



威海船厂港域波高数值计算*

吉星明¹, 冯春明², 董胜³

(1. 中交烟台环保疏浚有限公司, 山东烟台 264000; 2. 中国船舶燃料青岛有限公司, 山东青岛 266011;
3. 中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266100)

摘要: 应用能量平衡方程研究近岸随机波的传播变形是一种简单而实用的方法, 其在海洋学以及海岸动力学中得到了广泛的应用。采用考虑绕射作用的能量平衡方程作为计算随机波浪传播变形的控制方程, 以此建立的数学模型考虑了波浪的浅化、折射、绕射、反射和破碎。利用该模型对威海船厂港内随机波传播变形进行数值模拟, 通过数值计算值与试验值的比较, 发现在相同的考虑因素下两者是相当吻合的, 说明模型在计算近岸随机波的传播变形时是实用而可靠的。

关键词: 随机波; 输入谱; 绕射; 能量平衡方程; 数值模拟

中图分类号: TV 139.2*6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0080-04

Numerical calculation of wave height in harbor basin of Weihai dockyard

Ji Xing-ming¹, FENG Chun-ming², DONG Sheng³

(1. CCCC-TDC Yantai Environmental Protection Dredging Co., Ltd., Yantai 264000, China; 2. China Marine Bunker Qingdao Co., Ltd., Qingdao 266011, China; 3. Engineering Institute, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: It is a simple and practical method to research nearshore random waves propagation and transformation by the application of the energy balance equation. This method has been used in oceanography and coastal dynamics widely. In this paper, the energy balance equation considering the diffraction effect is used as the control equation to calculate the random wave propagation and transformation. Based on the control equation, a numerical model is established considering comprehensive effects of wave shoaling, refraction, diffraction, reflection and breaking. The random wave propagation and transformation in the harbor basin of Weihai dockyard is simulated using this model. Example results show that the calculated values are in good agreement with the experimental values under the same considered cases. It indicates that the model is practical and reliable to stimulate the nearshore random wave propagation and transformation.

Key words: random wave; input of spectrum; diffraction; energy balance equation; numerical simulation

在岸线保护和港口建设中, 估计近岸波浪条件是十分必要的。波浪从近海传播至岸滩的过程中, 受海底地形、背景流以及海中建筑物等的影响, 会发生浅化、折射、绕射、反射以及破碎等现象, 从而导致波高、波长和传播方向发生变化。

近年来, 随着计算机数值计算技术的迅猛发展, 涌现出了许多波浪数值计算模型^[1]。常用的主要有: 基于Boussinesq型方程的波浪模型、基于缓坡方程的波浪模型和基于能量平衡方程的波浪模型。其中Boussinesq型方程是在时域内求解质量和动量的守恒方程, 从而给出波浪传播过程中波

收稿日期: 2012-03-21

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879085)

作者简介: 吉星明(1980—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为港口海岸工程水动力数值模拟。

面的变化、波浪引起的增水以及波浪破碎引起的近岸水流等信息。由于Boussinesq型波浪模型目前受限于计算时间和计算机内存, 因此只能应用于相对小尺度海区、计算时间不太长的波浪数值模拟; 基于缓坡方程的计算模型, 是根据波浪要素在波浪周期和波长的时空尺度上缓变的事实, 描述海浪波动能量、波高、波长、频率等要素的变化。由于缓坡方程依赖于势波理论, 所以在处理风能输入、底摩擦能量损耗、波浪破碎、波-流相互作用等物理过程理论依据不很充分^[2], 用于大范围计算时不是很合适; 基于能量平衡方程的波浪模型则多是在频域内利用能量谱研究波浪的传播变化, 在处理风能输入、波-波相互作用、波-流相互作用、波浪破碎能量耗散和底摩擦耗散等物理过程时比较合理, 可以应用于较大尺度海区的波浪数值模拟。波浪预报和后报模型WAM和SWAN就是这类模型典型代表。但它们也有共同的缺点, 不能反映由近岸海底地形和建筑物引起的波浪绕射和反射效应, 不利于提高局部区域波浪计算的精度。最近, Booij等^[3-5]通过含有波幅对空间二阶导数的波数这一参量来提高能量平衡方程计算波浪绕射的精度; Mase^[6]则直接将一绕射项加入了能量平衡方程当中, 以此建立的能量平衡方程求解方便, 计算量小, 速度快且数值稳定^[7]。

