模型验证

2.1 波形验证

将模型作用于模拟平底水槽中线性波的传播,其模拟工况为:波高 0.02 m,波周期 2 s,水深 1 m,计算域 长 30 m,高 1.1 m,数值水槽前端和后端各设置 6 m 松弛区(消波),模拟计算时长 30 s,采用自动调整计算时 间步长的方法,设置输出时间步长 Δt = 0.02 s。模型应用 Case1,Case2 和 Case3 三种不同大小的网格设置 来进行敏感性分析,具体网格尺寸见表 1。不同网格尺寸下波面对比如图 1 所示,由图可见,Case1 网格尺度

表 1 不同工况下的网格尺寸

Table 1 Sensitivity analysis of grid size

模拟工况	水平方向网格尺寸/m	垂直方向网格尺寸/m	总网格数/万
Case1	0.030	0.010	11.00
Case2	0.015	0.005	44.00
Case3	0.012	0.004	68.75



图 1 不同网格尺寸下波面变化与解析波面对比

Fig.1 Comparison diagram of wave surface between experimental results and numerical simulation with different grid size

161

下模拟的波浪波峰值明显低于解析结果,由此产生的误差将影响到之后的数值计算,而 Case2 和 Case3 网格 尺度下模拟的波浪则与理论解对应很好。因此,为保证波浪辐射应力计算结果的准确性并且能够节约计算资 源,本文采用 Case2 网格尺寸进行模拟计算。得到了较好的数值模拟结果,其波面与理论波面的运动趋势及波 峰波谷值均吻合较好,误差较小,由此说明本文所用数值模型可以很好地模拟波浪运动。

2.2 辐射应力计算结果验证

将上述工况中数值模拟计算的辐射应力 沿程变化结果与微幅波理论下辐射应力结果 进行比对,对比结果如图 2 所示。由式 12 和 式 13 计算得到微辐波理论下的辐射应力值为 0.470 9 N/m,数值模拟结果中辐射应力值有 较小幅度的振荡,可能是由波浪沿水槽传播过 程中波幅产生微小差异所致,但整体而言,本 模型模拟结果与理论结果对应得较好,说明本 数值模型模拟波浪运动输出的流场、压力场较 准确,辐射应力计算方法也是可行的。



3 潜堤地形下辐射应力计算及波浪增减水模拟

潜堤地形的实验案例采用 Beji 和 Battjes^[19]的实验地形及工况,数值模拟 CaseA 和 CaseB 两种工况下 波浪的传播,并计算辐射应力及波浪增减水的沿程变化情况。本文采用层流模型来进行数值计算,利用相对 较小的网格尺度进行波浪破碎的求解,能够得到较好的波浪模拟结果,且与湍流模型 RANS 相比,层流模型 计算所得的破波区内波浪运动与实际波浪运动更为相似,能更好地模拟出波浪的破碎形态和波浪破碎后波 面的起伏振荡现象,由于篇幅有限,在此不作更多的说明。数值模型布置如图 3 所示,堤顶高度为 0.3 m,波 浪沿水槽正向传播。数值模拟计算域长 40.0 m,前后各设置 8.0 m 松弛区,计算时长为 50 s,CaseA,CaseB 均采用自动调整计算时间步长的方法,输出时间步长分别为 $\Delta t = 0.02$ s, $\Delta t = 0.025$ s。总网格量均为 80 万, *x* 方向网格尺寸为 0.01 m, v 方向网格尺寸为 0.002 5 m。数值模拟实验工况如表 2 所示。



图 3 潜堤地形布置(m)

Fig.3 Layout of the submerged bars (m)

表 2 潜堤地形实验工况列表

Table 2 List of experimental cases of submerged bars topography

工况	波高 H/m	波周期 T/s	水深 h/m	波浪破碎类型
CaseA	0.041	2.500	0.4	崩破波
CaseB	0.054	2.525	0.4	卷破波

