

波浪漫滩边界对波生流数值计算的影响

汪 鸿¹, 朱首贤^{2*}, 李训强¹, 张文静¹, 聂 屿¹

(1. 解放军理工大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101; 2. 河海大学 海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘 要:波浪漫滩是近岸波浪的小尺度运动,在实际海域的波生流数值计算中通常被忽略。本文基于 Boussinesq 方程的 FUNWAVE 模式,分别采用波浪漫滩边界、固壁边界、海绵边界进行 Haller 波浪港池物理模型实验的数值模拟,比较三种边界计算结果与实验观测数据的误差,检验波浪漫滩边界对波生流数值计算的影响;然后设计了多种周期、波高的波生流数值模拟试验,分析多种波浪入射条件下波浪漫滩边界对近岸波生流数值计算的影响。结果表明,波浪漫滩对邻近区域波生流有明显影响,漫滩边界下的波生流计算结果更接近实验观测值,在近岸波生流数值模型中引入波浪漫滩边界可以提高波生流计算精度。

关键词:波浪漫滩;波生流;Boussinesq 方程;数值模拟

中图分类号:P731

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2017)02-0176-13

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2017.02.003

波生流是波浪驱动的波动平均流动,一般是由波浪空间分布不均匀造成的,对近岸地形的塑造、物质输运等有重要影响^[1]。在海岸的某些突出部分(如岸堤、丁坝等)可能存在非常强烈的波生流,也被称为裂流,它直接危害海岸工程及人类在海滨活动的人身安全^[2]。数值计算是波生流研究和预测的重要手段,目前有两类数值模式可以计算波生流。第一类模式是波动质点运动类型(wave-resolving),主要采用非线性浅水方程^[3]、Boussinesq 方程^[4]或 Navier-Stokes 方程^[5],它们通过描述波动过程的水质点运动来计算波浪,对计算结果的波动平均处理也可以得到波生流。它们要求网格步长远小于波长、时间步长远小于波周期,计算量庞大,一般仅适合小范围区域(几公里以内)、短时间(几小时以内)的数值计算。第二类模式是波动平均类型(wave-averaged),采用波动平均海水运动方程,可以包含风、天文潮、径流、密度流、开边界强迫等物理机制对波动平均流场的影响^[6],也可以引入辐射应力、Stokes 漂流、波浪底摩擦和波浪水滚效应等计算波生流^[7]。它们的网格步长不受波长限制、时间步长不受波周期限制,因此计算量不大,可以用于大范围区域(几公里至几百公里、甚至更大范围)、长时间(几小时至几个月、甚至更长时间)的数值计算。实际海域波动平均流场计算通常采用波动平均类型数值模式。

波浪向海滩传播的过程中,水边线随波峰向岸推进、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,这是波浪漫滩,或者称为波浪爬高、波浪上爬,英文称为“swash”^[8]。波浪漫滩的上界为波浪向岸爬高的最高位置,下界为波浪向海回退的最低位置,上界和下界之间的区域为波浪漫滩区。波浪漫滩区宽度一般为几米至几十米,它是一种小尺度运动^[8]。但是,近年的很多研究表明,波浪漫滩对近岸水动力有重要影响,它与破波带是近岸泥沙输运的两个峰值区,是海滩泥沙侵蚀、搬运和地貌演变的重要机制^[9-11]。在波动质点运动类型数值模式的计算工作中,有些包含了波浪漫滩现象,但是也有很多工作忽略

收稿日期:2016-03-21

资助项目:国家自然科学基金项目——利用变分同化结合正则化方法对非线性潮汐模式参数化的理论分析与数值研究(41206163)和引入波浪漫滩边界的近岸海域悬沙输运数值模式及其应用(41076048);中央高校基本科研业务费项目——卫星遥感海浪反演岛礁水深的初步模型及可行性评估(2011B06514)

作者简介:汪 鸿(1992-),男,江西鹰潭人,硕士研究生,主要从事海洋动力学与数值模拟方面研究.E-mail:wanghong_92@126.com

* **通讯作者:**朱首贤(1972-),男,湖北罗田人,副教授,博士,主要从事海洋动力学与数值模式、河口海岸水沙运动及遥感方面研究.E-mail:zhushouxian@vip.sina.com

(李 燕 编辑)

了波浪漫滩现象,在海滩上采用固壁或海绵边界条件。波浪漫滩区一般小于波动平均流场数值计算的网格尺度,目前实际海域的波动平均流场数值计算还没有考虑波浪漫滩的影响。这个问题引起了部分学者的重视和理论研究。Brocchini 等^[12]建立了波浪漫滩区波动平均的水动力积分方程,将该方程提供的波浪漫滩区沿岸漂流及其下界位置的移速、波动平均流速作为海滩边界条件。朱首贤^①提出了不同的观点,认为波浪漫滩区对邻近区域流场影响的主要机制是质量和动量交换,即波浪漫滩区下界的波动平均质量通量和动量通量作为邻近区域波动平均流场计算的海滩边界条件。杨家轩等^[13]通过数值模拟评估了波浪漫滩边界对邻近区域波浪计算的影响,结果表明引入波浪漫滩边界可以提高波浪计算精度。定量评估波浪漫滩边界对邻近区域波生流计算的影响,对于发展包含波浪漫滩边界的波动平均类型数值模式也是一个很有意义的工作,但是缺乏这方面的研究。本文采用基于 Boussinesq 方程的 FUNWAVE 模式数值模拟波浪漫滩边界对邻近区域波生流的影响。

1 FUNWAVE 模式及其海滩边界处理

FUNWAVE 模式由美国 Delaware 大学研制,采用二阶完全非线性 Boussinesq 方程。本文采用 FUNWAVE2.0 版本,该模式对海滩附近的波浪及波生流有较好的模拟效果^[14-15],模式的控制方程:

$$\begin{aligned} \eta_t + \nabla \cdot \left\{ (h + \eta) [\vec{u}_a + (z_a + \frac{1}{2}(h - \eta) \nabla (\nabla \cdot h \vec{u}_a) + \right. \\ \left. (\frac{1}{2} z_a^2 - \frac{1}{6} (h^2 - h\eta + \eta^2)) \nabla (\nabla \cdot \vec{u}_a)] \right\} = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \vec{u}_{at} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u}_a + g \nabla \eta + z_a \left\{ \frac{1}{2} z_a \nabla (\nabla \cdot \vec{u}_{at} + \nabla (\nabla \cdot (h \vec{u}_{at}))) \right\} + \\ \nabla \left\{ \frac{1}{2} (z_a^2 - \eta^2) (\vec{u}_a \cdot \nabla) (\nabla \cdot \vec{u}_a) + \frac{1}{2} [\nabla \cdot (h \vec{u}_a) + \eta \nabla \cdot \vec{u}_a]^2 \right\} + \\ \nabla \left\{ (z_a - \eta) (\vec{u}_a \cdot \nabla) (\nabla \cdot (h \vec{u}_a)) - \eta \left[\frac{1}{2} \eta \nabla \cdot \vec{u}_{at} + \nabla \cdot (h \vec{u}_{at}) \right] \right\} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

式中, η 是表面高度, h 是静止水深, u_a 是水深为 $z_a = -0.531h$ 处水质点的水平速度矢量, $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 为水平梯度算子, g 为重力加速度, 下标 t 是对时间的偏导。

