礁坪上波浪传播的数值模拟

何栋彬1，房克照1，孙家文1,2

(1. 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；2. 国家海洋环境监测中心，辽宁 大连 116023)

摘 要：本文基于具备间断捕捉能力的二阶全非线性Boussinesq数值模型，对规则波和随机波在礁坪地形上的传播变形进行了数值模拟。该模型采用高阶有限体积法和有限差分方法求解守恒格式的控制方程，将波浪破碎视为间断，同时采用静态重构技术处理了海岸动边界问题。重点针对礁坪上波浪传播过程中的波高空间分布和沿程衰减，礁坪上的平均水位变化，以及波浪能量频谱的移动和空间差异等典型水动力现象开展数值计算。将数值结果与实验结果对比，两者吻合情况良好，验证了模型具有良好的稳定性，具备模拟破碎波浪和海-岸动边界的能力，能较为准确地模拟波浪在礁坪地形上的传播过程中发生的各种水动力现象。

关键词：Boussinesq方程；礁坪；低频波浪；波浪破碎；数值模拟

中图分类号:O353.2 文献标识码:A

Simulation of Wave Propagation over Reef Flats

He Dong-bin1, FANG Ke-zhao1, SUN Jia-wen1,2

(1. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. National Marine Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Dalian 116023, China)

**Abstract:** This paper describes the simulation of propagation and deformation of regular wave and irregular wave over reef flats, with a shock-capturing numerical model based on second-order fully nonlinear Boussinesq equations. A hybrid high-order finite-volume and finite-difference method is used to solve conservative governing equations. Wave breaking is treated as shock waves and the hydrostatic construction technique is used for wet-dry fronts. In this paper, research on wave height spatial distribution, mean water level changes over reef flat and wave energy spectrum shifts was presented. The numerical results are in close agreement with the physical model experimental results, showing that the numerical model used in this paper has good stability, excellent shock-capturing ability and can treat wet-dry moving boundary. Therefore, this model can well simulate hydrodynamics performance in the process of wave propagation over reef flats.

**Key words:** Boussinesq equations; reef flat; infragravity waves; wave breaking; numerical simulation

我国海域辽阔，近海及深远海分布众多岛礁。不同于通常的海岸地形，岛礁往往突兀于水中，其周边坡度陡峭，水深变化剧烈，波浪在岛礁地形上的传播变形与近岸的波浪水动力过程有明显的不同[1]。随着岛礁开发建设和生态环境保护需求的日益增加，诸多学者针对岛礁地形上的波浪水动力开展了研究，包括现场观测[2]、开展物理模型实验[3-6]以及数值计算[7-11]。

岛礁地形上波浪传播变形的数值计算是非常具有挑战性的工作，这是由岛礁的独特地貌特征及其引起的特殊水动力现象所决定的。外海波浪入射至岛礁海域，由于礁前斜坡比较陡峭和礁冠处水深急剧变浅，波浪发生剧烈破碎，礁坪上水深很浅且粗糙度极高，导致波浪能量在礁坪上急剧衰减。礁坪上波高的急剧衰减，导致辐射应力梯度发生变化，引起礁坪上平均水面的上升，即礁坪增水。由于礁坪上水深很浅，增水不容忽视，其值甚至与水深相当。Musk和Sargent[12]在太平洋的Bikini环礁进行的野外考察显示，礁坪上的平均海面要比周围大洋的平均海面高出0.45m到0.6m。另外，由于破碎剧烈，波浪在礁坪上的传播过程中能量频率发生明显的转移，入射波谱峰频率处能量中的绝大部分在到达礁冠时已经损失掉，礁坪上低频波浪运动明显，波浪能量频率分布集中在0.1Hz以下。此外，在地形变化剧烈的岛礁海域，波浪破碎和礁坪上流动状态转化都十分剧烈，容易形成类似水跃（或者激波）的潮涌[13]，具有极其陡峭的波前。在出水岛礁或者潮位变化较大的礁坪-泻湖区域，水-陆交界位置随时间变动，动边界问题突出。针对上述诸多水动力现象进行数值计算，要求模型具备模拟强非线性波浪运动、波浪破碎以及高-低频波浪间非线性作用和水-陆动边界等能力，同时也要具备较好的稳定性。