3.1 波形对比

当波浪传播到潜堤前坡坡顶位置时,非线性效应达到最大,波浪发生明显的破碎。将堤顶 G2,G3 和 G4 三处波面的时间变化曲线与实验结果对比,结果见图 4,可以看出,在波浪初破阶段,CaseA 和 CaseB 工况的 G2,G3 处数模波峰波谷值与实验结果对应较好;在波浪完全破碎后(G4),2 个工况的数值模拟计算结果均 出现了低估峰值和谷值的现象。但是数值模拟的两工况的整体运动趋势,特别是破碎后波浪振荡趋势与实 验现象基本一致,说明该数值模型可以较好地反映实验中波浪破碎后的实际运动,模拟的波浪破碎具有较大 的可信度。图 5 给出了潜堤堤顶位置(24~26 m 处)波浪破碎时的流场信息,可以清楚地看到,当破碎发生时,



图 4 CaseA 和 CaseB 两种工况下 G2、G3、G4 处波面对比 Fig.4 Comparison of wave surface at G2,G3 and G4 under CaseA and CaseB



Fig.5 The flow field distribution at the top of the dam under CaseA

破碎点周围水质点的速度方向均指向破碎点处,越靠近破碎点的水质点速度值越大,在破碎波面处水质点运动最为剧烈,速度值达到最大。而距离破碎点较远的流场中,水质点速度较小,水体流动较为温和,但是受前一破碎波浪的影响,水体中水质点移动较为混乱,方向具有不确定性,这与波浪运动的实际情况较为符合,因此本数值方法计算所得流场信息较为可信。

3.2 辐射应力与波浪增减水

当波浪传播到潜堤区域时,会发生浅水变形并最终产生破碎,继而波高骤降,波浪动量减小,辐射应力将沿程发生变化,进而影响平均水平面的改变,这一波浪平均水平面的变化便称为波浪的增减水。当规则波沿 *x* 方向正向入射时,依据波浪增减水方程可知:

$$\frac{\mathrm{d}S_{xx}}{\mathrm{d}x} = -\rho g \left(h + \bar{\eta}\right) \frac{\mathrm{d}\bar{\eta}}{\mathrm{d}x},\tag{14}$$

当辐射应力 (S_{xx}) 沿程增长,即 $\frac{dS_{xx}}{dx} > 0$ 时,则 $\frac{d\overline{\eta}}{dx} < 0$,波浪将产生减水现象;当辐射应力沿程降低,即 $\frac{dS_{xx}}{dx} < 0$ 时,则 $\frac{d\overline{\eta}}{dx} > 0$,波浪将产生增水现象。波浪增减水的值即为波面升高的时均值与静水面位置的差值。本文根据数值模型输出的波面数据,进行周期内时间平均,得到 CaseA 和 CaseB 两个工况下的波浪增减水变化。

图 6 和图 7 给出了潜堤地形下 2 种工况的波浪辐射应力和波浪增减水的沿程变化曲线。2 个工况均能 明显看出,当波浪传播在堤前平底时,辐射应力基本呈稳定值,到潜堤前坡坡底附近其值开始增大,直至堤顶 处达到最大值,随后产生下降的趋势,在潜堤后坡面处由于水深的增加,辐射应力值再次增大,直至堤后平底 水槽处趋于平稳。而波浪增减水的沿程变化趋势恰好与之相反。由于波浪完全破碎,波浪成分不稳定,在堤 后坡面至平底处的辐射应力和平均水平面均有明显震荡,但是整体变化趋势依旧能较好地满足波浪增减水 方程。



