

风浪谱模型在苏北辐射沙洲海域的应用研究

李 杰,袁建忠

(上海勘测设计研究院,上海 200434)

摘要 通过分析和比较几种常用的近岸波浪数值模式,选用了基于波能平衡方程和波作用守恒方程的近岸风浪谱模型,建立了苏北辐射沙洲海域的波浪传播计算数值模型,并对苏北辐射沙洲海域的波浪的传播过程进行数值模拟。模型能充分考虑外海波浪在传播的过程中受到风的影响,能够模拟波浪传播过程中的浅水变形、折射、破碎、底摩阻耗散以及由于风能输入、白浪耗散和波波相互作用等引起的能量的输入和转移等多重物理过程。将建立的模型的计算结果与经验公式计算结果进行比较分析,说明波浪在远距离的传播过程中,沿程的底摩阻耗散、风能输入以及波波非线性相互作用等物理现象的影响是不可忽略的,在苏北辐射沙洲海域采用近岸风浪谱数值模型对波浪的传播变形计算较为合适,模型可用于苏北辐射沙洲海域的促淤圈围工程的设计波浪要素的计算。

关键词 辐射沙洲 设计波浪要素 风浪谱模型

中图分类号 TV139.2

文献标识码 A

文章编号 1003-9511(2012)04-0053-04

1 概述

苏北辐射沙洲位于江苏中部近岸浅海区,主要指以东台市 港为中心的江苏中南部海岸,北至射阳河口,南抵后东蒿枝港,南北长约 200 km,东西宽约 140 km。辐射沙脊群海域是潮能和波能较为集中的海域,深槽和浅滩相间,水下地形十分复杂,除部分沙脊掩护外,波浪作用较强,特别是自北至东南面向大海,直接受到从外海传播进来的波浪的袭击。

2 模型的选用

针对苏北辐射沙洲海域的促淤圈围等海岸工程,研究该海域波浪特性与尺度,合理确定工程的设计波浪参数是进行工程前期工作中一个不可缺少的部分。目前较为常用的近岸波浪数值模式主要分为 Boussinesq 方程的数值模型、缓坡方程的数值模型和波能平衡和波作用守恒方程数值模型 3 类^[1-2]。上述几个模型由于各自控制方程对波浪物理过程的描述角度不同,各有其应用领域和固有的局限。Boussinesq 方程^[3-4]的理论推导严密,小范围内计算精度高,但其计算时耗费大量的计算机资源,目前只能应用于较小范围水域,无法计算不规则波方向谱

情形,对波浪的不同能耗途径采用概化处理,无法考虑波波非线性相互作用,虽能描述不同时刻的波高场的分布,但不能合理描述波周期的变化。缓坡方程^[5-7]经过不断的改进和发展后,抛物型缓坡方程可应用于较大范围的波浪数值模拟,但其视波浪为规则波,无法计入波浪内部的非线性能量转移机理,与 Boussinesq 方程类似,不能合理描述波周期的变化。

波能平衡和波作用守恒方程数值模型虽然不能完善地考虑波浪的绕射、反射效应,但是在开敞式海域波浪传播的途径中没有明显的岛屿等掩护现象,绕射效应影响范围有限时,模型能够合理地模拟风能输入、白浪耗散和波-波非线性相互作用等引起的能量的输入和转移的物理过程,能够合理模拟组成波之间的相互作用导致的能量交换和转移而引起的波周期变化。在开敞海域,波浪传播的距离较大时,传播过程中的风能输入、白浪耗散和波-波相互作用等物理过程不可忽略,用此类模型进行波浪传播计算具有一定的优势。由于本次计算的苏北辐射沙洲水域属于开敞海域,海域内并没有明显的岛屿掩护现象,符合波能平衡方程和波作用守恒方程的数值模型的应用领域。因此,在本研究中选用基于波能平衡方程和波作用守恒方程数值模型的 Spectral

