



江苏沿海实测波浪谱在 SWAN 中的应用

高加政，冯卫兵，吴 迪

(河海大学 港口海岸与近海工程学院，江苏 南京 210098)

摘要：采用 CCMP 提供的寒潮大风天气风场数据，分别运用实测波浪谱和 JONSWAP 谱的 SWAN 模型对江苏沿海北部波浪场进行模拟，发现采用实测谱的计算结果与实测值更接近，模拟出的波高随时间变化过程更吻合。应用实测谱对工程区域进行波浪场推算，得到了合理的结果。

关键词：江苏沿海；波浪场；SWAN 模型；实测波浪谱

中图分类号：TV 139.2 文献标志码：A 文章编号：1002-4972(2015)12-0036-05

Application of SWAN model combined with measured wave spectrum of Jiangsu coast

GAO Jia-zheng, FENG Wei-bing, WU Di

(College of Harbor Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To simulate the wave in coastal areas of Jiangsu more accurately, this paper combines the measured wave spectrum of north Jiangsu with the SWAN model. In the case of cold wave weather, with the wind field data provided by CCMP, we simulate the wave field in coastal areas of north Jiangsu using the measured wave spectrum and spectrum by default respectively. The result demonstrates that the simulation with measured wave spectrum is in good agreement with the observed data. Calculating the wave field of the engineering region in Jiangsu province using the measured wave spectrum of north Jiangsu, we get the reasonable result.

Keywords: Jiangsu coast; wave field; SWAN model; measured wave spectrum

随着江苏沿海的大开发，该区域的波浪研究也越来越受到关注。有很多学者运用 SWAN 模型模拟江苏沿海的波浪场。范飞^[1]在 SWAN 模型中加入潮流研究了连云港、滨海、大丰、洋口 4 个区域月平均波高变化情况；李孟国^[2]模拟了“9711”号台风过程中西太阳沙人工岛附近的波浪场；《江苏沿海风浪场、潮位和风暴潮研究》报告中运用 SWAN 模式，得到了江苏沿海的风浪要素，并推算出了吕四港和滨海六合庄附近的设计波浪要素；谭凤^[3]采用 WRF 大气模型计算出了台风“韦帕”的风场，将计算出的风场数据提供给 SWAN 模型进行波浪场模拟，并将模拟结果与在连云港附近海域的实测资料对比，表明 WRF 模型

和 SWAN 模型结合能提高“韦帕”台风过程中波浪模拟的精度。

虽然在江苏沿海南部海域 SWAN 模型已有广泛的应用，但在北部海域 SWAN 模型研究的较少，还需要模拟寒潮和台风等天气下北部海域的波浪场。此外，前人运用 SWAN 模型计算江苏沿海风浪场时采用的是模型中默认的 JONSWAP 谱，虽然 JONSWAP 谱得到广泛应用，但 JONSWAP 谱是基于北大西洋北海的波浪实测资料得出的，北海的地形与江苏沿海的地形有很大的差异，JONSWAP 谱是否适合江苏沿海地区的波浪场计算有待进一步研究和探讨。同时，为了江苏沿海大开发的需要，江苏沿海北部、南部已经有了波浪长期连续的观

收稿日期：2015-05-21
作者简介：高加政（1991—），男，硕士研究生，从事波浪水动力研究。

测, 杨斌^[4]根据多年的北部、南部波浪实测资料已经提出了江苏沿海北部、南部的实测波浪谱。

本文采用江苏沿海北部实测波浪谱替代 SWAN 模型中的 JONSWAP 谱, 模拟寒潮下的江苏沿海北部波浪场, 并与实测波浪数据和采用 JONSWAP 谱的计算结果对比, 分析实测谱与 SWAN 模型结合应用的精度。然后模拟了连云港徐圩新区达标尾水排海工程区域的波浪场。

1 SWAN 模型控制方程

SWAN 模型采用二维动谱密度 $N(\sigma, \theta)$ 来描述随机波浪场。动谱平衡方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}C_xN + \frac{\partial}{\partial y}C_yN + \frac{\partial}{\partial \sigma}C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