目前对于海滩水边线移动边界的处理方法主要有干湿网格法^[16-17]和窄缝法^[18], FUNWAVE 模式采用后者。窄缝法把整个计算区域作为具有窄缝或可渗透边界、可流入流出的活动型区域, 将没有水或只有薄层水覆盖的固体底边界替换成可渗透的海床, 或把固体海底假设具有窄缝, 使得溢出的水位不会超过海滩高程^[19], 和干湿网格法相比, 窄缝法不需要在计算中重新划分网格, 对模式的计算效率显著提高, 并且不会出现病态的网格。引入窄缝法时, 式(1)中将出现窄缝控制参数 κ 和 Λ ^[20], 其定义:

$$\kappa = \begin{cases} \delta + (1 + \delta) e^{\lambda \frac{(\eta - z^*)}{h_0}} & \eta \leq z^* \\ 1 & \eta > z^* \end{cases}; \quad (3)$$

$$\Lambda = \begin{cases} \delta(\eta + h_0) + \frac{(1 - \delta)h_0}{\lambda} (e^{\lambda \frac{(\eta - z^*)}{h_0}} - e^{-\lambda \frac{(h_0 + z^*)}{h_0}}) & \eta \leq z^* \\ (\eta - z^*) + \delta(z^* + h_0) + \frac{(1 - \delta)h_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda \frac{(h_0 + z^*)}{h_0}}) & \eta > z^* \end{cases}. \quad (4)$$

式中, κ 是单位宽度海滩上的窄缝宽, δ 是最小缝宽, λ 是窄缝的形状参数, h_0 是窄缝起始的水深值, Λ 是考虑窄缝影响后的等效水深, η 为波面水位。Madsen 等^[21]对 Carrier 和 Greenspan 的理论模型^[20]进行数值模

①朱首贤. 河口海岸-陆架海数值模式、物质长期输运机理和卫星遥感海浪测深研究, 河海大学博士后出站报告, 2012.

拟,发现上式中 z^* 如果取为当地陆地高程,数值模拟的最大波浪爬高与理论解存在 10% 的误差。Kennedy 等^[22]则认为这是因为波浪上爬时首先要填满窄缝,从而引起水体质量的损失。为了减少水体通过窄缝时的质量损失^[23],FUNWAVE 模式中 z^* 表达式为

$$z^* = \frac{z^s}{1-\delta} + h_0 \left(\frac{\delta}{1-\delta} + \frac{1}{\lambda} \right), \quad (5)$$

式中, z^s 为陆地高程。在波浪计算过程中,波浪漫滩还经常被简化处理成固壁边界或海绵边界,FUNWAVE 模式也提供了固壁和海绵边界的数值方法。

2 FUNWAVE 模型对 Haller 波浪港池物理模型实验的模拟检验

Haller 等^[24]在波浪港池中进行了沙坝海岸上波浪和波生流的物理模型实验。实验地形如图 1 所示,港池大小为 18.2 m × 20 m,地形坡度包括 1 : 5 和 1 : 30 两部分,在斜坡上叠加了 3 个沙坝,中间沙坝长度为 7.3 m,两侧沙坝长度为 3.6 m,沙坝之间的沟槽长度为 1.8 m,沙坝和沟槽宽度为 1.2 m,平底水深为 0.373 m,沙坝顶部水深为 0.048 m。入射波为规则波,波高为 4.8 cm,周期为 1 s。在 y 为 1.1, 4.6 和 7.6 m 断面上进行了波高和增水观测,在 x 为 10.00, 11.25, 12.30 和 13.00 m 断面上进行了波生流观测。

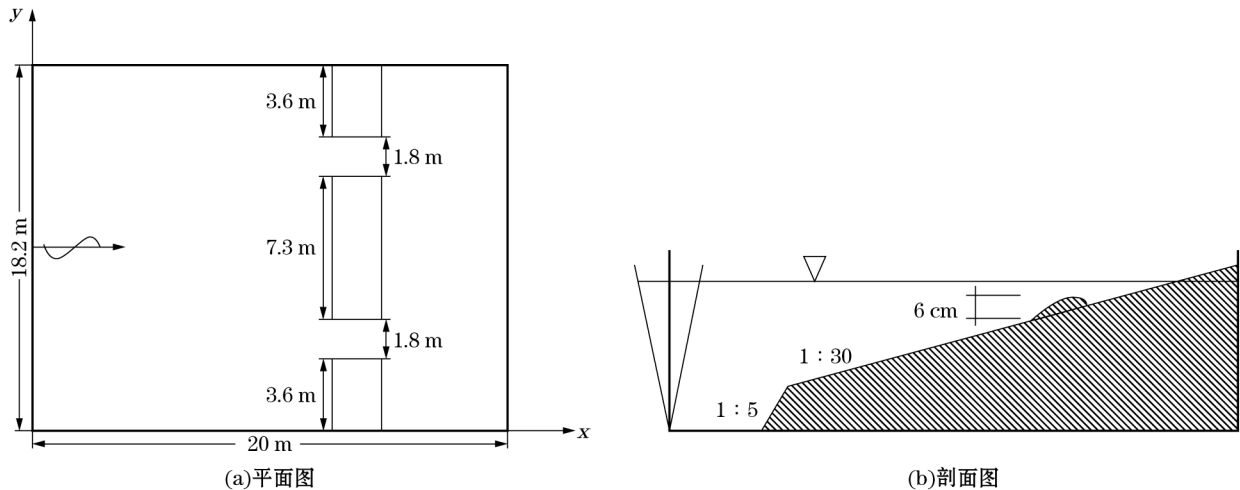


图 1 Haller 物理模型实验的地形设置

Fig.1 Plan and cross-section of Haller harbor experiment

有学者^[25-26]对 Haller 物理模型实验进行了数值模拟。在这些数值模拟中,图 1b 中斜坡地形的坡度简化取为 1 : 30。由于两侧沙坝的地形对称,为了节省计算量,Chen 等^[25]将计算区域宽度取为实际宽度的一半。参考这些研究,本文也取实际区域的一半作为计算域,计算域的地形如图 2a、2b 所示,斜坡地形的坡度统一取为 1 : 30。数值模拟的造波源位于 $x=0$ m 处,造波源左端设置了宽 1.8 m 的造波区,造波函数采用双向造波法,造波区左端设置了海绵消波层实现无反射造波。网格间距为 0.05 m × 0.10 m,时间步长为 0.01 s。为了考虑波浪破碎和混合子网格效应产生的能量耗散,借鉴 Kennedy 等^[22]利用动量混合方程的方法描述浅水区域的波浪破碎,并采用 Smagorinsky 型^[27]混合子网格模型来考虑涡动黏性对波生流流态的影响。将数值模拟波高与观测结果进行比较,对数值模式的相关参数进行了率定,主要参数取值为:波浪破碎起始参数 $\eta_i^l = 0.30 \sqrt{gh}$,破碎终止参数 $\eta_i^r = 0.05 \sqrt{gh}$,破碎时间 $T^* = 5 \sqrt{h/g}$,破碎强度 $\sigma = 1.2$,子网混合效应的侧向混合系数 $C_m = 0.25$,底摩擦系数 $f = 0.006$,窄缝形状过渡参数 $\lambda = 60$,窄缝宽度 $\delta = 0.01$,窄缝起始水深 $h_0 = 0.2$ m。

