近岸波浪数值计算中两种动边界处理的比较

汪鸿1,李训强1,朱首贤2,唐建3,聂屿1

(1. 解放军理工大学气象海洋学院 南京 211101;2. 河海大学海洋学院 南京 210098;3. 海军南海舰队 湛江 524000)

摘要:在近岸波浪数值计算中,动边界处理是不可避免的问题。文章基于 Boussinesq 方程的 FUN-WAVE-TVD 模式,引入窄缝法对波浪水槽实验进行数值模拟,比较窄缝法和干湿网格法的波浪数 值计算结果;设计多种周期和波高的波浪数值试验,分析两种动边界处理下数值计算结果的差异。 结果表明,两种动边界处理对近岸波浪破碎的数值模拟有影响,对波浪漫滩区的计算影响尤为 显著。

关键词:动边界处理;波浪破碎;波浪漫滩;海洋动力学;数值模拟 中图分类号:P731 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-9857(2016)09-0094-05

Comparison of Two Moving Shoreline Handling Method Results in near-Shore Wave Calculation

WANG Hong¹, LI Xunqiang¹, ZHU Shouxian², TANG Jian³, NIE Yu¹

(1. PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China; 2. Institute of marine, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Naval Nanhai fleets of PLA, Zhanjiang 524000, China)

Abstract: Moving shoreline is an inevitable issue in numerical calculation nearing the surf zone. This paper laid slot method to the fully nonlinear Boussinesq model FUNWAVE-TVD to simulate flume experiment, then compared with the numerical result of slot and wet-dry method. Besides, series numerical calculations were designed to analyze the result of two shoreline handling method. The results showed that the impact of moving shoreline on wave shoaling and breaking calculation is obvious close, especially in the calculation of swash zone.

Key words: Moving-shoreline, Wave breaking, Swash, Ocean dynamics, Numerical simulation

1 引言

波浪在由深水向浅水传播过程中,由于水深变 小,波陡不断增大至极限,导致波浪发生倒卷和坍 塌的现象,称为波浪破碎^[1-2]。波浪在破碎后向岸 继续传播时,水陆分界线随波峰向岸推进、随波谷 向海回退,在一个波动周期中滩地出现被海水淹没 和露出水面的过程,称为波浪漫滩^[3]。波浪漫滩的 上界为波浪向岸爬高的最高位置,下界为波浪向海

收稿日期:2016-04-11;修订日期:2016-07-25

基金项目:国家自然科学基金(41206163,41376012,41076048);中央高校基本科研业务费项目(2011B05714,2014B06514).

作者简介:汪鸿,硕士研究生,研究方向为海洋动力学与数值模拟,电子信箱:wanghong_92@126.com

通信作者:李训强,副教授,硕士,研究方向为海洋动力学与数值模拟,电子信箱:lixunqaing@sina.com

回退的最低位置,上界和下界之间的区域称为波浪 漫滩区。随着科学技术的发展,人类对海洋资源的 开发与利用显著增加[4-5],近岸海洋工程的建造与 维护以及人员近岸活动需求也日益增多[6],近岸海 洋活动和工程建筑的安全保障成为较为突出的问 题。近年的很多研究表明,波浪破碎是近岸区域波 浪运动最为剧烈的物理过程,其对波浪预警预报以 及近岸岛礁的船只航行、工程建设和资源补给具有 重要的安全威胁,因而一直受到广泛关注^[7-8]。近 岸波浪破碎带和波浪漫滩对近岸水动力有重要影 响,是近岸泥沙运输的两个峰值区,是海滩泥沙侵 蚀、搬运和地貌演变的重要机制^[9-11]。一些研究表 明,波浪漫滩区的泥沙输运有时可占整个近岸区域 沿岸方向泥沙输运的 50%[12-13]。深入研究近岸波 浪演变有利于提高近岸波浪预警和保障水平,对维 护近岸人员生命财产和国防安全具有重要意义。

