



长江口围垦工程越浪数值模拟研究*

张杰¹, 丁亮²

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 运用基于非线性浅水方程的 SWASH 模型对长江口围垦工程的越浪进行模拟研究。采用垂向结构提高了模型的颜色散性, 使模型适用于深水区, 考虑垂向加速度的作用, 使浅水区域的模拟更加精确。根据实际具体工程对模型进行验证并与海堤规范计算结果进行比较。研究表明: 该模型和海堤规范都能很好地对越浪量进行计算, 模型计算结果更为精确, 工程中栅栏板对波浪的耗散等还需在数模中进一步概化和优化。

关键词: 非线性; SWASH 模型; 横沙围垦; 越浪模拟

中图分类号: P 71

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0022-04

Numerical simulation of wave overtopping of reclamation engineering at Yangtze River estuary

ZHANG Jie¹, DING Liang²

(1. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: This paper studies the wave overtopping of reclamation engineering at the Yangtze River estuary with nonlinear shallow water equation SWASH model. In order to improve the dispersion of model, the vertical direction of model is divided into two layers, and the acceleration of vertical direction is considered. And then, the wave overtopping calculated by the sea embankment standard and SWASH model are compared to study the accuracy of the two ways. The results show that both the two ways can compute the wave overtopping exactly, and the result of model is more accurate. And, the impact of barrier board to wave overtopping should be considered in the numerical simulation.

Keywords: nonlinear; SWASH model; Hengsha reclamation; simulation of wave overtopping

防波堤是海岸工程中最常见的防护建筑物之一, 其主要作用是掩护后方港池、减小港池内波高, 达到保护生命财产安全的目的。按照是否允许越浪, 可分为允许越浪防波堤和不允许越浪防波堤。目前, 对于防波堤越浪量的计算主要通过以下两种方法: 第 1 种是根据相关规范公式进行计算, 如海港水文规范越浪公式、大连理工越浪公式等; 第 2 种采用物理模型或数学模型手段进行模拟研究, 这类方法较为客观直接, 结果也较

为可靠。采用数学模型研究防波堤越浪量已取得一定的成果。目前, 较为成熟的数值方法是利用 CFD 或者 Boussinesq 方程对越浪量进行计算。第 1 种方法主要是在方程中添加造波项和消波项, 使 CFD 具备造波和消波的能力, 使用 VOF 方法追踪液面, 运用紊流模型模拟波浪的破碎, 使模型具备模拟波浪爬坡的能力^[1-6], 这类方法模拟精度较高, 但计算量大, 花费时间较长; 第 2 种方法主要是利用狭缝法来处理动边界, 使得 Boussinesq

收稿日期: 2014-08-25

*基金项目: 国家自然科学基金 (51179178); 复杂条件下建港关键技术集成研究 (2011Y01)

作者简介: 张杰 (1973—), 男, 工程师, 从事疏浚吹填及水工建筑工程施工、工程测量研究。

方程具备模拟越浪的能力^[7-8], 这类方法由于弱色散性, 使得在深水区波浪的模拟精度不高。SWASH 模型是荷兰 Delft 理工大学基于非线性浅水方程开发的一个数学模型, 该模型采用了分层结构, 使模型适用于深水波浪的模拟, 并考虑了垂向加速度的作用, 使浅水模拟结果更加精确。本文以横沙围垦工程为例, 运用 SWASH 模型对越浪量进行计算, 并与海堤水文规范计算结果进行比较, 研究表明, 两种方法都能对越浪进行准确的计算, 但数模计算结果更为精确。数模中还有众多要素需进行进一步科学概化和优化, 如栅栏板、底部抛石对波浪的影响在模型中的概化方法; 规范中, 多段斜坡的越浪量计算也需进行进一步的研究。

1 模型理论及参数设定

1.1 模型理论

1.1.1 SWASH 模型理论

SWASH (Simulating Waves till Shore) 是荷兰 Delft 理工大学基于非静压浅水方程建立的一种数值模型。在直角坐标系下, 其控制方程可表示为^[9]:

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

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

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

$$w_b = -u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y} \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w_s - w_b}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