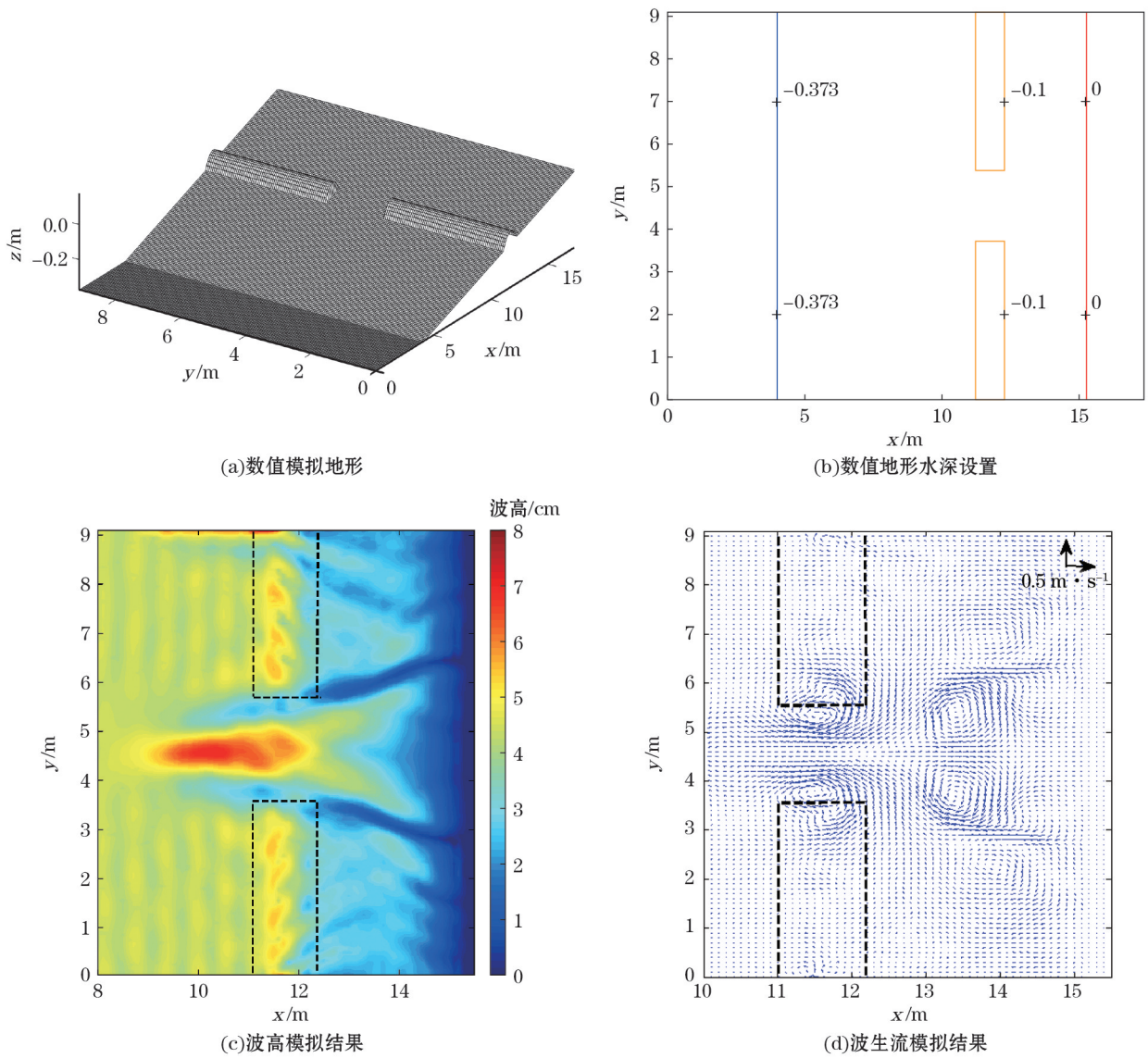


图 2 对 Haller 物理模型实验的数值模拟地形及模拟结果

Fig.2 Topography and numerical results of the Haller harbor experiment

取出 20~200 s 的数值模拟结果分析均方根波高和波生流。图 2c 给出了波高模拟结果。波浪翻越沙坝时由于水深变浅而波高增大,但是翻过沙坝后波高迅速减弱。两个沙坝之间的沟槽是波能聚集区,这也是整个计算域的最大波能区,波高最大值达到 8.59 cm。波能聚集区与沙坝之间存在两个基本对称的弱波能区,波高最小值仅为 2.27 cm。波浪通过沟槽后向两侧绕射,形成高低相间的波高分布。图 2d 给出了波生流模拟结果,波能聚集区内存在两股很强的离岸流,最大离岸流速值达到 0.35 m/s,符合裂流的特征。这两股裂流对应 2 个对称的涡旋。波浪出沟槽后向两侧的绕射区也存在 2 个对称的涡旋。

图 3a,3c,3e 给出了 y 为 1.1,4.6 和 7.6 m 断面上波高的观测值与模拟值,图 3b,3d,3f 给出了这 3 个断面上增水的观测值。 $y=1.1$ m 和 $y=7.6$ m 断面穿过沙坝, $y=4.6$ m 断面穿过沟槽。图 3 也给出了 Chen 等^[25]、房克照等^[26]的波高和增水模拟结果。波高观测结果表明,在 $y=1.1$ m 和 $y=7.6$ m 断面上的波浪翻过沙坝前波高增大、翻过沙坝后波高减小,在 $y=4.6$ m 断面上的波浪在沟槽入口附近波高大、通过波槽出口后波高减小,本文与 Chen 等^[25]、房克照等^[26]都模拟出了这些波高变化过程。增水观测结果表明,沙坝和沟槽左侧的增水基本上为负值,右侧的增水基本上为正值。本文与 Chen 等^[25]、房克照等^[26]也模拟出了这些增水变化过程。对这 3 个断面模拟结果进行误差统计,Chen 等^[25]模拟的波高平均误差为 0.95 cm,增水平均误差为 0.51 mm;房克照等^[26]模拟的波高平均误差为 0.96 cm,增水平均误差为 0.32 mm;本文模拟的波高平均误差为 0.45 cm,增水平均误差为 0.58 mm。图 4 和图 5 分别给出了 x 为 10.0,11.25,12.30 和 13.0 m 断面上波生流 u 、 v 分量的观测值与模拟值,给出了 Chen 等^[25]、房克照等^[26]的数值模拟结果。观测结果表明,在 $x=11.25$ m、 $x=12.30$ m 断面上 $y=4$ m 至 $y=5$ m 区段有比较大的 u 分量变化,在 $x=12.30$ m、 $x=13.0$ m 断面上 $y=2$ m 至 $y=6$ m 区段有比较大的 v 分量变化。本文和 Chen 等^[25]、房克照等^[26]均较好地模拟出这几个显著的波生流变化。Chen 等^[25]模拟波生流 u 和 v 分量的平均误差为 3.60,3.19 cm/s,房克照等^[26]模拟结果的平均误差为 3.78,2.75 cm/s,本文模拟结果的平均误差为 3.81,2.97 cm/s。总得来看,本文对 Haller 物理模型实验的波高、增水、波生流模拟比较成功,与 Chen 等^[25]、房克照等^[26]的模拟精度基本相当。我们也将计算区域取为实际区域进行了数值模拟,其结果与本文基本上没有差别。