式中: 等式左边第 1 项为波浪作用量在时间上的变化, 第 2 项和第 3 项为波浪作用量在二维空间上的传播, 第 4 项为频移, 第 5 项为水深和流所导致的波浪折射; 等式右边 S 为能量的源汇项, 包括了风能输入、波与波的非线性相互作用和由于底摩擦、白浪破碎等引起的能量耗散。其中 C_x 、 C_y 、 C_σ 、 C_θ 分别为 x 、 y 、 σ 、 θ 空间的波浪传播速度:

$$C_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x \quad (2)$$

$$C_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y \quad (3)$$

$$C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla d \right] - C_g \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s} \quad (4)$$

$$C_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial m} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right] \quad (5)$$

式中: $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$ 为波数, $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$; d 为水深; $\mathbf{u} = (u_x, u_y)$ 为流速; s 为沿 θ 的空间坐标; m 为垂直于 s 的坐标; 相对频率 $\sigma = \mathbf{k} \cdot \mathbf{U} + \omega$, ω 为波浪的固有频率; 算子 $\frac{d}{dt}$ 定义为 $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{C}_g \cdot \nabla$, $\mathbf{C}_g$ 为波群速度。

2 江苏沿海北部实测波浪谱

杨斌^[4]根据江苏沿海南部测点 1 a 多的波浪实测数据进行快速傅里叶变换和无量纲化后拟合出了江苏南部海域实测谱, 同时根据北部 3 a 多的波

浪实测资料拟合出了北部海域实测谱。

北部谱的公式为:

$$S(\mu) = \begin{cases} \frac{M_{01}}{I_e(\gamma)} \mu^{-4} \exp\left[-\frac{5}{4} \mu^{-4}\right] \gamma_e \exp\left[-\frac{(\mu-1)^2}{2\lambda^2}\right] + \\ C_1 (M_{02} f'_{02}) \mu_1^{-C_2} \exp\left[-\left(\frac{C_2}{C_3}\right) \mu_1^{-C_3}\right] & \mu < 1 \\ \frac{M_{01}}{I_e(\gamma)} \mu^{-4} \exp\left[-\frac{5}{4} \mu^{-4}\right] \gamma_e \exp\left[-\frac{(\mu-1)^2}{2\lambda^2}\right] & \mu \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mu = f/f_{01}$; $\mu_1 = \mu/f'_{02}$; f_{01} 为高频谱峰频率; f'_{02} 为无量纲低频谱峰频率; M_{01} 为高频峰所占谱能量; M_{02} 为低频峰所占能量; 且有 $M_{01} + M_{02} = 1$ 。其他参数取值见表 1。

表 1 北部谱的拟合参数

相对水深	高频段		低频段		
	γ_e	$I_e(\gamma)$	C_1	C_2	C_3
深水	2.7	0.339	5.02	3.8	2.2
浅水	2.38	0.325	4.01	4.0	2.9

3 北部实测谱在寒潮中的应用

寒潮是来自北方的南下冷空气, 在冷气团峰面后的沿途地区出现剧烈大风、雨雪天气, 并伴有大幅降温。虽然寒潮来临时风速比台风小很多, 一般沿海海面风力可达 8 级、阵风 9~10 级, 但是大风持续时间长, 通常为 3~4 d, 因此对港口、海岸工程造成的影响不可忽视。

选取发生在江苏沿海北部的一次寒潮“10·12”, 寒潮风场数据记录时间为 2010-10-12—2010-10-16, 由 CCMP 提供。Atlas^[5]通过试验证明, CCMP 能够满足海洋研究的需要。张鹏^[6]用渤海的实测风速与 CCMP 提供的风速对比, 表明 CCMP 提供的风速与实测风速接近, 可以用来作为 SWAN 模型中的输入风场。