数值计算是研究波浪近岸演变的重要手段,目 前主要采用 Boussinesq 方程^[14]和非线性浅水方 程[15]进行近岸波浪的数值模拟研究。该类方程通 过描述波动过程的水质点运动来计算波浪,一般要 求网格步长远小于波长、时间步长远小于波动周 期,计算量庞大,适用于计算小范围、短时间的波浪 运动问题。这类模型在计算过程中,水陆间的动边 界处理是不可避免的问题,有些模型直接忽略近岸 水线的移动,采用在一定水深处设置固壁的方法简 化处理边界移动过程,而更多的波动质点类模型采 用的是干湿网格法[16-17] 和窄缝法[18] 处理波浪数值 模拟过程中的动边界问题。在干湿网格法计算时, 随着水陆交接位置的变化不断更新计算边界,并对 有水区域重新进行网格划分;该方法在计算中需要 不断重新划分网格,机时耗费太大,在重新划分网 格时还容易出现病态的网格。Tao 等^[19]结合实际 海岸中部分水体渗入滩地的情况提出窄缝法以处 理近岸移动边界,假设岸滩内存在水流可以通过的 窄缝,从而将动边界区域转化为始终有水的计算区 域;该方法显著提高计算效率,但是窄缝的存在造 成波浪水体质量和能量的损耗,这些效应对波浪计 算的影响一直备受关注,也有学者做了大量工 作[18]。对两种动边界处理下近岸波浪数值计算的 差异进行研究很有意义但比较少见,本文采用 Boussinesq方程的FUNWAVE-TVD模式,分别引 入窄缝法和干湿网格法,对近岸波浪数值计算结果 进行比较和分析。

2 近岸波浪数值计算的动边界处理

FUNWAVE-TVD模式是美国 Delaware 大学 基于完全非线性 Boussinesq 方程建立的,该模式处 理动边界过程采用的是干湿网格法,对近岸附近的 波浪传播及演变具有较好的模拟效果^[20],但计算机 时耗费较大。对于 FUNWAVE-TVD模式的方程 和处理有不少文献介绍,本文不再赘述^[14]。

窄缝法是目前处理动边界的另一种主要方法, 该方法把整个计算区域作为具有窄缝或可渗透的 海床,把固体海底假设成具有窄缝或渗透边界的活 动型区域,使溢出的水位不会超过海滩高程(图1)。 Madsen 等采用窄缝法对 Carrier 和 Greenspan 的理 论模型进行数值模拟,发现其最大波高与理论解存 在 10%的误差^[21]。





引入窄缝法时,窄缝的控制参数为:

$$oldsymbol{\kappa} = egin{cases} \delta + (1-\delta) \mathrm{e}^{\lambda rac{(\eta-z^*)}{h_z}}, & \eta \leqslant z^* \ 1, & \eta > z^* \ \end{pmatrix} \ & \Lambda = egin{cases} \delta(\eta+h_z) + rac{(1-\delta)h_z}{\lambda} iggl[\mathrm{e}^{\lambda rac{(\eta-z^*)}{h_z}} - \mathrm{e}^{-\lambda} rac{(h_z+z^*)}{h_z} iggr], & \eta \leqslant z^* \ \end{pmatrix} \ & (\eta-z^*) + \delta(z^*+h_z) + rac{(1-\delta)h_z}{\lambda} iggl[1 - \mathrm{e}^{-\lambda} rac{(h_z+z^*)}{h_z} iggr], & \eta > z^* \end{cases}$$

式中:κ为单位宽度上的窄缝宽;δ为最小缝宽;λ为 窄缝的形状参数;h_z为窄缝起始的水深值;Λ为考 虑窄缝影响后的等效水深;η为波面水位。本文引 入窄缝法时,z^{*}取为:

$$z^* = rac{z^s}{1-\delta} + h_z \Big(rac{\delta}{1-\delta} + rac{1}{\lambda} \Big)$$

式中:z^{*}为陆地高程。

3 近岸波浪数值计算结果比较

Hansen 和 Svendsen 设计一组规则波在斜坡地 形上传播的水槽实验^[14]。水槽左边的平底水深为 0.36 m,右侧斜坡坡度为 *Slope*=0.029 2,波浪的入 射波高 H=4.3 cm、周期 T=3.33 s。实验主要测 量波浪在斜坡上浅化传播的波高变化(图 2)。