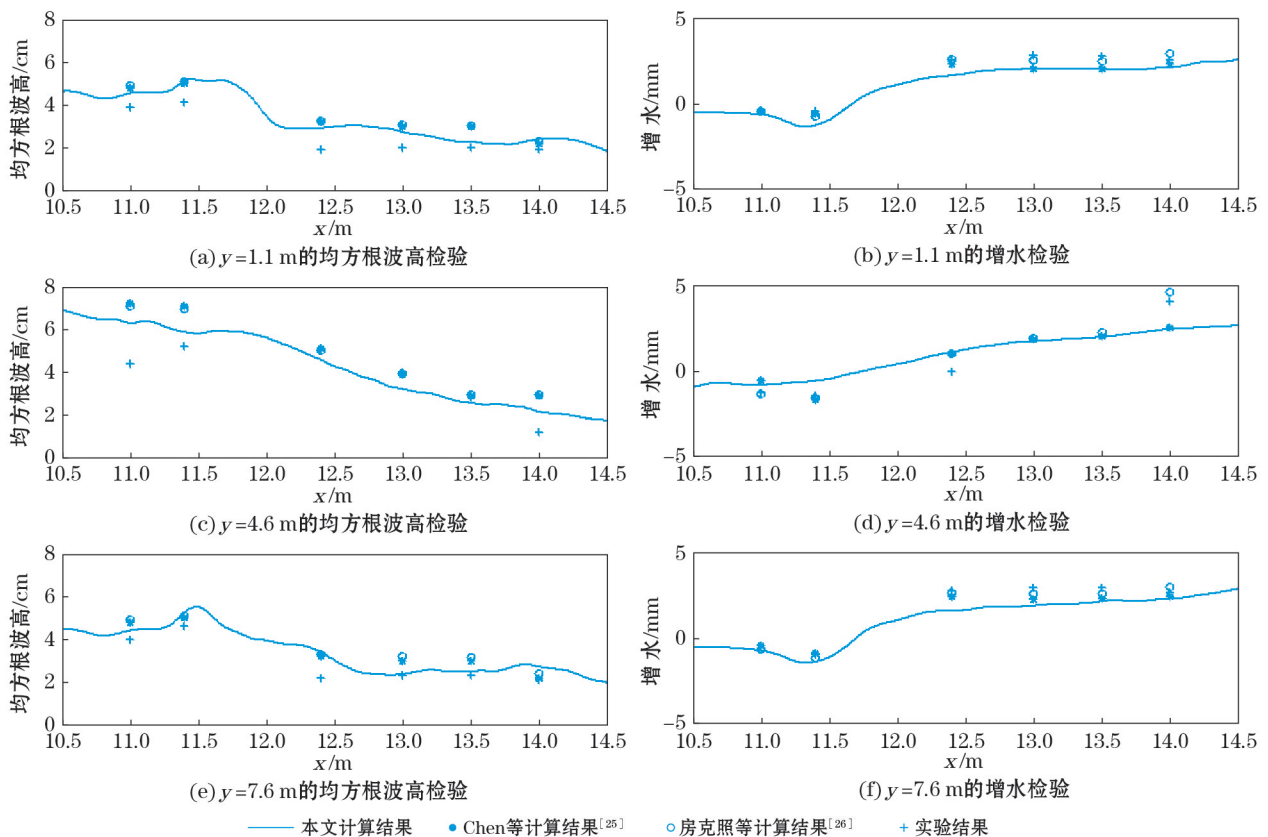


图 3 对 Haller 物理模型实验均方根波高和增水的数值模拟检验

Fig.3 Comparison between the simulated and measured wave height and mean water level

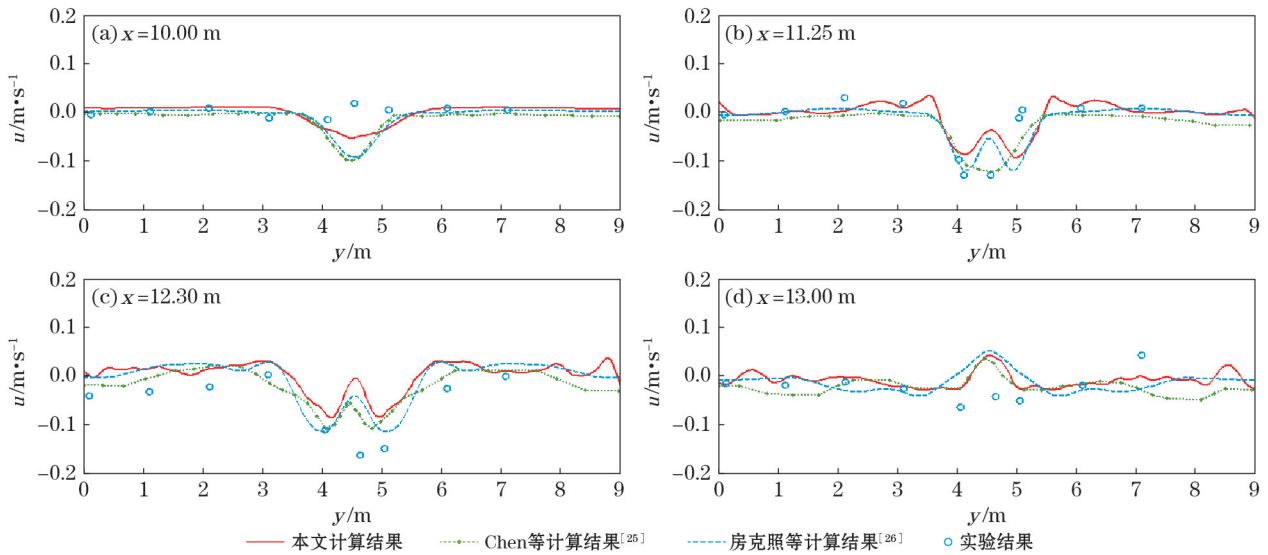


图 4 对 Haller 物理模型实验波生流 u 分量的数值模拟检验
 Fig.4 Comparison between the simulated and observed u component of wave-induced current

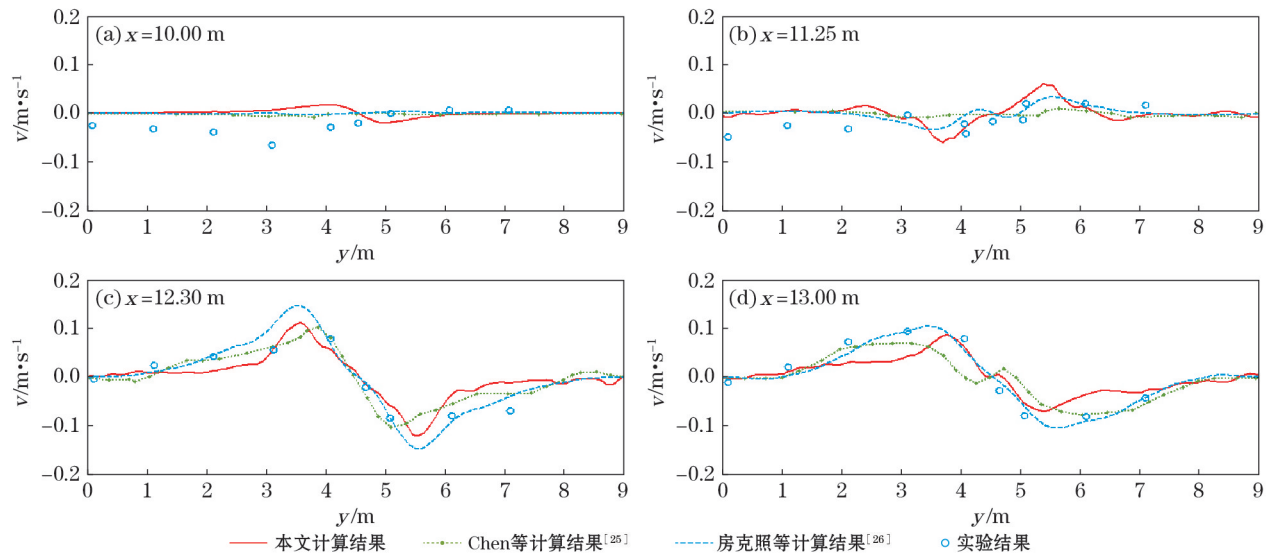


图 5 对 Haller 物理模型实验波生流 v 分量的数值模拟检验
 Fig.5 Comparison between the simulated and measured v component of wave-induced current