3.1 模型的建立

在非静态模式中采用球坐标系, 海面初始状态假设为静止状态, 计算区域见图 1, 采用模型的自嵌套功能, 计算域分为两个大小不同的区域—I 区和 II 区。其中 I 区的范围为东经 119°00′~123°00′、北纬 33°00′~35°45′, II 区的范围为东经 119°00′~121°00′、北纬 34°00′~35°30′。对要

跨过陆地边界的波浪，陆地边界设置为全吸收。

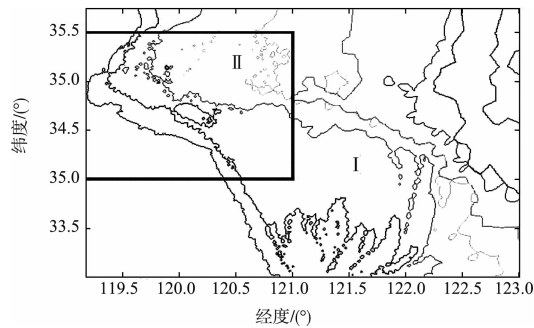


图 1 北部海域计算区域

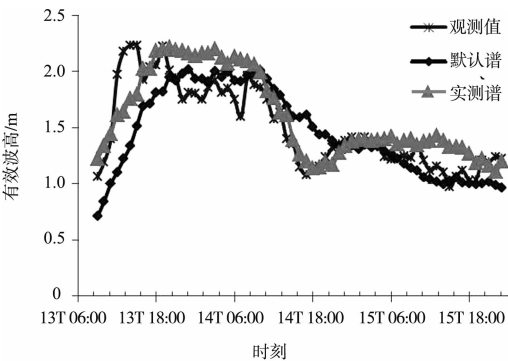
在应用北部实测波浪谱时，Ⅱ区的入射边界由Ⅰ区计算得出的有效波高值按式(6)换算成北部实测谱，其他的参数由Ⅰ区输出的谱文件做成新的谱文件作为Ⅱ区的入射边界。为了与 SWAN 默认模式下的 JONSWAP 谱的模拟结果作比较，运用默认谱时，Ⅰ区的波要素作为Ⅱ区的入射边界；其余的参数设置全部一样。

3.2 模拟结果比较

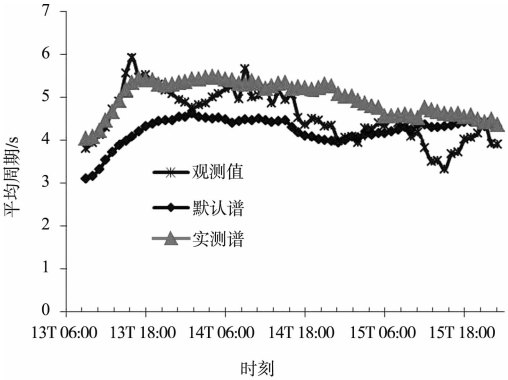
将分别采用默认谱和实测谱输出的有效波高、平均周期与实测值进行比较。比较结果见图 2，统计分析结果见表 2。实测值来自 SBF3-1 型波浪浮标实测波浪数据，采集时间从 2009 年 7 月开始。测点位于江苏响水海域，经纬度为 34°26.2'N、120°06.0'E，该测点所在水域的平均水深为 7.6 m。

有效波高/m				平均周期/s			
COR		RMSE		COR		RMSE	
实测谱	默认谱	实测谱	默认谱	实测谱	默认谱	实测谱	默认谱
0.85	0.70	0.22	0.30	0.71	0.32	0.58	0.66

注：研究对象为 2010 年 12 月寒潮。COR 为相关系数，RMSE 为均方差。



a) 有效波高



b) 平均周期

图 2 2010 年 12 月寒潮两种谱模拟值与实测值比较

从图 2a) 来看，采用默认谱模式计算出的有效波高虽然随时间变化的趋势与实测波高也符合较好，但采用北部实测谱模式计算出的有效波高与实测值结果更接近，相关性更强，均方差更小；波高从小变大的过程中，实测谱模拟出的波高与实测波高随时间变化的过程吻合得更好；波高从大变小的过程中，实测谱模拟出的波高相对于默认谱模式，能迅速反映实际变化过程。在运用实测谱后寒潮有效波高的均方根误差减小 26%，因此采用实测谱对有效波高的模拟有较大的改进。

