

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.02.004

王良才, 陈永平, 胡玉植. 基于 SWASH 模型的近岸波浪传播变形数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 26-32. (WANG Liang-cai, CHEN Yong-ping, HU Yu-zhi. Numerical simulation of near-shore wave propagation and transformation based on a SWASH model[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(2): 26-32.)

基于 SWASH 模型的近岸波浪传播变形数值模拟

王良才^{1,2}, 陈永平^{1,2}, 胡玉植^{1,2}

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: SWASH 模型是一种新型的非静压时域波浪模拟。为了探讨 SWASH 模型对于解决近岸波浪传播变形问题的适用性, 在对其控制方程、边界条件、数值解法等进行介绍的基础上, 采用该模型分别模拟了正向规则波、斜向规则波和斜向不规则波入射条件下 L 形防波堤附近水域的波浪场和波生流场, 并与物理试验结果进行对比。结果表明, SWASH 模型较好地复演了波浪在近岸区域所发生的浅水变形、折射、破碎, 以及堤前反射、堤内绕射等物理现象, 波高沿断面的定量分布与试验结果吻合良好, 同时较好地模拟了不同波况下防波堤附近水域的波生流场, 说明该模型适用于复杂岸线和地形条件下波浪传播变形的数值模拟。

关键词: L 形防波堤; SWASH 模型; 近岸波浪; 波生流; 波浪传播; 波浪变形

中图分类号: TV139.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2015)02-0026-07

防波堤作为一种常见的海岸水工建筑物, 主要用于防御波浪入侵, 使港口水域具有足够水深和水面平稳。其中 L 形防波堤作为一种较为常见的防波堤形式, 已在沿海地区广泛使用。为了研究防波堤的工程效果, 需要了解不同来浪条件下其附近水域的水动力特征。L 形防波堤特殊的结构形式, 可以用来检验 SWASH 模型在复杂岸线和地形条件下波浪传播变形的数值模拟能力。事实上, 波浪在向近岸的传播过程中, 受水下地形、陆地边界和人工建筑物等因素的影响, 将会发生浅水变形、折射、绕射、破碎等现象, 并产生由波浪辐射应力变化所驱动的波生流场, 这些现象都有可能对 L 形防波堤附近水域的动力环境产生影响。P. B. Sayers 等^[1]通过物理模型试验研究了 L 形防波堤附近水域的波浪和波生流特性, 在此试验中, L 形防波堤建在斜坡上, 波浪为正向或斜向入射的规则波和不规则波, 采用波高仪和 ADV 等仪器量测了多个测点的平均波高、波生流速和流向。试验结果表明: 在规则波与不规则波条件下, 防波堤附近水域发生明显的波浪变形, 且在堤内侧出现了明显的波生环流; 与规则波相比, 不规则波条件下防波堤内侧的波生流速相对要小一些。随后, S. Pan 等^[2]采用基于波作用量守恒的波流二维数学模型模拟了波浪在 L 形防波堤附近所形成的波高和波生流分布。数值模拟结果和实测数据总体上吻合较好, 但是由于该模型是时域平均 (phase-averaged) 的波浪模型, 防波堤前侧的反射波没有被准确地模拟。陈永平等^[3]建立了一个基于双曲型缓坡方程的时域解析 (phase-resolving) 波浪模型, 模拟了相同物理试验条件下波浪经过 L 形防波堤时附近的波高场, 防波堤前侧的反射现象得到了较好模拟, 数值结果和实测数据吻合较好, 但该模型没有考虑波浪的非线性色散关系, 在水深变化比较剧烈的浅水区域模拟精度有所降低^[4]。

本文采用 SWASH 波浪模型, 在与物理试验相同的条件下, 分别模拟了正向规则波、斜向规则波和斜向不规则波入射条件下 L 形防波堤周围水域的波高场和波生流场, 并与物理试验结果进行对比, 以检验该模

收稿日期: 2014-09-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51379072); 水利部公益性行业科研专项经费资助项目 (201201045)

作者简介: 王良才 (1990-), 男, 河南周口人, 硕士, 主要从事河口海岸水动力学研究。E-mail: fengfeijiaozi@163.com

通信作者: 陈永平 (E-mail: ypchen@hhu.edu.cn)

型对近岸波浪传播变形的模拟效果。在此基础上,根据数值模拟结果,分析了不同来浪条件下L形防波堤附近波浪变形的成因及其波高和波生流场的分布特征。

1 SWASH模型简介

1.1 控制方程

SWASH模型控制方程为考虑了非静水压力项的非线性浅水方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