海岸工程常用的两类模型为相位平均模型和相位识别模型。有些学者使用波浪平均模型，如SWAN等来计算岛礁上的波浪增水[7, 8, 14-16]，该类模型基于带有辐射应力的空间梯度引起的强迫项的浅水方程，但无法考虑波-波非线性作用，不能准确地模拟礁坪上低频波浪的产生和运动。相位识别模型以Boussinesq类模型为代表，此类模型被广泛用于模拟波浪从外海到破波带完整的传播演变过程[17-19]，一些学者将这类模型用于岛礁地形上的水动力计算。Skotner和Apelt[20]研究了规则波在具有陡峭礁前斜坡的淹没珊瑚礁上传播过程中的平均水位变化，Nwogu和Demirbilek[21]使用Boussinesq波浪模型再现了岛礁上波浪传播的复杂变化过程，提出礁坪上破碎波高和波浪增水与一个半经验系数相关，同时分析了波浪频谱的空间变化。Yao[22]基于一维全非线性Boussinesq方程，分析了礁脊对波浪传播的影响，并研究了礁前斜坡坡度及剖面形状对波高变化和平均水位的影响。近些年兴起的具备间断捕捉能力的Boussinesq类数值模型[10, 13, 23, 24]较传统的基于有限差分方法求解的同类模型具备更好的稳定性和处理波浪破碎与海岸动边界的能力，具备计算岛礁区域水动力的潜质。

Fang等[11]建立的二维Boussineq数值模型采用有限体积和有限差分方法求解，具备间断捕捉能力，成功用于模拟孤立波在岛礁地形上的传播。本文使用该模型，研究了规则波和随机波浪在典型礁坪地形上传播过程，分析破碎点前后的波高和平均水位变化，以及随机波在传播过程中发生的频率转移。通过与物理模型实验和其它同类模型的结果对比，考察模型用于岛礁区域波浪传播数值模拟能力，并结合数值计算结果分析岛礁地形上的水动力特性。

1. 基于高阶Boussinesq水波方程的数值模型
   1. 守恒形式控制方程

本模型采用高阶Boussinesq方程作为控制方程，具有二阶全非线性特征，守恒形式的控制方程可以表达成如下形式：

(1.1)



式中，为变量矢量，和为通量矢量，如下所示：



(1.2)



式（1.2）中：

(1.3)



(1.4)



其中，和分别为和方向水深平均速度，为水位，为水底高程，*η*为波面升高，*h*为静水深，表示总体水深，。参数用于优化色散性和变浅作用性能，本文取。



式（1.1）中为源项，包括水底坡度项、水底摩擦项***S****f*和色散项，表达式如下：



(1.5)



上式中上标和表示变量在和方向的分量，其中水底摩擦项由以下表达式计算：



(1.6)



其中，为摩阻系数，可由曼宁系数表达：。式（1.5）中色散项给出如下：



(1.7)



(1.8)



式（1.7）和（1.8）中，为水深平均速度矢量，另外有，，。



* 1. 数值格式和边界条件

关于数值模型的具体求解过程以及边界条件和破碎波浪的处理，请参考文献[11]，本文仅给出大致流程。

在矩形网格系统上，采用具有总变差减小TVD(Total Variation Diminishing) 性质的有限体积-有限差分混合格式求解Boussinesq水波方程，利用高分辨率有限体积方法求解对流项而其它项仍然通过有限差分方法计算。数值通量的计算采用兼具中心格式简单性和迎风格式准确性的新型数值格式——MUSTA（Multi-Stage）格式。时间积分通过三阶Runge-Kutta方法进行，时间步长满足CFL稳定性条件限制。

本文计算涉及规则波和随机波，全部采用域内造波方式，通过在质量方程中添加源项实现。对于水-陆动边界的处理，通过在状态重构过程中采用Sampson[25]提出的静压重构技术实现，将水-陆动边界附近的海床视为随时间做微小变动的，通过在计算过程中对海床的调整达到较准确地捕捉水-陆动边界的目的。与常用的薄层水体法相比，该方法具有更高的精度，且保证了重构水深的非负性和水-陆动边界处的和谐性，这对计算的稳定性和精度非常重要。