Wave 模型^[8] (SW) 进行近岸波浪传播变形计算, 确定该海域的促淤圈围工程的设计波浪要素。

3 模型方程

Spectral Wave 模型采用无结构网格, 能较为高效和精确地模拟工程中岸线曲折多边和岛屿众多的特殊地形。模型根据波作用守恒原理进行波浪传播变形计算, 基本方程如下:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \tag{2}$$

式(1)中 $N(\sigma, \theta)$ 为波作用密度谱; $E(\sigma, \theta)$ 为能量密度谱; σ 为相对频率; θ 为波向角。式(2)中左端第 1 项为波作用量随时间的变化项, 第 2、3 项为波作用量的空间对流项, 第 4 项为由于水深变化和水流作用造成的波作用量在频域上的变化, 第 5 项为折射项, C_x 、 C_y 分别表示波作用在地球空间 (x, y) 中传播时的变化, C_σ 表示由于水深和水流变化造成的相对频率的变化, C_θ 表示由水深和水流引起的折射, S 指能量平衡方程中以谱密度表示的源函数, $S = S_w + S_n + S_d + S_f$, S_w 、 S_n 、 S_d 和 S_f 分别代表由风产生的能量输入、波-波间非线性相互作用、破波耗散和床底损失。近岸风浪谱数值模型对风能输入项、波波非线性相互作用、白帽耗散和底摩阻等都采用国际上最新的先进的理论成果。式中传播速度均采用线性波理论计算:

$$(C_x, C_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{C}_g + \vec{U} \tag{3}$$

$$C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_x d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \tag{4}$$

$$C_\theta = \frac{d\theta}{dt} = - \frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \tag{5}$$

式中: d 为水深; $\vec{U}$ 为流速; k 为波数; s 为沿 θ 方向空间坐标; m 为垂直于 s 的坐标。

4 模型建立

外海波浪从深海传播至 20 ~ 30 m 等深线之前变形较小, 深水条件下的水深变化对波高值的影响较小, 因此, 本次研究中选取模型的东边界位于东经 122°子午线处, 海图水深约 20 ~ 30 m, 北边界至射阳河口附近, 南边界至吕四港附近。采用三角形网格对模型区域进行剖分, 对不同的区域进行多重嵌套加密, 越靠近岸线区域, 网格越密。模型的网格节点数 15 422 个, 网格单元数 29 606 个, 最小网格大小约为 10 m, 准确贴合复杂多变的岸线。外海地形采用

2005 年 10 月第一版中国人民解放军海军司令部航海保证部编制的射阳河口至吕四港海图(图号 12 700)。模型的计算范围和网格示意图如图 1 所示。

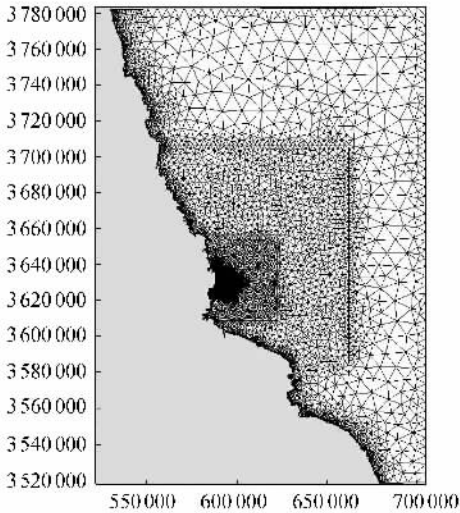


图 1 模型的计算范围和网格示意图

5 模型验证及应用

在本次研究中, 将建立的模型应用于“江苏省条子泥匡围项目导堤及海堤一期工程设计”, 工程区域位于江苏省东台市沿海的条子泥沙洲水域。

5.1 外海波浪要素确定

由于工程区域外海缺乏长期的深水波浪观测资料, 深水风浪计算采用风场间接推算外海波浪要素的方式。首先采用距工程最近的东台市气象站风速观测资料, 并进行海-陆风速订正, 来确定海上设计风速。根据国内相关的研究和验证成果, 莆田试验站公式对于我国沿海地区的深水风浪要素计算具有非常良好的适用性, 因此, 选择莆田试验站公式进行外海深水波浪要素的计算, 莆田试验站公式如下:

$$\frac{g\bar{H}}{V^2} = 0.13 \tanh \left[0.7 \left(\frac{g\bar{d}}{V^2} \right)^{0.7} \right]$$

$$\tanh \left\{ \frac{0.0018 \left(\frac{gF}{V^2} \right)^{0.45}}{0.13 \tanh \left[0.7 \left(\frac{g\bar{d}}{V^2} \right)^{0.7} \right]} \right\} \tag{6}$$

$$\frac{g\bar{T}}{V} = 13.9 \left(\frac{g\bar{H}}{V^2} \right)^{0.5} \tag{7}$$

式中: F 为对岸风区长度; V 为计算风速; $\bar{H}$ 为平均波高; $\bar{T}$ 为平均波周期; g 为重力加速度; $\bar{d}$ 为平均水深。

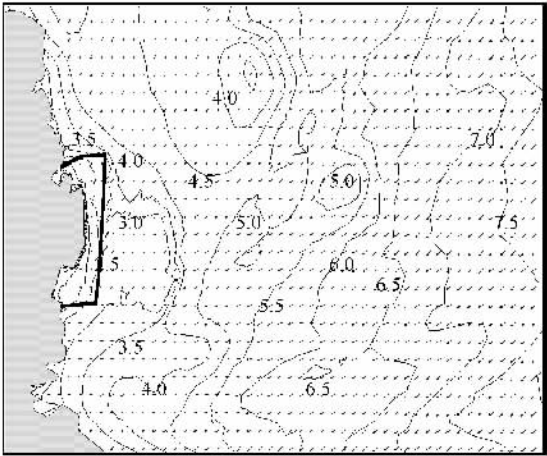
根据公式计算的 50 年一遇重现期的外海波浪要素如表 1 所示。

表 1 50 年一遇重现期的外海波浪要素

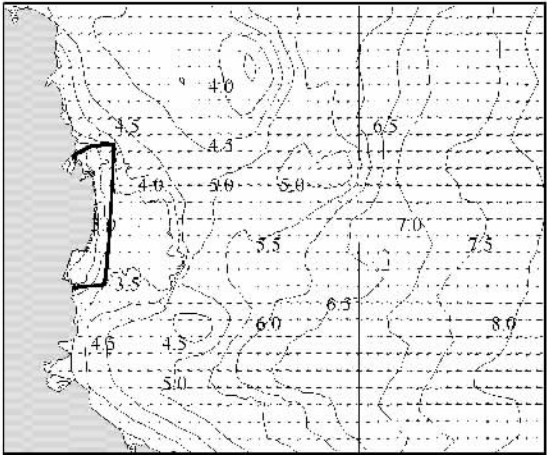
方向	H/m	T/s	方向	H/m	T/s	方向	H/m	T/s
NE	4.85	9.77	SE	4.16	9.05	E	4.99	9.91

5.2 计算结果及验证分析

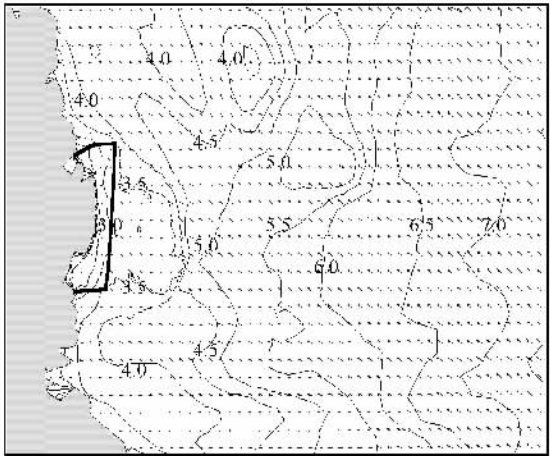
为确定工程所需的堤前设计波浪要素,本次研究计算了 3 个不同来袭方向下的波浪在苏北辐射沙洲海域内的传播过程,模型计算的 50 年一遇重现期的有效波高波向矢量图如图 2 所示。