3 3 种边界条件对 Haller 物理模型实验波生流数值模拟的影响

上述 FUNWAVE 模式的数值模拟在岸边界采用了窄缝法,可以模拟波浪漫滩过程。图 6 是波浪漫滩区上界和下界位置的数值模拟结果,还给出下界附近 $x=15.0$ m 断面上波高分布。从图 6 可以看出,波浪漫滩区平均宽度为 0.3 m,波高大值区对应的上界位置向岸偏移、下界位置向水里偏移,波浪漫滩区宽度大,波高小值区对应的下界位置向岸偏移、上界位置向水里偏移,波浪漫滩区宽度小。本文将窄缝法提供的岸边界条件称为波浪漫滩边界条件。

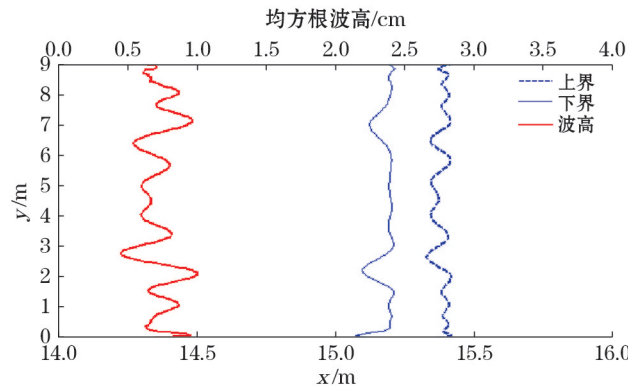


图 6 对 Haller 物理模型实验的波浪漫滩区范围及下界附近波高数值模拟

Fig.6 Relationship between wave height and high/low swash edges in the simulations

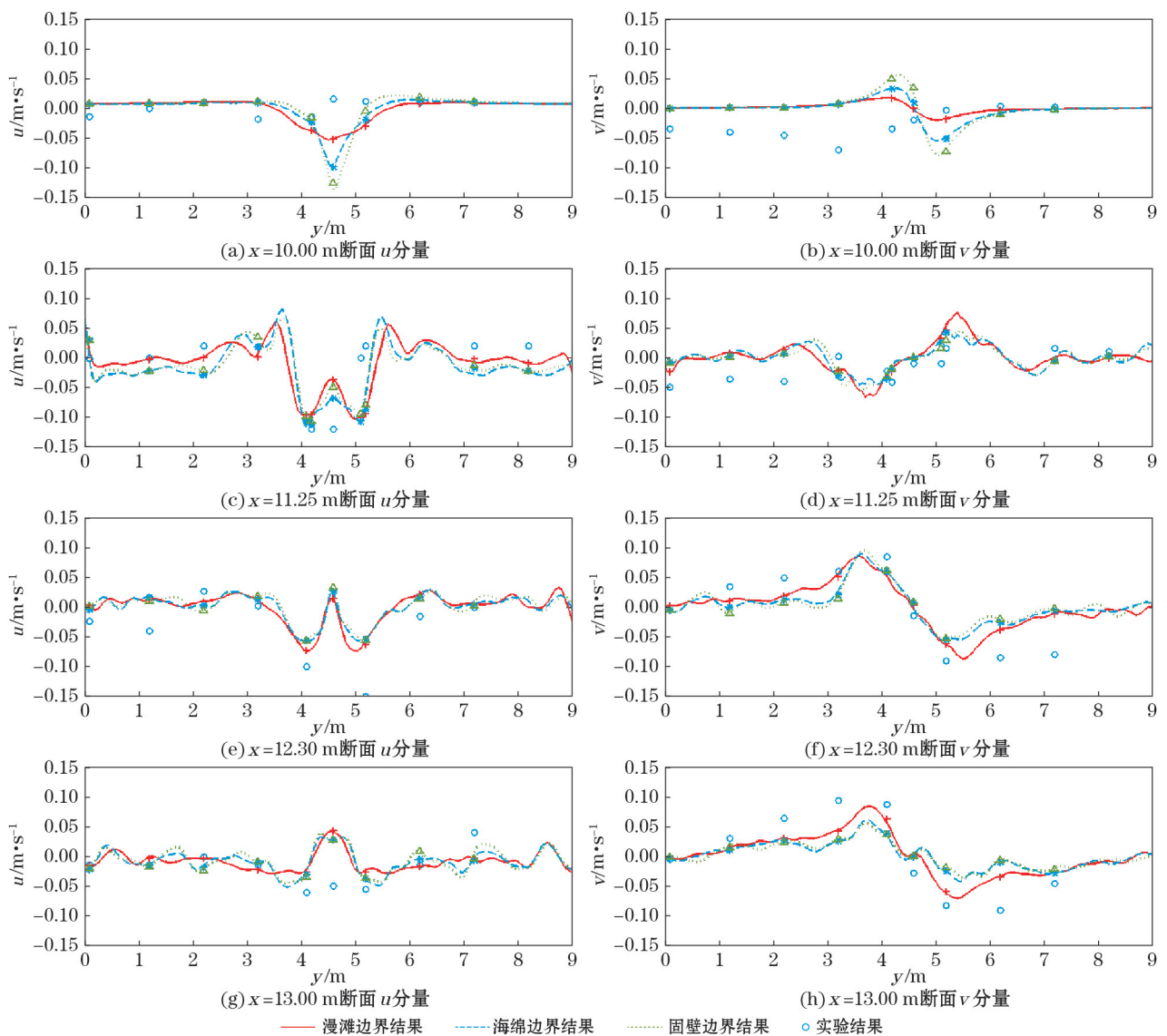


图 7 3 种边界条件对 Haller 物理模型实验波生流数值模拟的比较

Fig.7 Comparison of wave-induced current with three different boundary conditions in the simulations

本文还用固壁和海绵边界条件替换波浪漫滩边界条件,进行 Haller 物理模型实验的数值模拟。固壁和海绵边界设置在水深为 0.01 m 处。图 7 给出了 x 为 10.0, 11.25, 12.3 和 13.0 m 断面上采用 3 种边界条件模拟的波生流与观测资料的比较。在 4 个断面上 3 种边界条件模拟的波生流都有差别。表 1 给出了在 4 个断面上 3 种边界模拟波生流与观测值的误差统计,表中给出了误差的绝对值和相对值,其中相对值为波生流绝对误差与断面最大流速之比。在 4 个断面上,波浪漫滩边界比海绵边界、固壁边界模拟波生流的误差基本上都小。波浪漫滩边界比海绵边界模拟波生流误差的绝对值平均小 0.46 cm/s,相对值平均小 4.70%;波浪漫滩边界比固壁边界模拟波生流的误差绝对值平均小 0.67 cm/s,相对值平均小 6.25%。

表 1 3 种边界条件对 Haller 物理模型实验波生流数值模拟的误差统计

Table 1 Statistics of wave-induced current errors corresponding to three different boundary conditions in the simulations

边界条件		$x=10.00$ m		$x=11.25$ m		$x=12.30$ m		$x=13.00$ m	
		绝对值	相对值	绝对值	相对值	绝对值	相对值	绝对值	相对值
		/cm · s ⁻¹	/%	/cm · s ⁻¹	/%	/cm · s ⁻¹	/%	/cm · s ⁻¹	/%
波浪漫滩边界	u 分量	1.96	27.15	4.11	32.29	4.86	27.68	2.26	22.21
	v 分量	3.30	35.61	2.66	19.18	2.88	16.48	2.88	27.07
海绵边界	u 分量	2.32	32.13	4.29	33.72	5.25	29.90	2.37	23.22
	v 分量	3.98	45.13	2.69	19.04	3.66	20.90	4.02	37.77
固壁边界	u 分量	2.60	36.04	4.24	33.35	5.43	30.94	2.53	23.74
	v 分量	4.65	54.38	2.59	18.66	4.00	22.28	4.19	39.32