模型将破碎波作为间断波（或水跃）处理，对于任意网格单元，当波高和水深比时或者波面倾斜角（，为临界波面坡度）时认为波浪发生破碎，此时，控制方程中的色散项不参加运算，控制方程退化为完全非线性浅水方程，破碎波浪自动通过浅水方程捕捉为间断波（或者水跃）。当减少到满足时，色散项才能重新被激活。



1. 礁坪上波浪传播的数值模拟
   1. 规则波在简单礁坪上的传播

参考Yao的物理模型实验[22]，本文模拟了规则波在一维简单礁坪上的传播，数值实验设置如图 1所示。这里地形区分为两种，即无礁冠情况和有礁冠情况，其余设置相同。礁坪前水深*h*0=0.45*m*，礁坪上水深*hr*=0.1*m*。计算域全长45*m*，礁前斜坡投影长度*b*=2.1*m*，*L3*=9.8*m*，造波源位置距离坡脚16.35*m*。两端设置海绵层，其中*W1*=6.0*m*，*W2*=6.75*m*。规则波波高*H*=0.095*m*，周期*T*=1.25s。空间步长0.03*m*，*CFL*数取0.25，曼宁系数取0.033。

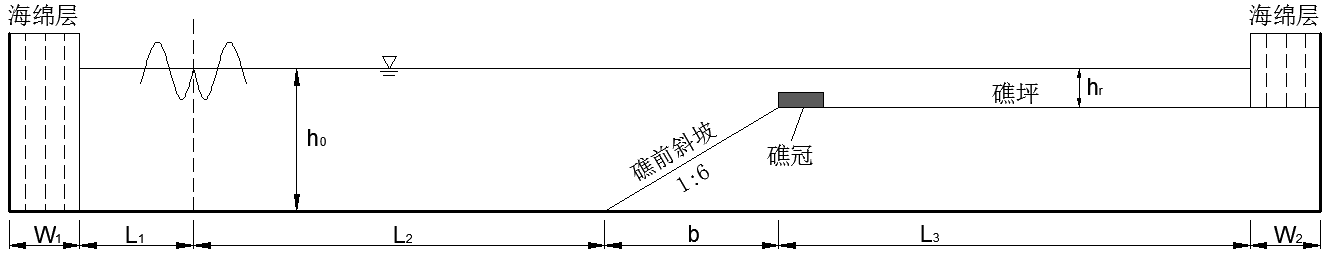


图 1规则波实验布置示意图

Fig. 1. Schematic view of computation domain setup for regular wave.



图 2 规则波实验波高和平均水位空间分布（无礁冠）

Fig. 2. Spatial distribution of wave height and mean water level for regular wave (without reef crest).

图 2为规则波在无礁冠礁坪上的波高及平均水位空间分布。将本文的计算结果与物理实验结果进行对比，同时给出Yao等采用一维全非线性Boussinesq方程的计算结果。从图中可以看出，礁坪前方存在明显的驻波现象，波幅略大于入射波波幅，为不完全立波，说明波浪在坡度为1:6的礁前斜坡上发生了比较明显的反射。随着水深在礁前斜坡处骤然减小，波浪浅化效应导致礁坪边缘处的波高明显增大，随后发生破碎，波高在破碎点之后一个波长的距离内下降幅度达到60%，在随后的礁坪段上波高仍保持了下降的趋势，但逐渐趋于平缓。与Yao等给出的数值结果相比，本文结果在礁坪前的波高与之吻合的比较好，在礁前斜坡上存在轻微的相位差，在礁坪上本文模型得到的波高要高于Yao，与实验结果更为接近。对于平均水位，礁坪前方存在平均水位下降，礁坪上方出现增水，同时在礁坪上的增水幅度本文结果要略大于Yao等的数值结果，与实验数据更加吻合。



图 3 规则波实验平均水位和波高空间分布（有礁冠）

Fig. 3. Spatial distribution of wave height and mean water level for irregular wave (with reef crest).