式中: t 为时间; ζ 为波浪自由表面水位(以静止水面为基准,下同); d 为静水深; $h=\zeta+d$ 为总水深; u, v 为沿 x, y 方向的水深平均流速; g 为重力加速度; c_f 为底摩擦系数; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$ 为水平紊动应力项; q 为非静水压力。

水平紊动应力项通过下式给出:

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x}, \tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (4)$$

式中: ν_t 为由于波浪破碎产生的水平涡黏系数,可通过普朗特混合长度假设给出:

$$\nu_t = \iota_m^2 \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} \quad (5)$$

式中: ι_m 为正比于波高(规则波的波高或不规则波的有效波高)的混合长度。

方程(2)和(3)中非静水压力梯度沿水深积分项的表达式可分别表示为^[5]:

$$\int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz = \frac{1}{2} h \frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{1}{2} q_b \frac{\partial(\zeta - d)}{\partial x} \quad (6)$$

$$\int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz = \frac{1}{2} h \frac{\partial q_b}{\partial y} + \frac{1}{2} q_b \frac{\partial(\zeta - d)}{\partial y} \quad (7)$$

式中:底部处的非静水压力 $q_b = \frac{1}{2} h \left(\frac{\partial w_s}{\partial t} + \frac{\partial w_b}{\partial t} \right)$, w_s 为在自由表面处的垂向流速; w_b 为底部的垂向流速。

1.2 边界条件

自由表面的运动学边界条件为: $w_s = \partial \zeta / \partial t + u_s \partial \zeta / \partial x + v_s \partial \zeta / \partial y$ (8)

底部的运动学边界条件为: $w_b = -u_b \partial d / \partial x - v_b \partial d / \partial y$ (9)

自由表面方程可由方程(1)和(8)联立得:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-d}^{\zeta} v dz = 0 \quad (10)$$

忽略风应力和表面张力,自由表面处的动力学边界条件为: $q|_{z=\zeta} = 0$, 底部的动力学边界条件为: $\frac{\partial u}{\partial z}|_{z=-d} =$

$\frac{\partial v}{\partial z}|_{z=-d} = 0$ 。

入流边界处,通过指定速度分布并结合弱反射边界条件吸收二次反射波^[6]。在模拟规则波时, $u_b|_{in} = \pm \sqrt{\frac{g}{h}} (2\zeta_b - \zeta)$, 其中, ζ_b 为入射波波面自由水位,由时间序列或傅里叶序列给出, $\zeta_b = a_0 + \sum_{j=1}^N a_j \cos(\omega_j t - \varphi_j)$, 其

中, a_0 为有效波面水位, a_j, w_j, φ_j 分别为波的振幅, 圆频率和相位差。在模拟不规则波时, 可将方向谱按照频率分为 M 份, 方向分为 N 份, 共 $M \times N$ 个谐波叠加, 其速度边界为:

$$u|_{in}(z, t) = \sum_{j=1}^n a_j \left[w_j \frac{\cosh k_j(z+d)}{\sinh k_j h} + \sqrt{\frac{g}{h}} \right] \cos(w_j t - \alpha_j) - \sqrt{\frac{g}{h}} \zeta \quad (11)$$

式中: a_j, w_j, k_j 分别为组成波的振幅、圆频率、波数。

流出边界采用 Sommerfeld 辐射条件, 使波浪可以自由通过边界且不会产生数值反射, 即:

$$\partial f / \partial t + \sqrt{gh} \partial f / \partial x = 0 \quad (12)$$

式中: $f = u, v, \zeta$ 。

在固边界处, 采用自由滑移的边界条件。

1.3 数值解法

SWASH 模型采用有限差分格式进行空间离散, 变量布置采用交错网格布置(见图 1)。为了更准确地处理自由面压力边界条件, 提高非静压模型的计算效率和准确性, 可将 q 定义在单元边中心。 u 和 v 布置在网格侧面中心。 ζ, d, h 布置在网格上面中心。动量方程中的水平对流项采用 G. S. Stelling 等^[7] 提出的格式进行离散, 该格式可以确保动量在交错网格中保持守恒。垂向采用 Keller-box 格式离散, 该格式只需要较少的网格层数就可以较准确地描述小周期波浪的色散特性。对于时间项积分和动量方程中的对流项采用显式格式, 压力梯度项采用隐式格式。