本文也统计了 3 种边界条件模拟的波高误差。采用图 3 中 y 为 1.1, 4.6, 和 7.6 m 断面上的观测波高进行检验,波浪漫滩边界、海绵边界和固壁边界模拟波高平均误差分别为 0.68, 0.71, 0.69 cm, 波浪漫滩边界略优于其他两种边界。在这些观测点上波浪漫滩边界对波浪模拟的影响似乎不如杨家轩等^[14]的模拟结果明显。这 3 条断面上波浪漫滩边界、海绵边界、固壁边界模拟波生流 u 分量的平均绝对误差分别为 5.43, 5.50 和 5.46 cm/s, v 分量的平均绝对误差分别为 2.84, 2.86 和 2.94 cm/s, 波浪漫滩边界对这些观测点波生流的影响不如对表 1 中所有观测点上波生流的影响。图 3 中这 3 条断面上的大部分点离波浪漫滩区比较远,波浪漫滩边界对邻近区域波浪的影响可能更强,但是我们缺乏更多的波浪实验观测资料来检验。

5 多种入射波浪条件下波浪漫滩对波生流影响的数值模拟试验

保持上述数值模拟的地形和水深不变,改变入射波高和波浪周期,通过数值模拟进一步分析边界条件对波生流场影响的大小。选取沙坝右端($x > 11.0$ m)的区域,统计海绵边界、固壁边界模拟波生流与波浪漫滩边界模拟波生流的差别,表 2 给出了这些波生流差别的绝对值和相对值。表 2 中相对值统计方法:对于每个点海绵边界、固壁边界模拟波生流与波浪漫滩边界模拟波生流差别的绝对值,将它们与该点所在的 y 方向断面上波浪漫滩边界模拟的最大流速之比作为相对值。表 2 中,第一组数据为波浪入射波高为 $H=4.8$ cm,波浪周期 T 为 0.75, 1.00, 1.25 和 1.50 s 条件下模拟波生流差别的绝对值和相对值;第二组数据为波浪周期 $T=1.0$ s,入射波高 H 为 1.8, 2.8, 3.8 和 4.8 cm 条件下模拟波生流差别的绝对值和相对值。增大波浪周期和入射波高时,3 种边界模拟波生流差别的绝对值也增大,而相对值稳定在 15% 附近,最小为 10.13%,最大为 18.96%。

表 2 多种波浪入射情况下采用 3 种边界条件模拟波生流的差别统计

Table 2 Statistics of wave-induced error in different simulations with three different boundary conditions

第一组方案 ($H=4.8$ cm)		$T=0.75$ s		$T=1.00$ s		$T=1.25$ s		$T=1.50$ s	
		绝对值	相对值	绝对值	相对值	绝对值	相对值	绝对值	相对值
		/cm · s ⁻¹	/%	/cm · s ⁻¹	/%	/cm · s ⁻¹	/%	/cm · s ⁻¹	/%
海绵-漫滩	u 分量	0.95	12.20	1.17	10.13	1.73	12.33	2.53	18.79
	v 分量	0.89	13.08	1.06	10.48	1.41	10.13	1.85	13.77
固壁-漫滩	u 分量	1.05	14.58	1.50	13.38	1.88	13.59	2.18	16.10
	v 分量	0.93	14.34	1.26	11.39	1.44	10.27	1.75	13.21

第二组方案 ($T=1.0$ s)		$H=1.8$ cm		$H=2.8$ cm		$H=3.8$ cm		$H=4.8$ cm	
		绝对值	相对值	绝对值	相对值	绝对值	相对值	绝对值	相对值
		/cm · s ⁻¹	/%	/cm · s ⁻¹	/%	/cm · s ⁻¹	/%	/cm · s ⁻¹	/%
海绵-漫滩	u 分量	0.34	12.28	0.60	12.52	1.14	15.30	1.17	10.13
	v 分量	0.21	11.61	0.50	10.71	1.08	13.53	1.06	10.48
固壁-漫滩	u 分量	0.37	16.26	0.84	18.96	1.28	17.54	1.50	13.38
	v 分量	0.24	15.93	0.55	12.06	1.25	14.74	1.26	11.39

表 2 中,入射波高 $H=4.8$ cm、周期 $T=1.5$ s 情况下,3 种边界计算的波生流差别的绝对值最大,本文选取该入射波浪条件的计算结果更详细地分析其特征。图 8 为该入射波浪条件下波浪漫滩边界条件模拟的波浪漫滩区上界、下界位置和下界附近 $x=15.0$ m 断面上的波高。与图 6 对比,当波浪周期从 $T=1.0$ s 增大到 $T=1.5$ s 时, $x=15.0$ m 断面上波高显著增大,波浪漫滩区的上界向岸线方向上爬至 $x=15.7$ m 附近,漫下界向离岸方向回退至 $x=15.1$ m 处,波浪的漫滩过程更为明显,波浪漫滩区平均宽度增大到 0.6 m。

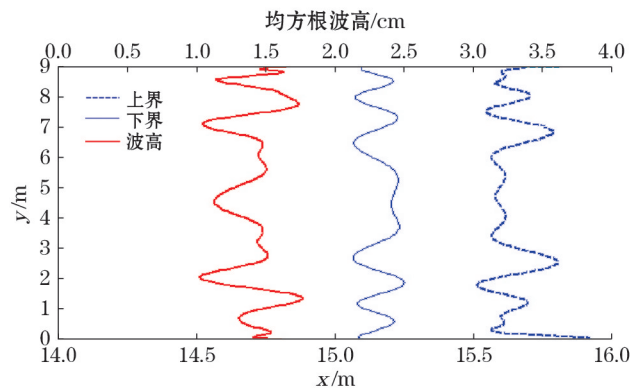
图 8 波浪漫滩区范围及下界附近波高模拟结果($H=4.8$ cm, $T=1.5$ s)Fig.8 Relationship between the wave height and high/low swash edges with incident wave of $H=4.8$ cm and $T=1.5$ s

图 9a,9b,9c 分别为该入射波浪条件下波浪漫滩边界、海绵边界和固壁边界模拟的波生流。图 9 中,3 种边界模拟的波生流分布总体相近,波生流的 4 个涡旋仍然存在,但是其结构却有一些差异。对于沙坝之间沟槽中的两个波生流涡旋,海绵边界和固壁边界比波浪漫滩边界模拟的波生流涡旋结构强;对于靠岸的两个波生流涡旋,海绵边界和固壁边界比波浪漫滩边界模拟的波生流涡旋结构弱。图 10,11 给出了 x 为 11.0, 12.3,13.0 和 14.0 m 断面上 3 种边界模拟的波生流 u, v 分量。与图 7 中沙坝出口处裂流计算结果相似,在 $x=11.0$ m 断面上的 $y=4$ m 至 $y=5$ m 区段,采用 3 种边界模拟的波生流 u 分量都很大,都具有明显的裂

流特征,但是固壁边界和海绵边界比波浪漫滩边界模拟的裂流大 50%左右,且裂流的流幅相对减小。其他断面上固壁边界、海绵边界与波浪漫滩边界模拟的波生流 u 、 v 分量也有明显的区别。在这 4 个断面上,海绵边界与波浪漫滩边界模拟波生流 u 分量差别的平均绝对值分别为 2.12, 1.81, 2.25, 和 2.41 cm/s, v 分量差别的平均绝对值分别为 1.43, 2.95, 1.38 和 3.34 cm/s; 固壁边界与波浪漫滩边界模拟波生流 u 分量差别的平均绝对值分别为 2.03, 1.42, 1.93 和 2.31 cm/s, v 分量差别的平均绝对值分别为 1.20, 2.78, 1.71 和 2.37 cm/s。