在礁坪边缘设置长0.55m，高0.05m的礁冠，并保持其余地形参数和波浪要素不变，数值模拟结果如图3所示。相比于无礁冠地形，随着水深的减小，波高同样出现了增大，同时在礁坪边缘处的波高基本一致，说明波浪的浅化效应主要还是受礁前斜坡的控制，但波浪的破碎位置出现了向海方向的移动，显然礁冠的存在使得礁坪边缘处水深更小，迫使波浪提前发生破碎。另外，破碎点之后，波高下降更为迅速，在大约半个波长的距离内波高下降幅度可达到70%。对于平均水位的变化，本文模型结果在礁坪前及礁坪上与Yao等的结果基本一致，在礁冠位置的增水要小于Yao等。与无礁冠地形相比，有礁冠时的平均水位变化幅值要更大，原因在于礁冠的存在对礁坪上水体的回流造成了阻碍，即使得礁坪上增水更为明显。

* 1. 随机波浪在复合斜坡礁坪地形上的传播

Demirbilek和Nwogu[21]参考太平洋Guam岛地形设计了物理实验并给出了数值计算结果，本节选取其中的两个工况进行数值模拟。数值计算域地形如图4所示，计算域全长25.0*m*，左端设置海绵层，从左到右依次布置9个测点，其中一号测点与造波位置重合。由于采用实测波面时间序列来计算内部造波的源项从而实现造波，故模型计算时间步长应与之保持一致，取为0.01*s*，空间步长为0.04*m*，曼宁系数取0.02。

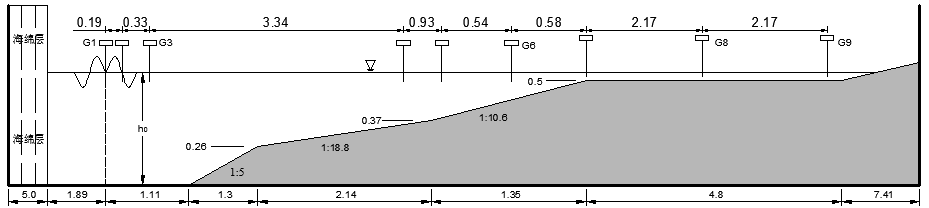


图 4 复合礁坪上随机波实验布置示意图（单位：*m*）

Fig. 4. Schematic view of the computation domain setup for irregular wave (unit: *m*).

所选取的两个工况详细参数见表1。选取的两个工况具有相同的谱峰周期，都满足*kh >* 1，属于短波。其中Test 36对应的礁坪上水深为零，可以考察模型处理海岸水-陆动边界的能力。

表1 随机波对应水位、波浪参数

Table 1. Depth and wave parameters for irregular wave.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验序号 | 波高*Hs*(*cm*) | 谱峰周期*Ts*(*s*) | 礁坪上水深*hr*(*cm*) | 礁坪前水深*h0*(*cm*) |
| 工况36 | 6.8 | 1.5 | 0.0 | 50.0 |
| 工况48 | 7.5 | 1.5 | 3.1 | 53.1 |

截取100s~800s的计算结果进行分析，图5和图6分别给出两种工况下，3、6、8、9四个测点处的波面时间序列的计算结果。对比3号测点处（位于礁坪前）的数据可以看出，两个工况下波高和相位的吻合程度都比较高，表明模型可以准确地再现实验中随机波浪的生成过程。对于6号测点处（位于1:10.6的坡段），两个工况相比之下，工况48的波陡更大，波浪形态更接近破碎，但二者的波面幅值、相位都与实验数据仍保持较高的一致性，说明模型能准确地模拟波浪在复杂礁坪斜坡上的传播。8号和9号测点分别位于礁坪的中端和末端，计算结果变化趋势以及量级与实验数据相近。但由于波浪在礁坪上剧烈破碎，运动极其复杂，模型对水面波动的诸多细节（如相位）的模拟与实验数据存在较大差别。对比两个工况下8，9号测点处的波面可以发现，前者由于礁坪上水深为零，波浪的破碎程度远大于后者，使得波面时间序列中的短波成分损耗殆尽，波面相对平坦。而工况48中波浪破碎并不充分，尚有一部分短波能量存在，表现为波面随时间起伏程度较大。



图 5 工况36随机波波面时间序列

Fig. 5. Time series of free surface elevation for irregular wave Test-36.



图 6 工况48随机波波面时间序列

Fig. 6 Time series of free surface elevation for irregular wave Test-48.