另外,在堤前平底处,模型稳定后的辐射应力结果较小,这是由于随着波浪的传播,堤前反射波使波幅随着时间推移产生下沉现象,从而导致辐射应力定义公式中的速度积分项和动压积分项变小,最终导致了辐射应力结果偏低。由图 8 可见,CaseA 工况下 15 m 水槽处波面过程曲线及波幅偏移值随时间变化的曲线,将 波幅偏移值量化为波浪上下幅值之和,并将其进行无量纲化,其中 a 。表示波浪的上幅值,a 。表示波浪的下 幅值。波幅的偏移值在 30 s 后基本达到稳定状态,同时由图 9 可见数值水槽前端平底 15 m 处不同周期内 的波幅偏移值与其对应的辐射应力值关系,较明显地反映出潜堤工况下的平底水槽部分辐射应力结果与对 应周期内波浪幅值的偏移值成正相关,且受波幅变动影响较为敏感,波幅偏移值越小,辐射应力值越低。结 合图 8 和图 9 来看,图 8 中当波浪波幅偏移值达到稳定状态时,其值对应于图 9 中辐射应力值大概为 0.5 N/m处的点,较理论预估值低,而波浪传播初期的波浪偏移值对应的同周期内的辐射应力结果约为3 N/m, 这与理论预估值基本一致,由此可见平底水槽处波浪稳定时辐射应力结果偏低是波幅偏移值变小造成的。 而造成波浪波幅产生振荡的原因还需进一步地分析探讨。



结 语 4

本文应用 OpenFOAM 数值模型模拟有破碎情况下潜堤地形的波浪传播,详细地输出了碎浪区波浪运 动的流场信息,完整地计算了波浪在堤前平底、堤身及堤后平底处整个沿程的辐射应力和波浪增减水变化, 并探究了堤前平底处辐射应力值受波幅偏移值的影响。

结果表明,数值模拟波浪在平底水槽中传播的波形及辐射应力结果与解析结果吻合较好;在含潜堤地形 的水槽中,得到了与实验结果相吻合的破波区波面对比图,并计算输出了整个水槽内包括碎浪带及堤后平底 水槽处的波浪辐射应力变化,发现波浪完全破碎后堤后坡面及平底处辐射应力呈先增大后趋于平稳的趋势, 目堤后平底处较堤前平底处辐射应力值更大。

辐射应力结果与波浪增减水变化趋势在碎浪带内也能较好地对应波浪增减水方程;并且由于波浪反射 造成的波幅的上浮与下沉,会间接导致辐射应力结果的增大与减小,且辐射应力值受波幅偏移值影响较为 敏感。

参考文献(References):

- [1] LONGUET-HIGGINS M S, STEWART R W. Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1960, 8(4): 565-583.
- [2] LONGUET-HIGGINS M S, STEWART R W. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats'[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1962, 13(4): 481-504.
- [3] SYMONDS G, HUNTLEY D A, BOWEN A J. Two-dimensional surf beat: Long wave generation by a time-varying breakpoint[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1982, 87(C1): 492-498.
- [4] KOSTENSE J K. Measurements of surf beat and set-down beneath wave groups[J]. Coastal Engineering, 1985, 1(19): 724-740.