图 2 数值地形设置

本文采用 FUNWAVE-TVD 模式对 Hansen 和 Svendsen 的波浪水槽实验进行数值模拟,数值模 式的地形配置与波浪水槽实验完全相同。造波源 函数采用双向造波法,造波源左端设置宽为1m的 海绵消波层以实现无反射造波,造波区位于斜坡左 侧 10 m 远处。数值模型的网格距离为 0.025 m× 0.10 m,时间步长为 0.01 s。分别采用窄缝法和干 湿网格法对波浪的动边界进行处理。本文中窄缝 形状过渡参数为 λ =20,窄缝宽度为 δ =0.01 m,窄 缝起始水深为 h_z =0.2 m,干湿网格判断的临界水 深为 0.001 m。模式计算 20 s 后,波面呈现很有规 律的变化,波浪的波高基本保持稳定。

将数值模式稳定后 30 s内平均的波高模拟值 与观测数据比较,窄缝法和干湿网格法条件下的波 高计算结果和实验测量结果如图 3 所示,其中横轴 为不同测点位置的水深,纵轴为各水深处波浪平均 波高,"*"为数值计算的波浪破碎位置。结果表 明,采用窄缝法和干湿网格法对 FUNWAVE 数值 模型模拟波浪破碎的影响不大,即在两种动边界处 理下,模型都能模拟出波浪由于地形浅化作用在近 岸区域发生堆积并破碎的现象。波浪的波陡是波 浪破碎的关键指标,在实验测量数据中波浪破碎处 波陡为 0.029 6,采用干湿网格法和窄缝法计算的破 碎波陡偏小,分别为 0.027 3 和 0.024 5,证明计算 的波浪破碎位置提前。在离岸较远的区域,动边界 处理对波浪波高计算结果影响不大,随着离岸距离 的减小,波高的计算差异逐渐增大,在波浪破碎区 和漫滩区波高模拟的差异尤其显著。与干湿网格 法计算结果比较,采用窄缝法处理动边界下模拟的 破碎位置前移,而破碎波高相对减小,计算的波浪 在破碎区后波高也偏小,这种差异可能是由于窄缝 的存在,在波浪向岸传播过程中首先要填满窄缝, 从而引起水体质量的损失并导致波浪能量的衰减, 使波浪的破碎提前、破碎波高减小。与实验数据比 较,采用窄缝法和干湿网格法计算得到的最大波高 分别减小 0.82 cm 和 0.70 cm,破碎水深分别增大 0.021 m 和 0.007 m;采用干湿网格法计算的破碎 波高和破碎位置与实验观测结果更为符合,但波浪 破碎后的计算波高显著大于实测值。此外,与实验 数据相比,图 3 中 FUNWAVE 模式波高的计算结 果在破碎前偏大而破碎处偏小, Shi^[14]和 Kennedy^[22]在采用 Boussinesq 方程计算波浪破碎时也出 现破碎波高偏小的结果,Shi 在模拟中提出该误差 是由于 Boussinesq 模型的网格数值耗散导致的^[14]。



图 3 两种动边界下波高计算结果

波浪漫滩是近岸波浪运动的小尺度过程,水体 的质量和水质点能量的变化对波浪漫滩过程的影 响更为明显。本文在 FUNWAVE 模式中采用窄缝 法和干湿网格法处理 Hansen 和 Svendsen 实验,分 别计算波浪爬高的最高位置 xh 和回落的最低位置 xh。采用窄缝法和干湿网格法处理动边界,波浪最 高和最低位置时水槽中波浪的瞬时水位如图 4 所 示。可知,采用窄缝法计算的波浪爬高最高位置 xh 相对干湿网格法计算的 xh偏低,而波浪回落最低位 置 xh则相差不大,很明显是由于窄缝的存在,波浪 在向岸爬升过程中水体的损失和能量的耗散导致 的;图 4(a)中,由于窄缝的存在,在斜坡内部仍然存 在较小的水质点波动,对波浪破碎后能量的损耗有 明显作用,这与实际观测是较为相符的。