本文即以此能量平衡方程^[6]为控制方程, 联合考虑浅化、折射、绕射、反射以及破碎等物理过程, 将改进的JONSWAP谱^[8]作为模型的输入谱, 对威海船厂港内随机波传播变形进行数值模拟, 与物理模型试验值^[9]进行比较, 在相同的考虑因素下其结果是令人满意的。

1 考虑绕射作用的能量平衡方程

稳定状态下, 考虑能量耗散项的能量平衡方程为:

$$\frac{\partial(v_x S)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y S)}{\partial y} + \frac{\partial(v_\theta S)}{\partial \theta} = -\varepsilon_b S \quad (1)$$

式中: $S=S(f, \theta)$ 表示方向谱密度函数; ε_b 表示能量耗散系数, 本文根据合田良实^[10]的波浪破碎标准和波高的瑞利分布假设来计算; v_x , v_y 和 v_θ 分别表示波浪沿 x , y 和 θ 方向的传播速度 (θ 为波向与 x

轴正方向夹角), 可用以下公式进行计算:

$$(v_x, v_y, v_\theta) = \left[C_g \cos \theta, C_g \sin \theta, \frac{C_g}{C} \left(\sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] \quad (2)$$

式中: C_g 和 C 分别表示波群速度和相位速度。

由于式(1)没有将波浪的绕射作用包含进来, 为此Mase^[6]利用抛物型波浪模型计算波浪绕射的计算公式, 将其进行适当的变形与演算推导出了能够考虑波浪绕射作用的能量平衡方程, 可将其称为考虑绕射项修正的能量平衡方程, 表示为:

$$\frac{\partial(v_x S)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y S)}{\partial y} + \frac{\partial(v_\theta S)}{\partial \theta} = -\varepsilon_{ds} S + \frac{\kappa}{2\omega} \left[(CC_g \cos^2 \theta \cdot S_y)_y - \frac{1}{2} CC_g \cos^2 \theta \cdot S_{yy} \right] \quad (3)$$

式中: ω 表示角频率; 系数 κ 为自由参数, 通过其改变绕射的影响程度, 经实验取 $\kappa=2.5$ 。

对比式(1)可以看出, 式(3)在其等号右侧较原始能量平衡方程多了一项, 此项可以理解为绕射源项, 用来提高能量平衡方程计算绕射作用的精度。式(3)中的速度 v_x , v_y 和 v_θ 可利用式(2)进行计算。

2 控制方程的离散

本文对控制方程式(3)采用一阶逆风有限差分格式, 对离散后的差分方程组采用高斯-赛德尔理论求解, 从而保证计算的速度和稳定性, 网格系见图1。

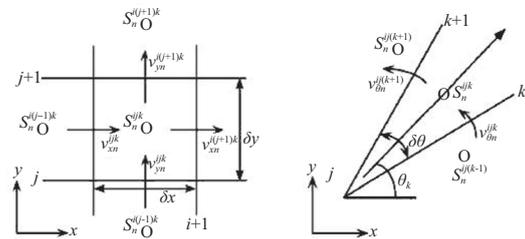


图1 网格系

控制方程离散化后的形式为:

$$A_1 S_n^{jk} + A_2 S_n^{(j-1)k} + A_3 S_n^{(j+1)k} + A_4 S_n^{j(k-1)} + A_5 S_n^{j(k+1)} = -B S_n^{(i-1)k} \quad (4)$$

式中: i, j 分别表示 x 和 y 方向的网格数; n, k 分别表示方向谱离散后的频率数和方向数; 系数

A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 和 B 的表达由Mase^[6]给了具体的描述。

3 模型计算

本文选择威海船厂物理模型试验地形, 对其按试验水位2.38 m时的3种波况按照考虑码头的岸壁反射和消浪后忽略反射分别进行数值计算, 计算区域平面布置见图2。3种波况波浪要素分别为: 波况1, NNW向, 有效波高 $H_s=1.80$ m, 有效周期 $T_s=7.4$ s; 波况2, WNW向, 有效波高