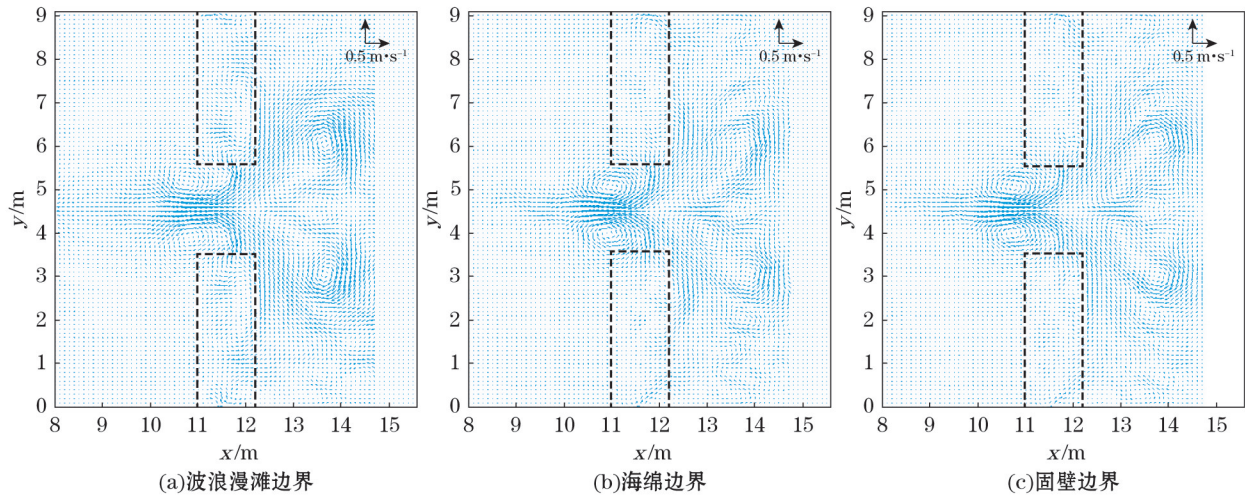


图 9 波生流模拟结果 ($H=4.8$ cm, $T=1.5$ s)

Fig.9 Simulated wave-induced currents with incident wave of $H=4.8$ cm and $T=1.5$ s corresponding to three different boundary conditions

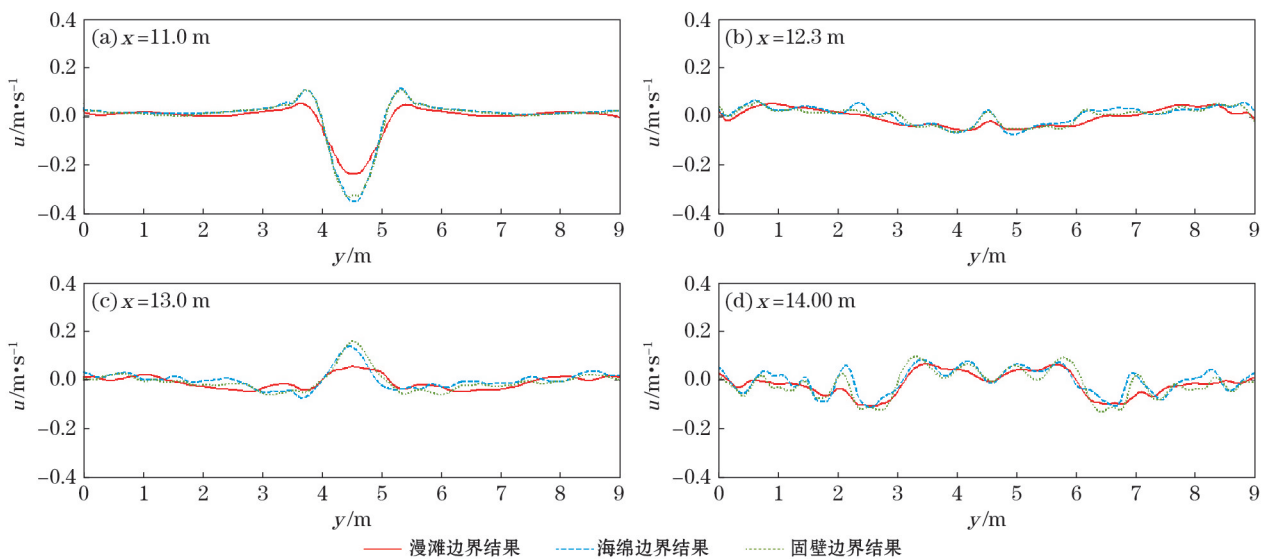


图 10 部分断面的波生流 u 分量模拟结果 ($H=4.8$ cm, $T=1.5$ s)

Fig.10 Simulated u component of wave-induced currents with incident wave of $H=4.8$ cm and $T=1.5$ s corresponding to three boundary conditions

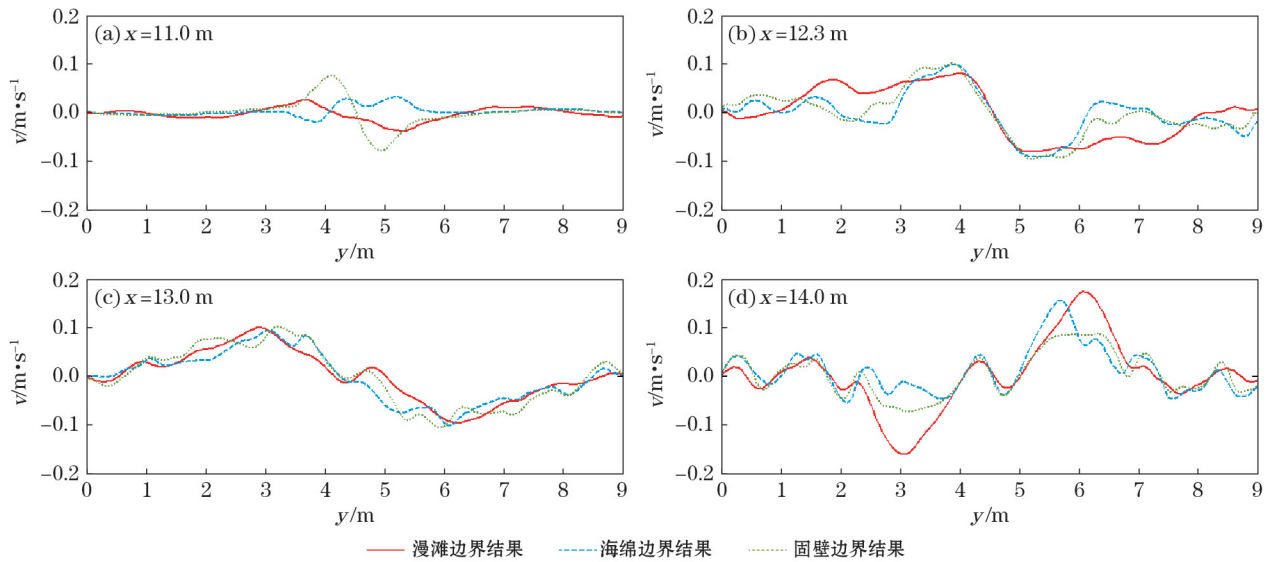


图 11 部分断面的波生流 v 分量模拟结果 ($H=4.8$ cm, $T=1.5$ s)

Fig.11 Simulated v component of wave-induced currents with incident wave of $H=4.8$ cm and $T=1.5$ s corresponding to three different boundary conditions