(a) NE 方向



(b) E 方向



(c) SE 方向

图 2 50 年一遇重现期有效波高等值线和波向量图

为分析模型计算成果的合理性,需对计算成果进行验证分析。本文选用国家《堤防工程设计规范》推荐的莆田试验站公式进行风浪计算和波浪浅水变形计算公式进行波浪浅水变形计算,换算至堤前浅水设计波要素,与模型计算结果进行对比分析,验证模型计算结果的合理性。波浪浅水变形计算公式为:

$$H = K_s \times H_0 \tag{8}$$

$$K_s = \left[th \frac{2\pi d}{L} \left(1 + \frac{4\pi d}{sh \frac{4\pi d}{L}} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \tag{9}$$

式中: H 为堤前波高; H_0 为深水波高; K_s 为浅水变形系数; L 为波长; d 为水深。

选取的验证点的 50 年一遇重现期的堤前设计波浪要素对比结果如表 2 所示。

表 2 验证点的堤前波浪要素验证成果

计算模式	验证点	H_s/m	T/s	L/m
本文模型	北围堤堤头北侧	2.91	7.13	46.55
	南围堤堤头南侧	2.56	5.63	38.88
经验公式	北围堤堤头北侧	2.97	6.33	45.20
	南围堤堤头南侧	2.51	5.87	37.05

由表 2 可知,本文模型计算的堤前波高值与经验公式计算的堤前波高值基本接近,波周期结果稍有差距,这是由于经验公式无法考虑波浪折射、沿程底摩阻耗散、风能输入以及波浪传播过程中的波波非线性相互作用和外海涌浪输入等物理现象的影响,而这些物理现象在风能作用下的大范围的波浪传播过程中是不可忽略的,组成波之间强烈的非线性相互作用导致的能量的交换和转移也是波周期变化的重要原因之一。

综上所述,本次研究中建立的苏北辐射沙洲波浪模型综合考虑了沿程的风能输入、底摩阻影响、白浪耗散和波-波非线性相互作用等物理现象,能够应用于苏北辐射沙洲海域复杂地形条件下的波浪的计算。

6 结 语

苏北辐射沙洲海域属于开敞式海域,波浪传播区域内没有明显的岛屿掩护现象。笔者选用了基于第三代海浪预报模型的风浪谱模型建立了该海域的波浪传播计算模型,对波浪的传播过程进行了模拟,模型能够充分考虑波浪传播过程中风能输入、波-波非线性相互作用、底摩阻耗散和波浪破碎等物理过程,能较全面地模拟波浪在传播过程中发生的风浪成长、浅水变形、折射和破碎等现象。从模型计算的结果和经验公式的计算结果的对比来看,外海的波浪在传播至海岸处时,受水下地形和沿程风场的影

响,沿程波浪场变化显著,特别是波周期的变化较为明显,说明波浪在苏北辐射沙洲海域的传播过程中,沿程底摩阻耗散、风能输入以及波浪传播过程中组成波之间能量交换转移和耗散等非线性效应的影响不可忽略,采用近岸风浪谱数值模型在本工程海域对波浪的传播计算较为合适,模型可用于苏北辐射沙洲海域的促淤圈围工程的设计波浪要素的计算。

参考文献：

[1] 潘丽红,刘新成,冯卫兵.近岸风浪谱模型在青草沙水库波浪计算中的应用[C]//长江口青草沙水源地建设指挥部.上海长江口青草沙水源地原水工程论文集.上海:上海科学技术出版社,2011.

[2] 严以新,徐福敏,茅丽华.一种新型的数值模拟近岸波浪的动谱平衡方程模型[J].科学通报,2001,46(1):73-77.

[3] 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.

[4] 李梦国,王正林,蒋德才.近岸波浪传播变形数学模型的研究与进展[J].海洋工程,2002,20(4):43-47.

[5] 李梦国,蒋德才.关于波浪缓坡方程的研究[J].海洋通报,1999,18(4):70-92.