$H_s=1.72$ m, 有效周期 $T_s=6.7$ s; 波况3, W向, 有效波高 $H_s=1.29$ m, 有效周期 $T_s=6.0$ s。

对计算区域进行网格剖分, x 和 y 向网格步长为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 。入射边界条件采用改进的JONSWAP谱。在考虑东侧码头处波浪的反射作用时, 将反射系数设为1.0。在忽略东侧码头处波浪的反射作用时, 将反射系数设为0。将计算结果与试验资料进行比较, 见图3。从图3可以看出, 在考虑码头岸壁反射和忽略反射的情况下, 由于计算所考虑的因素与物理模型试验涉及的因素相符, 使计算值与试验值吻合很好。另外, 由海军工程设计院工程综合试验研究中心的试验现象看出, WNW向和W向的入射波浪均能直接进入港池, 并直射到码头上, 码头面为垂直平面, 对波浪的反射较大, 入射波和反射波相互叠加, 增大了港内的波浪。由于WNW向波浪在港池内的直射区域离直立码头较近, 因此直射在东西、南北两个方向岸壁上产生的反射波较W向反射波大, 经叠加后生成的波浪也较大。而由于防波堤对NNW向的入射波掩护较好, 因此在此方向进入口门的波浪均是由入射波浪经防波堤堤头绕射后产生的, 波高较小。这些因素本模型计算时也都加以合理的考虑, 符合物理模型试验的试验条件, 所以得出了较为理想的计算数据, 说明本模型具有相当的可靠性。

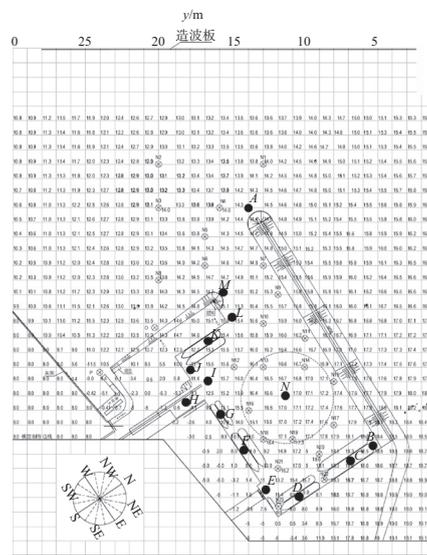
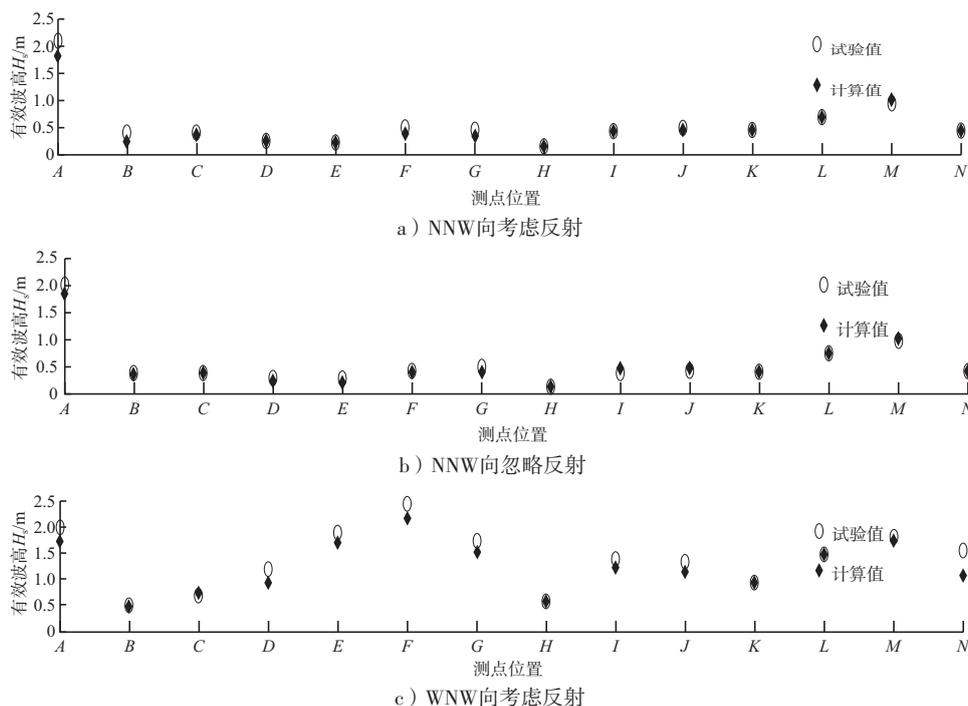