6 结 论

本文采用 FUNWAVE 模式对 Haller 波浪港池物理模型实验的数值模拟表明,波浪漫滩边界比海绵边界和固壁边界模拟的波生流更接近观测结果,前者比后两者的误差小 5% 左右,前者更适合作为海滩波生流数值模拟的边界条件。本文对多种入射波高、波周期情况下的波生流数值模拟表明,波浪漫滩边界与海绵边界、固壁边界模拟波生流差别的绝对值随入射波高、波周期的增大而增大。在实际海域更复杂的地形和波浪状况影响下,波浪漫滩边界对波生流的影响可能更大,在后续研究中需要加强波生流现场观测,通过数值模拟与观测资料的比较,进一步评估波浪漫滩边界对波生流的影响。

目前用于实际海域的波动平均类型水动力数值模式在海滩上一般采用固壁边界,有些数值计算考虑了潮流、风暴潮等波动平均尺度运动的漫滩边界,但是仍未考虑水边线随波动质点运动的往复摆动,在波动运动过程中相当于固壁边界。从本文的数值模拟可以看出,在波动平均类型水动力数值模式中引入波浪漫滩边界很有必要,可以有效地提高近岸波生流、甚至裂流的模拟精度。

参考文献 (References):

- [1] SUN T, TAO J H. Numerical modeling and experimental verification of pollutant transport under waves in the nearshore zone[J]. Haiyang Xuebao, 2003, 25(3):104-112. 孙涛,陶建华.波浪作用下近岸区污染物输移扩散的数学模型及其实验验证[J].海洋学报,2003,25(3):104-112.
- [2] WANG Y, ZHOU Z L. Progress and prospect of rip currents[J]. Haiyang Xuebao, 2014, 36(5):170-176. 王彦,邹志利.海岸裂流的研究进展及其展望[J].海洋学报,2014,36(5):170-176.
- [3] BROCCINI M, PEREGRINE D H. Integral flow properties of the swash zone and averaging[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 317: 241-273.
- [4] SHI F Y, 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.
- [5] SMIT P, JANSSEN T, HOLTHUIJSEN L, et al. Non-hydrostatic modeling of surf zone wave dynamics[J]. Coastal Engineering, 2014,

- 83(1):36-48.
- [6] DING P X, HU K L, KONG Y Z, et al. Numerical simulation of total sediment under wave and currents in the Changjiang Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2003,25(5):113-124. 丁平兴,胡克林,孔亚珍,等.长江河口波-流共同作用下的全沙数值模拟[J].海洋学报,2003,25(5):113-124.
- [7] HASS K A, SVENDSEN I A, HALLER M C, et al. Quasi-three-dimensional modeling of rip current systems[J].Journal of Geophysical Research Oceans, 2003,108(7):331-351.
- [8] PULE J A, BUTT T. The first international workshop on swash-zone processes[J].Continental Shelf Research, 2006,26(5):556-560.
- [9] HORN D P. Measurements and modelling of beach groundwater flow in the swash-zone: a review[J].Continental Shelf Research, 2006,26(5):622-652.
- [10] MASSELINK G, PULEO J A. Swash-zone morphodynamics[J].Continental Shelf Research, 2006,26(5):661-680.
- [11] BROCCINI M. Integral swash-zone models[J].Continental Shelf Research, 2006,26(5):653-660.
- [12] BROCCINI M, BALDOCK T E. Recent advances in modeling swash zone dynamics: Influence of surf-swash interaction on nearshore hydrodynamics and morphodynamics[J].Reviews of Geophysics, 2008,46(3):1-21.
- [13] YANG J X, ZHU S S, LI X Q, et al. Effects of the wave-swashing boundary on the wave numerical calculation[J].Advance in Marine Science,2013,31(3):305-312. 杨家轩,朱首贤,李训强,等.波浪漫滩边界对波浪数值计算的影响[J].海洋科学进展,2013,31(3):305-312.
- [14] CHOI J, KIRBY J T, YOON S B. Boussinesq modeling of longshore currents in the SandyDuck experiment under directional random wave conditions[J].Coastal Engineering, 2015,101:17-34.
- [15] HA T, JUN K, YOO J, et al. Numerical study of rip current generation mechanism at Haeundae Beach, Korea[J].Journal of Coastal Research, 2014,30:179-183.
- [16] ZHANG W J, ZHU S S, HUANG W G. Application of satellite remote sensing data to storm surge flooding calculation[J].Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science), 2009,10(5):501-506. 张文静,朱首贤,黄韦良.卫星遥感资料在湛江港风暴雨漫滩计算中的应用[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2009,10(5):501-506.
- [17] LÜ X G, QIAO F L, XIA C S. Numerical simulation of tides and three-dimensional tidal currents in Jiaozhou Bay by a movable land-sea boundary model[J].Haiyang Xuebao,2008,30(4):21-29. 吕新刚,乔方利,夏长水.胶州湾潮汐潮流边界面数值模拟[J].海洋学报,2008,30(4):21-29.
- [18] TAO J H, LIQ X, ROGER A F, et al. Modelling and assessment of water quality indicators in a semi-enclosed shallow bay[J].Journal of Hydraulic Research, 2001,39(6):611-617.
- [19] MA X Z, DONG G H, TENG B. Numerical modeling of waves in surf zone[J].Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007,24(2):203-208.
- [20] 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.
- [21] MADSEN P A, SØRENSEN O R, SCHÄFFER H A. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part II: surf beat and swash oscillations for wave groups and irregular waves[J].Coastal Engineering, 1997,32(4):289-319.
- [22] KENNEDY A B, CHEN Q, KIRBY J T, et al. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and run-up, I:1D[J].Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2000,126(1):39-47.
- [23] CHEN Q, KIRBY J T, DALRYMPLE R A, et al. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup, II: 2D[J].Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2000,126(1):48-56.
- [24] HALLER M C, DALRYMPLE R A, SVENDSEN I A. Experimental modeling of a rip current system[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, Reston, USA:ASCE, 1997:750-764.
- [25] CHEN Q, DALRYMPLE R A, KIRBY J T, et al. Boussinesq modeling of a rip current system[J].Journal of Geophysical Research: Oceans, 1999,104(C9):20617-20637.
- [26] FANG K Z, ZOU Z L, LIU Z B. Numerical simulation of rip current generated on a barred beach[J].Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011,26(4):479-486. 房克照,邹志利,刘忠波.沙坝海岸上裂流的数值模拟[J].水动力学研究与进展,2011,26(4):479-486.
- [27] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations[J].Monthly Weather Review, 1963,91(3):99-164.

Effect of the Swash Boundary on Simulated Wave-induced Currents in a Boussinesq Model

WANG Hong¹, ZHU Shou-xian², LI Xun-qiang¹, ZHANG Wen-jing¹, NIE Yu¹

(1. *PLA University of Science and Technology*, Nanjing 211101, China;

2. *College of Oceanography, Hohai University*, Nanjing 210098, China))

Abstract: Swash is a type of small scale motion associated with waves near the shore, which is often ignored in the numerical simulations of wave-induced current. Haller harbor experiments based on a Boussinesq equation model (namely FUNWAVE) are conducted with swash, wall and sponge boundary conditions, respectively, and the results show that the swash boundary condition is the best for simulating wave-induced current. More numerical experiments with different wave periods and heights are carried out to analyze the effects of swash boundary condition on wave-induced current, and the results show that the swash boundary condition significantly impacts the current near the swash zone in many cases, suggesting that the introducing of the swash boundary can improve the simulation of wave-induced current.

Key words: swash; wave-induced current; Boussinesq equation; numerical simulation

Received: March 21, 2016