模型在求解压力速度耦合方程时采用分步法。在静压步仅考虑非静压梯度项中的显式部分, 求解新时刻的过渡流速; 在非静压步求解局部质量守恒推导出的压力泊松方程获得非静压项修正项, 并对经静压步求解得到的过渡流速进行修正, 得到满足连续性方程的流速场; 最后根据自由表面方程求解下一时刻的自由表面水位值^[8]。波生流速是在模型计算稳定后, 对基于非静压步求解得到的流速进行平均而得到, 它代表了多个波周期内波流的平均流速。

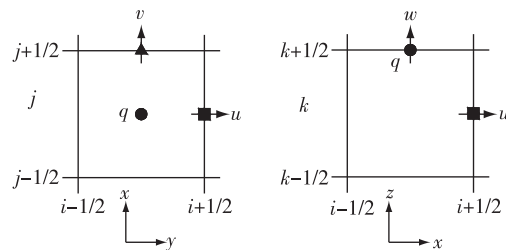


图 1 交错网格变量布置

Fig. 1 Arrangement of variables within a staggered grid system

2 计算实例

2.1 物理模型试验简介

在 P. B. Sayers^[1] 的物理试验中, 整个区域尺寸为 28 m × 22 m, 防波堤布置在区域中央, 建在 1:20 的斜坡上, 斜坡前沿水深为 0.5 m, 地形布置见图 2。防波堤用 12 mm 厚不透水夹板构建而成, 长 × 高为 6 m × 6 m, 同时防波堤外层包了一层泡沫, 用于减轻防波堤前的反射现象。经水槽试验测试, 此泡沫材料在正向来浪条件下反射系数约为 5%, 但在斜向来浪条件下反射现象有可能比正向的更明显。整个物理模型上方事先安放机械桥, 用于布置测量仪器, 试验具体波况见表 1。

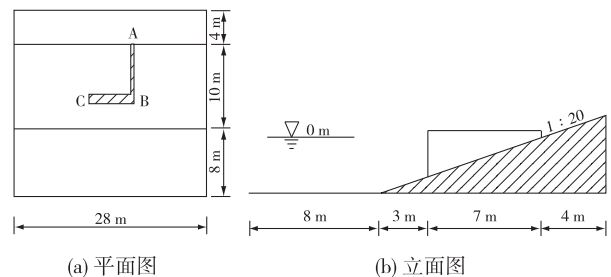


图 2 物理模型试验布置

Fig. 2 Layout of the laboratory experiment

表1 试验波况

Tab. 1 Experimental conditions

试验波况	波浪类型	波高/m	波周期/s	波向/°	是否加入流	试验波况	波浪类型	波高/m	波周期/s	波向/°	是否加入流
波况1	规则波	0.082	1.0	0	否	波况3	随机波	0.088	1.0	20	否
波况2	随机波	0.110	1.0	20	否						

2.2 模型参数取值

本数学模型中, S 向边界为入射边界, 入射波波高及其他波浪参数依上述具体物理试验波况而定。波况1情形下, 波浪垂直于岸线入射, 模型计算区域为 $28\text{ m} \times 28\text{ m}$ 。 x 和 y 方向的空间步长均为 0.05 m , 时间步长为 0.002 s , 计算总时间为 120 s , 初始水位为 0 , 波况2和波况3情形下, 波浪入射方向与岸线夹角为 20° , 考虑到直接从边界造波会有部分阴影区, 通过旋转计算区域, 使波浪从入流边界处垂直进入, 模型计算区域为 $35.9\text{ m} \times 39.2\text{ m}$, 其他参数同波况1。在以上3种波况情形下, 防波堤前侧孔隙率均给定为 0.25 , 而模型侧边界布置足够厚的海绵层以吸收波能, 减少侧边界反射^[9-11]。

3 计算结果及分析

模型计算后得到的波浪自由表面水位分布如图3, 可见, 3种波况下波浪绕射、反射、破碎等物理现象都能得到很好的模拟。虽然防波堤前侧有泡沫防护, 但在波浪斜向入射的波况2和波况3情形下防波堤前侧出现了较为明显的反射现象, 反射波的波向和入射波的波向以L形防波堤 BC 段的法线为对称轴, 反射角与入射角基本相同。从图3(b)和3(c)中对比可见, 与规则波相比, 不规则波条件下, 波峰线的分布较不规整。不同入射角度时, 绕射波波峰线起点的连线与入射波方向一致, 如垂向入射时, 绕射波波峰线起点连线与入射波方向一致, 与L形防波堤 BC 段垂直; 斜向入射时, 绕射波波峰线起点的连线与L形防波堤 BC 段的夹角也与入射波波向基本一致。