图2 计算区域平面布置



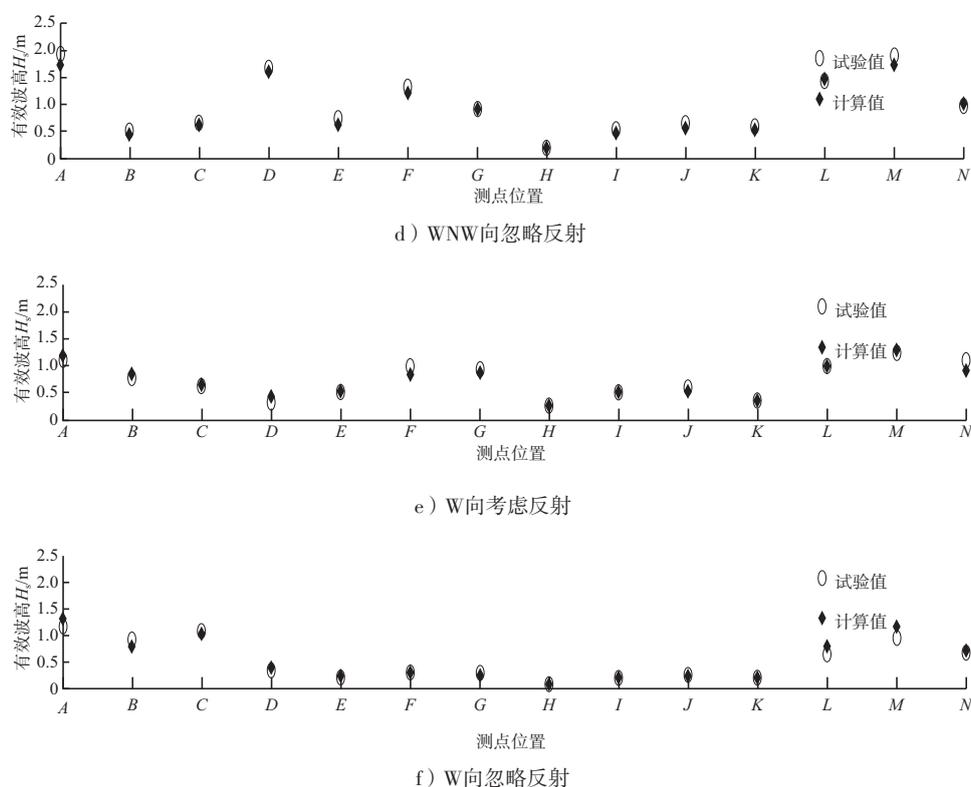


图3 3种波况条件下测点数值计算值与试验值比较

4 结语

本文尝试应用基于能量平衡方程考虑绕射作用的波浪数学模型, 对威海船厂港内随机波传播变形进行数值模拟, 得到了相同考虑因素下数值解与试验值相当吻合的结果。本文的波浪数学模型计算方法较为简单, 速度较快且计算稳定, 模型的应用范围广。可以认为, 利用此数学模型是求解随机波近岸传播变形的又一实用方法。

参考文献:

- [1] 冯芒, 沙文钰, 朱首贤. 近岸海浪几种数值计算模型的比较[J]. 海洋预报, 2003, 20(1): 52-59.
- [2] 李孟国, 张大错. 关于波浪缓坡方程的研究[J]. 海洋通报, 1999, 18(4): 70-92.
- [3] Booiij N, Holthuijsen L H, Doorn N, et al. Diffraction in a spectral wave model[C]. Proc 3rd Int Symp Waves'97. New York: ASCE, 1997: 243-255.
- [4] Rivero F J, Arcilla A S, Carci E. An analysis of diffraction in spectral wave models[C]. Proc 3rd Int Symp Waves'97.

New York: ASCE, 1997: 431-445.

- [5] Holthuijsen L H, Herman A, Booij N. Phase-decoupled refraction-diffraction for spectral wave model[J]. Coastal Eng, 2003, 49: 291-305.
- [6] Mase H. Multi-directional random wave transformation model based on energy balance equation[J]. Coastal Eng J, 2001, 43(4): 317-337.
- [7] 董胜, 冯春明, 张华昌. 日照帆船港港域波高的数值计算[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(5): 995-998.
- [8] Goda Y. A comparative review on the functional forms of directional wave spectrum[J]. Coastal Eng J, 1999, 41(1): 1-20.
- [9] 海军工程设计研究院工程综合试验研究中心. 山东省威海船厂整体搬迁扩建工程水工工程整体波浪物理模型试验报告[R]. 青岛: 海军工程设计研究院工程综合试验研究中心, 2006.
- [10] Goda Y. Deformation of irregular waves due to depth-controlled wave breaking[R]. Kurihama, Japan: Report of the Port and Harbour Research Institute, 1975.

(本文编辑 武亚庆)