防波堤顶端某点的越浪量为:

$$Q = \zeta(x, y, z)u$$

式中: x 、 y 、 z 分别是笛卡尔坐标系统的 3 个方向; t 是时间; u 、 v 分别是 x 、 y 方向的流速; $\zeta(x, y, z)$ 是

自由液面高度; $d(x, y)$ 是静水深, $h = d + \zeta$ 为总水深; $q(x, y, z, t)$ 是非静压项; g 为重力加速度; c_f 是无量纲底部摩擦系数; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} 是湍流剪切应力; w_b 是底部垂向速度; w_s 是自由液面垂向速度。

1.1.2 海堤规范计算方法

当斜坡堤顶有防浪墙 (胸墙) 时 (图 1), 堤顶的越浪量可按下式计算^[10]:

$$Q = 0.07 H_c^{H_{1/3}} \exp\left(0.5 - \frac{b_1}{2H_{1/3}}\right) BK_A \cdot \frac{H_{1/3}^2}{T_p} \left[\frac{0.3}{\sqrt{m}} + \text{th}\left(\frac{d}{H_{1/3}} - 28\right) \right] \ln \sqrt{\frac{gT_p^2 m}{2\pi H_{1/3}}} \quad (6)$$

式中: Q 为越浪量 [$\text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$], 即单位堤宽、单位时间内的越浪水体体积; H_c 为设计高潮位与防浪墙顶之间的距离 (m); A 为经验系数, 按《海堤工程规范》表 F.0.1-1 确定; K_A 为护面结构影响系数, 按《海堤工程规范》表 F.0.1-2 确定; T_p 为谱峰周期 (s); $H_{1/3}$ 为有效波高 (m)。

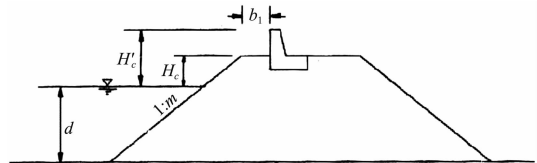


图 1 有胸墙斜坡堤

1.2 模型建立及参数设置

横沙东滩围垦工程位于长江口深水航道北支, 在北槽和北港之间, 工程位置见图 2。该段工程为允许越浪工程, 为了简化模型, 本文选取了四期工程北侧的一个断面进行计算, 该断面垂直于堤向外, 具体断面见图 3。SWASH 越浪模型的边界取在 SZF 浮标处, 边界条件采用的是浮标的实测波浪值, 模型的空间步长为 1 m, 时间步长为 0.2 s, 为了提高模型的色散性, 使模型在较深水域模拟结果准确, 模型采用了垂向分层结构, 共分为 2 层, 底部摩擦采用曼宁系数, 在栅栏板放置处提高底摩擦系数来模拟栅栏板的消浪作用, 并在模型尾部设置了海绵层进行消波。对越浪量进行计算时, 取波面稳定后的 10 个波周期内的越浪量进

行计算，波浪破碎采用了涡黏系数法，波浪频谱采用的是 Jonswap 谱。



图2 横沙东滩围垦工程

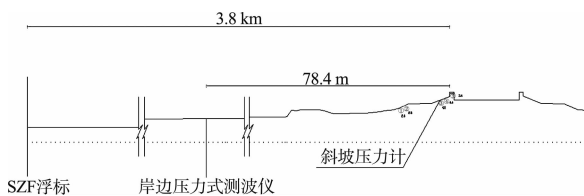
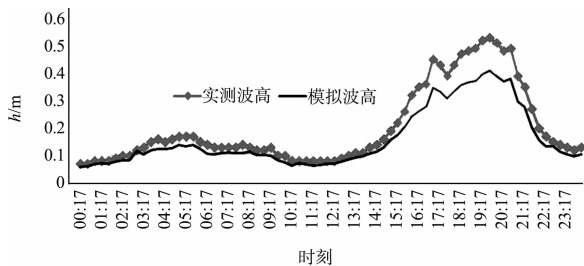