图7和图8给出了两种工况的平均水位和有效波高的空间分布。其中工况48本文同时给出了Demirbilek和Nwogu以及Yao等的计算结果，这两位学者使用的也是Boussinesq类模型。从波高来看，本文两个工况的计算结果与实验采集数据都吻合的比较好，由于工况36在礁前斜坡上的水深更小，破碎点位置相比于工况48也要提前。另外，工况48中本文模型结果在礁坪上的有效波高略低于其它两位学者的结果。从平均水位变化来看，工况36在礁坪上的增水幅度要明显大于工况48，原因在于工况36礁坪上的水深相对较小（初始时刻为零），波浪受到的摩擦阻力更大（从数模角度分析，即是水底摩擦项中的摩阻系数与水深成反比），高频能量损失的更为彻底，低频长波运动更为明显。



图 7 工况36有效波高和平均水位空间分布

Fig. 7. Spatial distribution of wave height and mean water level for Test-36.



图 8 工况48有效波高和平均水位空间分布

Fig. 8. Spatial distribution of wave height and mean water level for Test-48.

需要指出的是，在平均水位变化上，本文模型结果与Demirbilek和Nwogu的数值结果很接近，但都存在一个共同的问题，即礁坪前的平均水位变化很小，水面基本没有发生下降，Demirbilek和Nwogu的数值研究中也存在类似的问题。这是由于平均水面的下沉实则是约束在波群中的一种长波（称之为set down）的运动体现，而随机波波浪组成成分复杂，海绵层阻尼消波技术（每一时间步计算完成后对速度和波面进行衰减）在实施的过程中产生了新的低频长波补充进来，这一低频波浪与礁坪上的海岸低频波浪类似，引发平均水位的上升，从而两相抵消，导致礁坪前平均水位下降很小。



图 8 工况36 测点计算结果与实验数据频谱对比

Fig. 8. Comparison of simulated and experimental wave spectral for Test-36

本文分别分析了上述两种工况的四个测点波面时间序列的能量谱（图8和图9），最为显著的变化即是低频波浪的产生。在传播过程中，高频部分能量消减，在经过礁坪边缘后，入射波谱峰频率附近的能量已损失殆尽，能量逐渐向低频转移，在礁坪上，波浪能量集中在0.1Hz附近。本文所用模型可以准确地模拟出随机波浪在礁坪地形上传播时能量的转移过程。对比两种工况，工况48在礁坪上的高频部分能量显然要多于工况36，对于工况48，礁坪上测点8和9处数值结果的谱峰幅值要小于实验数据，我们认为是因为在工况下，本文所用模型计算得到的这两个测点出的有效波高要略小于实验数据，因此能量偏小，文献[21]中也给出了相类似的结果。



图 9 工况48 测点计算结果与实验数据频谱图

Fig. 9. Comparison of simulated and experimental wave spectral for Test-48

1. 结 语

独特的地貌特征使得岛礁海域的水动力现象复杂，本文基于具备间断捕捉能力的全非线性Boussinesq波浪模型，针对规则波和随机波在岛礁海域的传播过程进行了数值研究。结果表明，对于规则波，模型能准确地模拟出波浪的破碎位置，沿程波高变化以及平均水位变化，包括礁坪前方的减水和礁坪上方的增水，模型给出了与实验数据相一致的结果。对于随机波，本文选用根据实际地形设计的物理实验进行数值模拟，更为贴近真实环境下波浪在岛礁海域的传播变形。计算结果显示模型能较为准确地模拟不规则波浪在复杂礁坪地形上的传播过程，计算结果在波高空间分布、礁坪上的增水上与实验数据吻合程度较高。另外，与规则波不同的是，随机波波浪组成复杂，在礁坪地形上传播过程中波群发生破碎，短波对波群中的set down的约束作用发生急剧变化，使set down从波群冲释放出来形成自由长波，引发礁坪上的低频波浪运动，其中伴随着复杂的波-波相互作用，短波能量损耗并传递给低频波浪。对于随机波在上述传播过程中发生的频谱的移动，能量的转移以及礁坪上低频波浪的产生等水动力现象，在模型的计算结果中得到了比较好的体现，也体现了模型对于这一复杂过程的处理能力。

需要注意的是，在Boussinesq类模型中普遍使用的海绵层消波技术针对随机波的消波性能不理想，甚至会影响离岸区域平均水面的计算精度。

综上所述，可以认为，本文所用的模型可以胜任岛礁区域波浪的模拟，并且可用于开展进一步的岛礁区域水动力特性的研究。

参考文献

[1] 赵子丹, 张庆河, 刘海青. 波浪在珊瑚礁及台阶式地形上的传播[J]. 海洋通报, 1995, (4): 1-10.