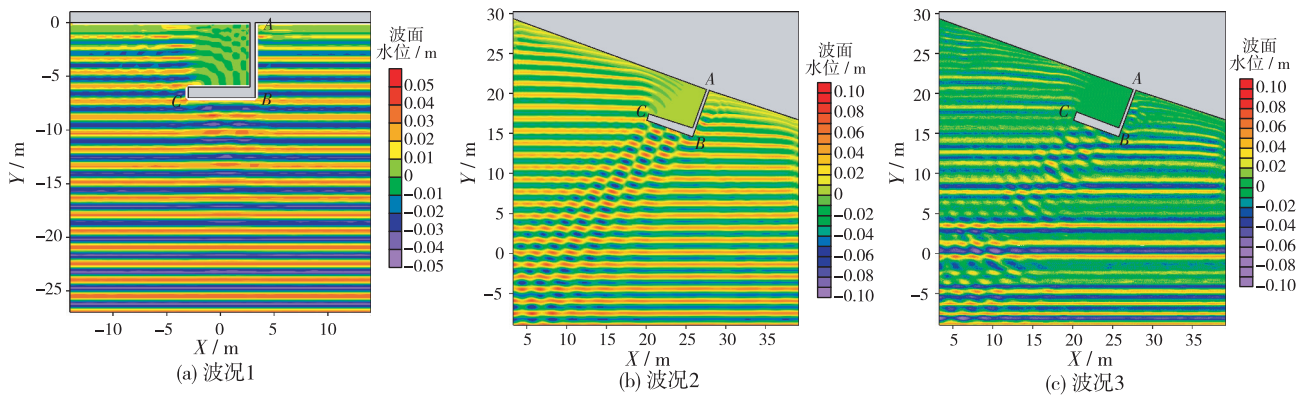


图3 波面水位

Fig. 3 Snapshot of wave surface elevation

模型计算得到的有效波高和波生流场如图4。从有效波高场图中可见, 3种波况下波浪在遇到口门堤头时均发生绕射, 在掩护区内波能扩散, 波高不断减小。防波堤前由于反射的作用, 有效波高有所增大。从波生流场图中可见, 3种波况下L形防波堤内侧均有环流产生: 波生流沿着L形防波堤 AB 段流动, 由于 BC 段的存在, 发生偏转并沿此臂流动, 在口门处向斜下方偏转, 这与P. B. Sayers^[1]物理试验的定性观测一致。同时, 我们注意到在波生环流附近波况1和2的最大流速为 0.2 m/s , 而波况3的最大流速为 0.1 m/s , 这是因为在不规则波情形下, 由于波浪随机性的存在, 在防波堤内侧波高分布更为均匀, 因此与波况1和2相比, 波况3的波生流流速相对要小一些。