图3 模型断面

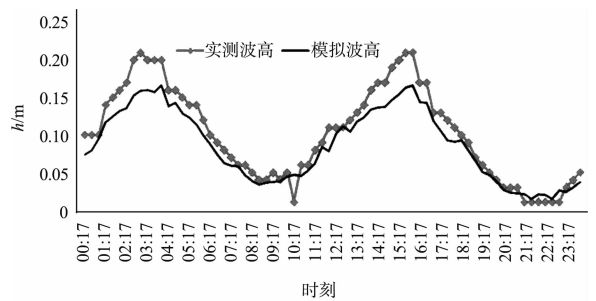
2 模型验证及结果分析

2.1 模型结果验证

越浪量模拟的关键在于波浪模拟的准确与否。为了验证波浪模拟的准确性，分别采用 2013-12-26 与 2014-01-04 的波浪模拟值与岸边压力式测波仪测量的波高进行比较，结果见图 4。从图中可以看出波浪模拟值与观测值变化趋势相近，在波浪较小时，模拟值与观测值拟合很好，随着波高的逐渐增加，模拟值出现了一定的误差，这主要是由于缺少实测风速资料，因此模型中未能考虑风速对波浪的影响，故计算结果偏小，但整体满足模拟精度的要求，说明 SWASH 能很好地模拟出波浪从深水往浅水传播时的变形情况。



a) 2013-12-27



b) 2014-01-04

图4 波高模拟值与实测值的比较

2.2 结果分析

非静压假定的 SWASH 模型是相位解析模型，可以准确模拟每个时刻的波面情况。由于采用了分层结构，相比 Boussinesq 方程而言，色散性有所提高；由于考虑了垂向加速度，使得浅水处波面的模拟更为准确，使得越浪量的计算也更为准确。为了解模拟结果的精度，本文选取了 2014-02-06T11:30—13:30（该时间段波浪较大）的越浪量进行模拟并与实测值进行比较，见图 5，从图 5 可以看出，越浪量模拟值与实测值随时间的变化趋势一致，结果大小也相近，但也存在一定的误差，波高较小时，误差较小，随着波高的逐渐增大，误差也逐渐变大。

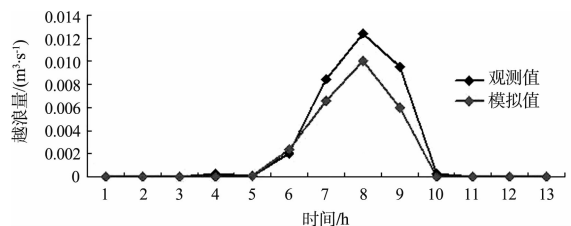


图5 实测的越浪量与模拟计算结果对比

为了研究海堤规范、SWASH 模型模拟和物理模型模拟的结果，选取北大堤五期工程的断面进行比较分析，物模断面见图 6，物模水位采用的参数见表 1。

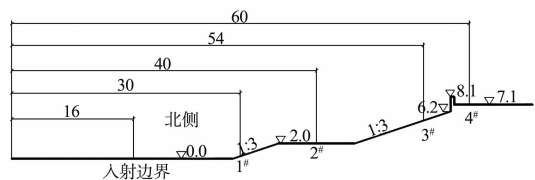


图6 北堤物理模型试验断面（单位：m）

表 1 物理模型试验水文条件

组合	H_s/m	T/s	潮位/m	风速/($m \cdot s^{-1}$)
20 a 高潮位与 9 级风	2.35	6.30	5.49	20
50 a 高潮位与 10 级风	2.85	7.01	5.77	24

为了研究波浪从堤脚开始在护堤上传播时波面的变形情况, 本文提取了距离堤脚 8 m、24 m、堤顶等 3 处的波面变化情况 (图 7)。可以看出, 随着水深的逐渐变小, 波面的非线性逐渐增强。距离堤脚 8 m 处的水深还相对较大, 故波浪还较规整, 随着水深的进一步减小, 波峰逐渐变陡, 波谷逐渐变坦, 其波面形状见图 7b)。图 7c) 显示了堤顶处水面的变化情况, 从图中可以看出, 只有部分时刻, 波浪才能爬上坡顶产生越浪。