[2] 黎满球, 朱良生, 隋世峰. 珊瑚礁坪波浪的衰减特性分析[J]. 海洋工程, 2003, 21(2): 71-75.

[3] 丁军, 田超, 王志东, 等. 近岛礁波浪传播变形模型试验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2015, 30(2): 194-200.

[4] 梅弢, 高峰. 波浪在珊瑚礁坪上传播的水槽试验研究[J]. 水道港口, 2013, 34(1): 13-18.

[5] POMEROY A, LOWE R, SYMONDS G, et al. The dynamics of infragravity wave transformation over a fringing reef [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117(C11022): 1-17.

[6] 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.

[7] TAIT R J. Wave set-up on coral reefs [J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(12): 2207–2211.

[8] MASSEL S R, GOURLAY M R. On the modelling of wave breaking and set-up on coral reefs [J]. Coastal Engineering, 2000, 39(1): 1–27.

[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] FANG K, ZOU Z, DONG P, et al. An efficient shock capturing algorithm to the extended Boussinesq wave equations [J]. Applied Ocean Research, 2013, 43(5): 11-20.

[11] FANG K, LIU Z, ZOU Z. Fully Nonlinear Modeling Wave Transformation over Fringing Reefs Using Shock-Capturing Boussinesq Model [J]. Journal of Coastal Research, 2015, 32(1): 164-171.

[12] MUNK W H, SARGENT M C. Adjustment of Bikini Atoll to ocean waves [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1948, 29(6): 855-860.

[13] ROEBER V, CHEUNG K F. Boussinesq-type model for energetic breaking waves in fringing reef environments [J]. Coastal Engineering, 2012, 70(4): 1-20.

[14] GERRITSEN F. Wave Attenuation and Wave Set-up on a Coastal Reef [J]. American Society of Civil Engineers, 2011: 444-461.

[15] BATTJES J A, JANSSEN J P F. Energy Loss and Set-Up Due to Breaking of Random Waves; proceedings of the Coastal Engineering (1978), F, 2012 [C].

[16] SYMONDS G, BLACK K P, YOUNG I R. Wave-driven flow over shallow reefs [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1995, 100(C2): 2639-2648.

[17] 刘思, 柳淑学, 李金宣. 岛礁地形上二维波浪传播的数值模拟 [J]. 港工技术, 2015, (5): 1-5.

[18] KIRBY J T. Chapter 1 Boussinesq models and applications to nearshore wave propagation, surf zone processes and wave-induced currents [J]. Elsevier Oceanography, 2003, 67(03): 1–41.

[19] MADSEN P A, FUHRMAN D R. High-order Boussinesq-type modeling of nonlinear wave phenomena in deep and shallow water [J]. 2010: 245-285.

[20] SKOTNER C, APELT C J. Application of a Boussinesq model for the computation of breaking waves : Part 1: Development and verification [J]. Ocean Engineering, 1999, 26(10): 905-925.

[21] DEMIRBILEK Z, NWOGU O G. Boussinesq Modeling of Wave Propagation and Runup over Fringing Coral Reefs, Model Evaluation Report [J]. Army Engineer Research & Development, 2007: 07-12.

[22] YAO Y, HUANG Z, MONISMITH S G, et al. 1DH Boussinesq modeling of wave transformation over fringing reefs [J]. Ocean Engineering, 2012, 47: 30-42.

[23] LANNES D, MARCHE F. A new class of fully nonlinear and weakly dispersive Green–Naghdi models for efficient 2 D simulations [J]. Journal of Computational Physics, 2015, 282: 238-268.

[24] KAZOLEA M, DELIS A I, SYNOLAKIS C E. Numerical treatment of wave breaking on unstructured finite volume approximations for extended Boussinesq-type equations [J]. Journal of Computational Physics, 2014, 271(9): 281-305.

[25] SAMPSON J. A 2D shallow flow model for practical dam-break simulation [J]. Journal of Hydraulic Research, 2012, 49(5): 544-545.