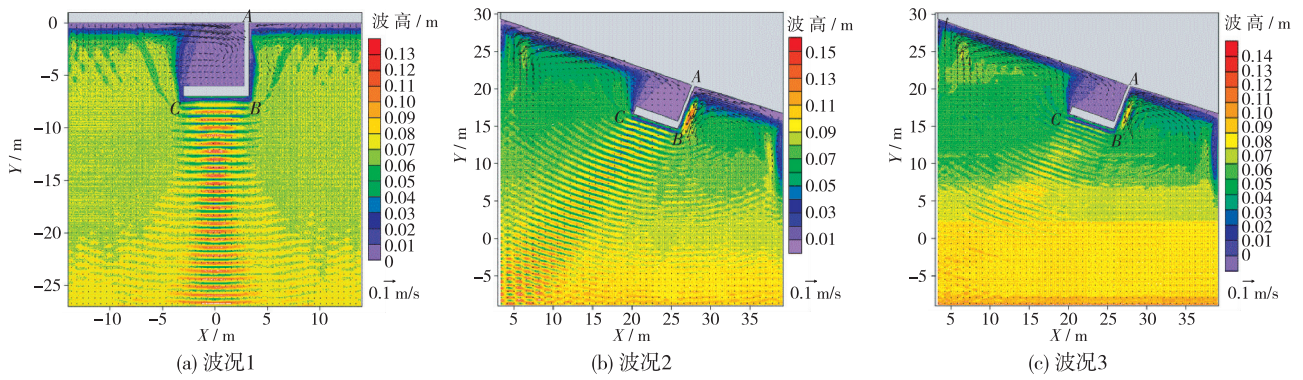


图4 有效波高和波生流场分布

Fig. 4 Distribution of significant wave height and wave-induced current fields

为了与实测波高资料进行定量比较,分别选取了4个沿岸线方向的断面和4个垂直于岸线方向的断面,其位置如图5所示。本文对3种波况下的波高计算值和试验资料进行了比较,二者吻合良好。从图6波况1的断面波高验证(波况2,3相似)中可见,在垂直于岸线方向的断面上,V1,V4断面受底部摩擦和波浪折射的影响,波高向岸逐渐减小,而V2,V3断面在防波堤内侧有效波高明显减小,其大小主要受波浪绕射作用所控制。在沿岸线方向的断面上,受L形防波堤掩护作用影响,H1,H2和H3断面都表现为明显的“U”状分布,而位于L形防波堤外侧的H4断面因波浪变形相对较小,有效波高沿断面分布较为平均。相比较而言,无论在垂向或横向断面上,不规则波条件下的波高变化都要比规则波更平缓一些,这主要是因为不规则波由不同频率和波高的规则波所组成,它们在波浪折射、绕射等传播过程中会互相影响,使得整体上的表现更为均匀。

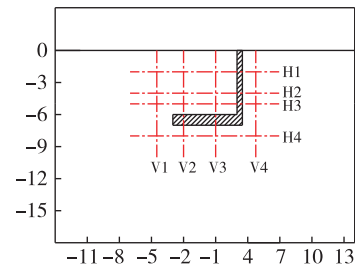


图5 断面验证位置

Fig. 5 Locations of the sections for the model verification

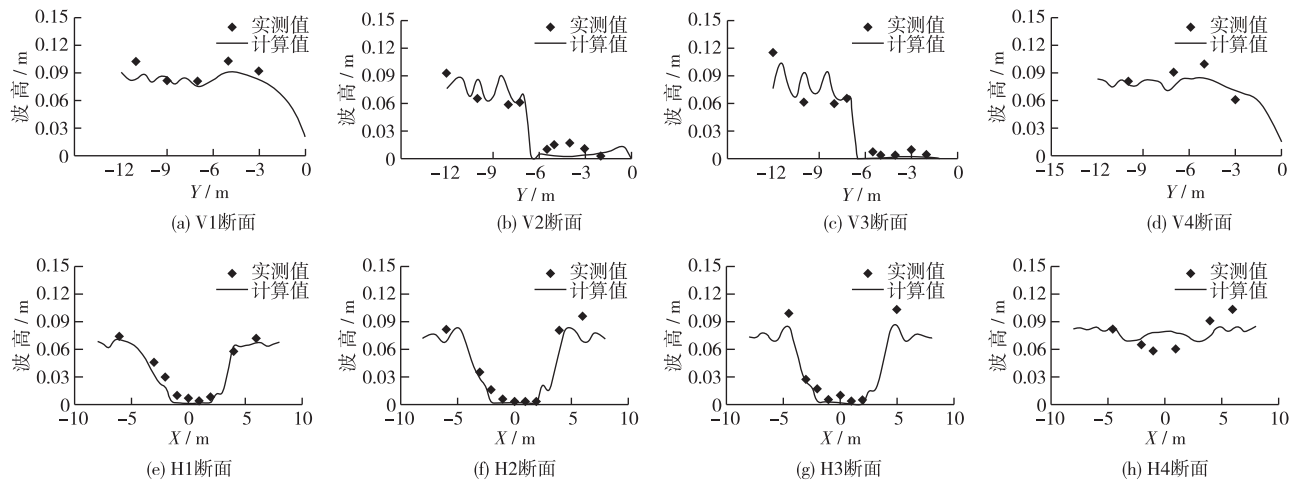


图6 波况1断面波高验证

Fig. 6 Comparisons of significant wave heights under the 1st wave condition

4 结 语

采用SWASH非静压数学模型,研究了规则波和不规则波入射条件下L形防波堤附近水域的水动力特性,对比分析了不同波况下L形防波堤周围有效波高场、波生流场等的变化。从计算结果可见,入射波在向岸传播过程中受浅水变形、折射、绕射、反射和波浪破碎等因素的影响下发生较大的变化,防波堤附近水域的波高存在较大差异,且在L形防波堤内侧存在比较明显的波生环流。相比较而言,上述现象在规则波的波况下表现得更为明显一些。通过与物理模型试验资料的定性和定量比较,证实了SWASH波浪模型适用于近岸复杂岸线和地形条件下波浪传播变形的数值模拟。