由于 Hansen 和 Svendsen 的实验中没有对波



图 4 漫滩上下界位置两种边界计算水位分布

浪漫滩区进行观测,本文采用目前工程应用计算规则波爬高最多的 Hunt 经验公式计算 Hansen 实验的爬高位置。Hunt 公式为:

$$R = \left(\frac{1}{(2\pi)^{1/2}}\right) T(gH)^{1/2} \tan\beta$$

式中: R 为波浪爬高的垂直距离; T 和 H 分别为波 浪入射周期和波高; β 为坡度角。

计算 Hansen 实验爬高位置所需的参数易由实 验条件得到。Hunt 公式计算的爬高最大位置 R= 0.237 m,转化为沿波浪传播方向上,波浪爬高区长 为 0.863 m。两种动边界处理得到的漫滩区范围与 Hunt 经验公式结果的比较如表 1 所示,采用窄缝法 和干湿网格法计算的波浪爬高区分别长 0.675 m 和 1.30 m,与 Hunt 公式计算结果相比,波浪爬高 区分别相差 0.188 m 和 0.437 m,以 Hunt 公式计 算结果为准的相对误差分别为 21.78%和 50.64%, 采用窄缝法计算误差更小;结合图 3 中波高的计算 结果,这是干湿网格法在近岸漫滩区附近波高显著 偏大造成的。

表 1 Hansen	实验漫滩区计算比较
------------	-----------

计算力计	计算结果			
1 异刀 伝	爬高区/m	回落区/m		
窄缝法	0.675	0.25		
干湿网格法	1.30	0.20		
Hunt 公式	0.863	无		

4 不同入射条件下动边界处理对波浪漫滩 计算的影响

一般而言,波浪的入射波高和周期对波浪漫滩 区的分布有较大影响。本文通过改变上述实验的 波高和周期,以 Hunt 公式计算的波浪爬高距离为 标准,分别统计窄缝法和干湿网格法处理下不同人 射条件得到的波浪爬高位置,并计算其与 Hunt 公 式计算的爬高距离的相对误差(表 2 和表 3)。由于 Hunt 公式仅能计算波浪爬高位置,本文未讨论两 种动边界处理的波浪回落位置差异。

表 2 入射周期不变(T=3.33 s)的波浪爬高

入射波	爬高位置/m			相对误差/%	
高/cm	Hunt 公式	窄缝法	干湿网格法	窄缝法	干湿网格法
3.3	0.756	0.575	1.075	23.94	42.20
3.8	0.811	0.625	1.200	22.93	47.97
4.3	0.863	0.675	1.300	21.78	50.64
4.8	0.911	0.700	1.425	23.16	56.42
5.3	0.958	0.775	1.625	19.10	69.62

表 3 入射波高不变(H=4.3 cm)的波浪爬高

入射周	爬高位置/m			相对误差/%	
期/s	Hunt 公式	窄缝法	干湿网格法	窄缝法	干湿网格法
2.33	0.604	0.525	0.925	13.08	53.15
2.83	0.733	0.600	0.975	18.14	33.02
3.33	0.863	0.650	1.300	24.68	50.64
3.83	0.992	0.750	1.350	24.40	36.09
4.33	1.121	0.825	1.450	26.40	29.35

表 2 保持波浪入射周期 T=3.33 s 不变,仅改变 波浪入射波高;表 3 保持波浪入射波高 H=4.3 cm 不变,仅改变波浪周期。Hunt 公式计算结果表明, 随着波浪波高和周期的增大,波浪的爬高距离随之 增加,采用窄缝法和干湿网格法都能较好地模拟出 这种变化趋势;由不同入射条件下两种动边界处理 的爬高位置与 Hunt 公式计算结果的相对误差可以 发现,在本文选取的多种波浪入射条件下,采用窄 缝法处理的爬高误差显著小于采用干湿网格法处 理的爬高误差,且窄缝法处理的相对误差保持在 20%左右,而干湿网格法处理的相对误差变化较大。