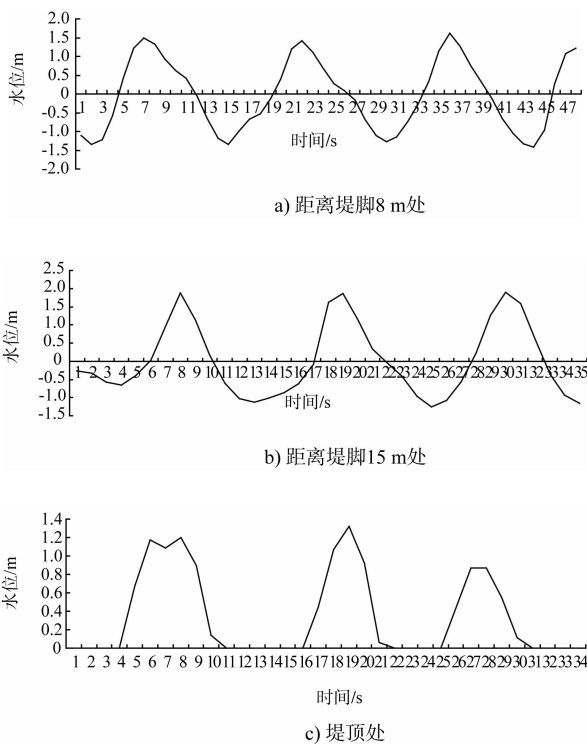


图 7 模拟计算出来的波面情况

表 2 显示了两组组合下海堤规范、数模计算越浪量与物模结果的对比情况。从表 2 可以看出, 数模计算结果相对规范计算结果的精度有了一定的提高, 但仍存在一定的误差。总体而言, 规范和数模方法都能对越浪量进行较为准确的计算, 但还存在一定的缺陷, 因此两种方法都还需要进行进一步的改进。

表 2 计算结果对比

断面	越浪量/($m^3 \cdot s^{-1}$)		
	海堤规范	物模	数模
组合 1	0.012	0.017	0.015
组合 2	0.018	0.021	0.019

3 结论

基于非静压假定的 SWASH 模型能很好地模拟波浪的浅水变形、能较为准确地模拟出波浪的爬坡和越浪、计算的越浪量具有较高的精度。在长江口围垦工程越浪量的计算中, SWASH 模型计算结果相比海堤规范模型模拟结果更为准确, 但也存在一定的不足。对于规范, 多段斜坡式越浪量的计算还需要进一步完善, 同时栅栏板、底部抛石对越浪的影响也需进一步研究。对于数学模型, 相关影响系数的量化, 如栅栏板的消波作用的量化与概化, 还需进一步的研究。

参考文献:

- [1] 范红霞. 斜坡式海堤越浪量及越浪流试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [2] 许小峰. 带离岸式潜堤的斜坡堤越浪数值模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [3] 周勤俊, 王本龙, 兰雅梅, 等. 海堤越浪的数值模拟[J]. 力学季刊, 2005(4): 24-31.
- [4] 刘亚男, 郭晓宇. 基于 RANS 方程的海堤越浪数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(6): 12-18.
- [5] 周益人. 波浪作用下堤坝防护问题试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [6] 冯卫兵, 崔磊, 仲南燕, 等. 斜坡堤护面板上最大波压力研究[J]. 水运工程, 2013(1): 30-38.
- [7] Kirby J T, Dalrymple R A. Verification of a parabolic equation for propagation of weakly-nonlinear waves [J]. Coastal Engineering, 1984(8): 219-232.
- [8] 范飞, 梁丙臣. Boussinesq 方程与抛物型缓坡方程两种波浪模型的比较与分析[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(2): 102-105.
- [9] Suzuki T, Verwaest T. The applicability of SWASH model for wave transformation and wave overtopping: A case study for the Flemish coast[C]. The Fifth International Conference on Advanced Computational Methods in Engineering. Belgium: ACOMEN, 2011: 14-17.
- [10] SL 435—2008 海堤工程设计规范[S].

(本文编辑 武亚庆)