参 考 文 献:

- [1] SAYERS P B, O'CONNOR B A, MACDONALD N J. Wave-current interaction in random waves and currents-physical model testing in the UKCRF[R]. UK: Department of Civil Engineering in the University of Liverpool, 1995.
- [2] PAN S, MACDONALD N, SAYERS P, et al. Modelling the hydrodynamics of an L-shaped breakwater[C]//Proceedings of Computer Modelling of Seas and Coastal Regions International Conference. WIT Press, Coastal Engineering and Marina Developments, 1999: 243-252.
- [3] CHEN Yong-ping, ZHANG Chang-kuan, PAN Shun-qi. Numerical simulation of waves and currents near L-shaped breakwater [C]//International Offshore and Polar Engineering Conference. USA: ISOPE, 2011: 1123-1127.
- [4] 郑永红,沈永明,邱大洪. 应用非线性色散关系数值求解双曲型缓坡方程[J]. 水利学报,2001(2):69-75. (ZHENG Yong-hong, SHEN Yong-ming, QIU Da-hong. Application of nonlinear dispersion relation in solving hyperbolic mild slope equations [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(2): 69-75. (in Chinese))
- [5] STELLING G S, ZIJLEMA M. An accurate and efficient finite-difference algorithm for non-hydrostatic free-surface flow with application to wave propagation[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2003, 43(1): 1-23.
- [6] BLAYO E, DEBREU L. Revisiting open boundary conditions from the point of view of characteristic variables[J]. Ocean Modelling, 2005, 9(3): 231-252.
- [7] STELLING G S, DUINMEIJER S P A. A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2003, 43(12): 1329-1354.
- [8] CASULLI V, STELLING G S. Numerical simulation of 3D quasi-hydrostatic, free-surface flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(7): 678-686.
- [9] 邹国良,张庆河. 非静压波浪模型无反射造波[J]. 海洋工程,2012,30(4):55-61. (ZOU Guo-liang, ZHANG Qing-he. Wave generation without re-reflection for non-hydrostatic wave model[J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(4): 55-61. (in Chinese))
- [10] 郭晓明,康玲. 一种非静压的平面二维水动力学模型[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2012,40(10):39-43. (GUO Xiao-ming, KANG Ling. Plane two-dimensional hydrodynamic model with non-hydrostatic pressure[J]. Journal of Huazhong University of Science and technology (Natural Sciences Edition), 2012, 40(10): 39-43. (in Chinese))
- [11] 邹国良,张庆河. 非静压方程与波作用谱模型的波浪传播嵌套模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报,2014,35(1): 1-6. (ZOU Guo-liang, ZHANG Qing-he. Simulation of wave transformation by nesting non-hydrostatic equation with a wave action spectrum model[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(1): 1-6. (in Chinese))

Numerical simulation of near-shore wave propagation and transformation based on a SWASH model

WANG Liang-cai^{1,2}, CHEN Yong-ping^{1,2}, HU Yu-zhi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In recent years, a new type of phase-resolving wave model, SWASH, based on the non-hydrostatic shallow water equation, was developed to simulate the near-shore wave propagation and transformation. In order to examine the accuracy and robustness of the SWASH model, subsequent to the introduction of its governing equations, boundary conditions and numerical schemes, it is applied to simulate the propagation and transformation of normal regular waves, oblique regular waves or oblique random waves passing along a L-shaped breakwater, and the simulated results are compared with the experimental data. Analysis results show that the near-shore wave processes, such as wave shoaling, refraction, wave breaking, and reflection in front of the breakwater, wave diffraction behind the breakwater, and the wave-induced circulation flow around the L-shaped breakwater, are all well simulated. The numerical simulation results agree well with the experimental data, which indicates that the SWASH model can be used to simulate the wave propagation and transformation in the near-shore area having a complex topography.

Key words: L-shaped breakwater; a SWASH model; near-shore waves; wave-induced current; wave propagation; wave transformation