5 结论

本文采用 FUNWAVE-TVD 模式对 Hansen 水槽实验进行数值模拟,结果表明采用不同动边界 处理对近岸波浪破碎区的计算有较大差异。采用 窄缝法计算的波浪破碎波高偏小且破碎位置相对 前移,该法不仅能减少模型计算机时消耗,而且对 波浪漫滩区计算的准确性也有一定的提高;对多种 入射波高和周期条件下波浪爬高的计算结果进行 比较,结果表明采用窄缝法处理与经验公式的相对 误差更小。在以后的工作中要加强对波浪爬高的 现场观测,通过数值模拟与实测资料的对比,进一 步分析两种动边界处理对近岸波浪数值计算的 影响。

参考文献

- [1] CHEN Qin, KIRBY J T, DALRYMPLE R A, et al. Boussineso modeling of wave transformation, breaking, and runup. II: 2D
 [J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2014,126(1):39-47.
- [2] QIN C, KIRBY J T, DALRYMPLE R A, et al. Boussinesq modeling of longshore currents[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(C11):211-227.
- [3] PULEO J A, BUTT T. The first international workshop on swash-zone processes[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26 (5):556-560.
- [4] 郑崇伟,潘静,孙威,等. 经略 21 世纪海上丝路之海洋环境特征系列研究[J].海洋开发与管理,2015,32(7):4-9.
- [5] 郑崇伟,李训强,高占胜,等.经略21世纪海上丝路之海洋环境 特征:风候统计分析[J].海洋开发与管理,2015,32(8):4-11.
- [6] 郑崇伟,李崇银.中国南海岛礁建设:风力发电、海浪发电[J].
 中国海洋大学学报:自然科学版,2015,46(9):7-14.
- [7] 郑崇伟,潘静,黎鑫,等.1988-2009年中国海及周边海域大浪 频率对 ElNino 的响应[J].海洋通报,2014(2):140-147.
- [8] ABADIE S C, GANDON S, GRILLI R, et al. 3D numerical simulations of waves generated by subaerial mass failures: Application to La Palma case[C]//Proceedings of the 31st International Coastal Engineering Conference. Singapore: World Sci., 2008:1384-1395.
- [9] HORN D P. Measurements and modelling of beach groundwa-

ter flow in the swash-zone: a review[J]. Continental Shelf Research,2006,26(5):622-652.

- [10] MASSELIND G, PULEO J A. Swash-zone morphodynamics[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(5):661-680.
- [11] BROCCHINI M. Integral swash—zone models[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(5):653-660.
- [12] WELLEN E V, BALDOCK T, Chadwick A, et al. STRAND: A Model for Longshore Sediment Transport in the Swash Zone[C]. Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering, Sydney: Coastal Engineering, 2001;3139 -3150.
- [13] Elfrink B,Baldock T. Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone:a review and perspectives[J]. Coastal Engineering,2002,45(3):149-167.
- [14] SHI F,KIRBY J T,HARRIS J C, et al. A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation[J]. Ocean Modelling, 2012, 43-44(2):36-51.
- [15] BROCCHINI M, PEREGRINE D H. Integral flow properties of the swash zone and averaging[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 317(1):241-273.
- [16] 张文静,朱首贤,黄韦艮.卫星遥感资料在湛江港风暴潮漫滩 计算中的应用[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2009, 10(5):501-506.
- [17] 吕新刚,乔方利,夏长水.胶州湾潮汐潮流动边界数值模拟 [J].海洋学报,2008,30(4):21-29.
- [18] 陶建华.波浪在岸滩上的爬高和破碎的数学模拟[J].海洋学报,1984,6(5):692-700.
- [19] TAO Jianhua,LI Qingxue,FALCONER R A, et al. Modelling and assessment ofwaterquality indicators in a semi-enclosed shallow bay[J]. Journal of Hydraulic Research,2001(6):611-617.
- [20] CHOI J, KIRBY J T, YOON S B. Boussinesq modeling of longshore currents in the Sandy Duck experiment under directional random wave conditions [J]. Coastal Engineering, 2015,101:17-34.
- [21] CARRIER G F, GREENSPAN H P. Water waves of finite amplitude on a sloping beach[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1958,4(1):97-109.
- [22] KENNEDY B, CHEN Q, KIRBY J T, et al. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup I:1D[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2002,126(1):39-47.