[6] KIRBY J T, DALRYMPLE R A. Modelling waves in the surfzones and around islands [J]. Journal of Waterway, Port, Coast and Ocean Engineering, ASCE, 1986, 112(1): 78-93.

[7] KIRBY J T. A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography [J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(C1): 745-747.

[8] DHI Water & Environment. Mike 21 Spectral Wavers Module Scientific Documentation [M]. Denmark: Danish Hydraulic Institute, 2007.

(收稿日期 2012-03-15 编辑 陈玉国)

(上接第 52 页)

动流速低,在强劲的涨潮流作用下,易于运动,以悬移质和推移质形式向辐射沙脊群中心运动。条子泥水域部分时间内涨潮流强劲,而床沙易于起动,这是条子泥潮沟变动频繁的原因之一。

3 结 论

辐射沙脊群海域的水流在各水道一般均表现为往复流特征,只有在靠近南黄海外海的烂沙洋北水道流速表现为旋转流特征。夏季和冬季的特征基本一致。从总体上来看,从外到内,水深变幅增加,即潮差变大,涨急流速也逐渐增大,一般涨急流速大于落急流速,反映了能量向辐射沙脊中心辐聚的特征。夏季与冬季相比较,两者的水动力条件和特征基本一致,但夏季的水动力比冬季更强劲,水深变幅更大。

夏季的含沙量要小于冬季的含沙量,大潮的含沙量大于小潮的含沙量。夏季的含沙量为 $0.301 \sim 0.394 \text{ kg/m}^3$,冬季的含沙量为 $0.482 \sim 0.635 \text{ kg/m}^3$ 。夏季的悬沙颗粒比冬季的悬沙颗粒要粗,大潮的悬沙颗粒比小潮的悬沙颗粒要粗,但总的说来悬沙颗粒均较细,一般为 $0.0072 \sim 0.0120 \text{ mm}$,总平均 0.0094 mm 。夏季的床沙颗粒比冬季的床沙颗粒要细,夏季床沙颗粒为 $0.0652 \sim 0.0850 \text{ mm}$,冬季床沙颗粒为 $0.1353 \sim 0.1461 \text{ mm}$ 。条子泥水域部分时间内涨潮流强劲,而床沙易于起动,这是条子泥潮沟变动频繁的原因之一。

江苏条子泥水域泥沙运动极大可能存在两种形式的泥沙运动,一种是颗粒较细的泥沙,在潮流和波

浪等作用下,通常悬浮于水中,只有在局部水动力发生较大变化后,部分泥沙发生冲刷和淤积现象;另一种是颗粒较粗的泥沙,在强大的涨潮流作用下,以悬移质和推移质形式向辐射沙脊群中心运动。

涨潮时西大港由北向南运动的水流在部分时间内较为强劲,并且流线弯曲,易引起冲刷,应加强条子泥一期东侧堤部分堤段的保护。

江苏沿海辐射沙脊群中心区潮流、泥沙运动复杂,基础研究薄弱,无统一基面的水下地形,应进一步加强基础研究,包括潮流、泥沙、波浪等的资料收集、现场观测、泥沙基本参数的研究等。

参考文献：

[1] 王颖.黄海陆架辐射沙脊群[M].北京:中国环境科学出版社,2002:64-90.

[2] 丁贤荣,康彦彦.辐射沙脊群条子泥动力地貌演变遥感分析[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(2):231-236.

[3] 张长宽,张东生.黄海辐射沙洲波浪折射数学模型[J].河海大学学报:自然科学版,1997,25(4):1-7.

[4] 陶建峰,张长宽.黄海辐射沙脊群海域水环境数值模拟研究[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(4):472-475.

[5] 张旭锋,李瑞杰,薛东,等.渗透法在苏北辐射沙脊群海域潮流计算中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(3):390-395.

[6] Delft Hydraulics. Delft3D-flow user manual[EB/OL]. [2008-01-01]. <http://www.wldelft.nl/soft/intro/index.html>.

(收稿日期 2012-03-20 编辑 张志琴)