- [5] COPELAND G J M. Practical radiation stress calculations connected with equations of wave propagation[J]. Coastal Engineering, 1985, 9(3): 195-219.
- [6] ZHENG J H, YAN Y X. Vertical variations of wave-induced radiation stress tensor[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2001, 16(2): 246-253. 郑金海, 严以新. 波浪辐射应力张量的垂向变化[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2001, 16(2): 246-253.
- [7] XIA H, XIA Z, ZHU L. Vertical variation in radiation stress and wave-induced current[J]. Coastal Engineering, 2004, 51(4): 309-321.
- [8] STIVE M J, WIND H G. A study of radiation stress and set-up in the nearshore region[J]. Coastal Engineering, 1982, 6(1): 1-25.
- [9] WEN X Y, MA X Z, DONG G H, et al. A numerical method for studying the wave set-up and set-down[J]. China Water Transport, 2009, 9(6): 142-144. 温秀媛, 马小舟, 董国海, 等. 一种波浪增减水的数值研究方法[J]. 中国水运, 2009, 9(6): 142-144.
- [10] GOSMAN A D. Developments in industrial computational fluid dynamics[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1998, 76(2): 153-161.
- [11] ZHA J J, WAN D C. Numerical wave generation and absorption based on OpenFOAM[J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(3): 1-12.
 查晶晶,万德成.用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波[J]. 海洋工程, 2011, 29(3): 1-12.
- [12] WANG D X, SUN J W, GUI J S, et al. Numerical simulation of solitary wave transformation over reef profile based on InterDyMFoam. 王东旭,孙家文,桂劲松,等. 基于 InterDyMFoam 的潜礁孤立波传播数值模拟[J]. 海洋工程, 2018, 36(2): 47-55.
- [13] MAO Y J, MA Z, CHENG Y, et al. Effect of the PTO damping force on the wave damping performance and wave capture efficiency of a WEC-type breakwater[J]. Coastal Engineering, 2019, 37(4): 45-53. 毛艳军,马哲,程勇,等. 动力输出系统(PTO)对集成波能转换装 置式防波堤消波性能及波能捕获率影响研究[J]. 海洋工程, 2019, 37(4): 45-53.
- [14] YAO Y, HE W R, LI Y, et al. Numerical investigation of solitary wave transformation over reef islands based on Naiver-Stokes equations[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(2): 392-398. 姚宇,何文润,李宇,等. 基于 Navier-Stokes 方程珊瑚岛礁 附近孤立波传播变形数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(2): 392-398.
- [15] ZHANG C H, ZHENG Q. Simulation of gas-liquid two-phase flow coupling in wave surf zone in shallow water based on OpenFOAM[J]. Port & Waterway Engineering, 2018, 548: 38-42. 张陈浩, 郑茜. 基于 OpenFOAM 的浅滩波浪破碎区气液两相流耦合模拟[J]. 水运工程, 2018, 548: 38-42.
- [16] JACOBSEN N G, FUHRMAN D R, et al. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam @[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2012, 70(9): 1073-1088.
- [17] WELLER H G, A new approach to VOF-based interface capturing methods for incompressible and compressible flow[EB/OL]. (2008-01)[2020-03-22]. https://doi.org/10.1103/PhysRev.72.433.
- [18] LONGUET-HIGGINS M S, STEWART R W. Radiation stresses in water waves: a physical discussion, with applications[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1964, 11(4): 529-562.
- [19] BEJI S, BATTJES J A. Experimental investigation of wave propagation over a bar[J]. Coastal Engineering, 1993, 19(1-2): 151-162.

Numerical Study of Radiation Stress on the Submerged Bars by Regular Wave

MU Hao-ran^{1,2}, MA Xiao-zhou^{1,2}, MAO Yan-jun^{1,2}, GAO Xiang^{1,2}

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian 116024, China)

Abstract: In the study of nearshore wave, the radiation stress is an important physical quantity which is an excess momentum flow caused by waves. As waves transfer from deep water to shallow water, the nonlinearity of wave increases gradually and waves are deformed or even broken. This will cause strong shift in radiation stress and make significant contributions to the generation of infragravity wave. In this paper, OpenFOAM is used to fine simulate the propagation of waves on the submerged bars. In the case of breaking waves, the detailed flow field information of wave motion is obtained. Besides, the radiation stress and the wave set-up and set-down on the submerged bars terrain are calculated. Numerical results show that the radiation stress value is quite sensitive to the wave amplitude shift at the flat bottom before the submerged bars. When the wave is completely broken, the value of radiation stress increases at the back submerged-bars slope and then it tends to level off at the flat bottom behind the submerged bars. The effect of variation trend of radiation stress along the way on the wave set-up and set-down is in good agreement with the wave set-up and set-down equation.

Key words: wave radiation stress; wave set-up and set-down; submerged bars; OpenFOAM Received: March 22, 2020