对于平均周期的比较，无论采用何种谱，SWAN 模拟出的结果没有有效波高的结果好。但相对默认谱，使用实测谱对平均周期的模拟还是有很大改进，相关性系数得到显著提高，均方根误差也有显著的减少。在运用实测谱后寒潮平均周期的均方根误差减少 12%。

4 江苏沿海北部工程应用实例

4.1 工程概况

连云港徐圩新区达标尾水排海工程位于江苏省连云港市徐圩镇，东南距灌河口约 23 km，往北离连云港港区约 30 km。排海位置初选有 5 个点，其中 3 个位于建设中的徐圩港区以北 -10 m 等深线附近，另外 2 个在埭子口海洋特殊利用区，具体位置见图 3。波要素的大小是决定深海排放口方案、水泵扬程及喷洒结构等建筑物的重要因素，直接影响到工程投资。因此需要针对排放口的布置方案进行波浪场计算分析，为工程设计提供依据。

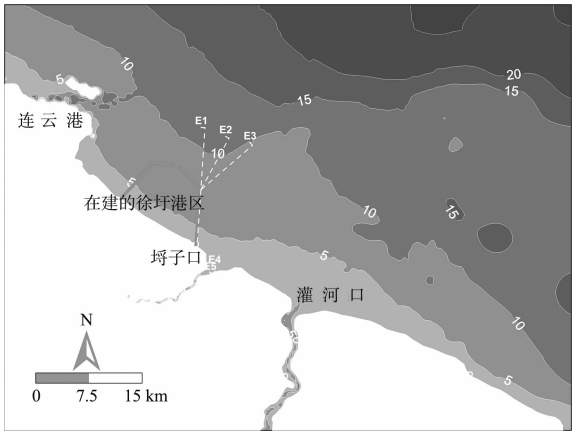


图 3 连云港徐圩新区达标尾水排海位置

4.2 外海深水波要素的确定

连云港海洋站有 1960—2003 年实测波高($H_{1/10}$)资料,但考虑到测点位于经纬度 $34^{\circ}47'N$ 、 $119^{\circ}26'E$ 的位置,离岸较近,且测点处水深较浅对波高有一定的影响,所以在确定外海波要素时,未直接利用连云港多年的实测各波向的年极值波高($H_{1/10}$)资料直接进行频率分析计算,得到不同重现期的设计波高。而是首先应用实测风速资料进行频率分析,求出不同重现期的设计风速,再利用风成浪的波高计算经验公式间接推算深水处的同频率设计波要素。利用连云港海洋站 1974—2003 年

实测风速进行计算,确定外海波浪要素结果见表 3。

表 3 连云港站由风速推求波高结果 ($\bar{H}$) m				
方向	重现期/a			
	100	50	20	10
N	3.35	3.21	2.99	2.78
NNE	3.17	3.10	2.88	2.75
NE	3.11	2.99	2.79	2.61
ENE	3.22	3.03	2.75	2.54
E	3.21	3.00	2.70	2.47
WNW	3.11	2.91	2.64	2.43
NW	3.15	3.00	2.74	2.50
NNW	3.20	3.01	2.81	2.65

4.3 设计波要素计算

计算时采用直角坐标系下的矩形网格,计算中波向采用 N、NE、E、NNW 等 4 个主波向,分别就不同重现期、不同潮位和不同波浪方向进行波浪传播变形计算。SWAN 模型计算中,采用北部实测波浪谱,并将表 3 波浪要素作为 SWAN 模型的人射边界条件,边界处为 -25 m 等深线。这样对不同工况进行计算,得到工程区的设计波浪要素,并将设计高水位与 100 a 一遇波浪组合条件下的结果列于表 4。

表 4 工程前沿设计波要素 (设计高水位 + 100 a 一遇波浪)

计算方向	计算位置	海底高程(理基)/m	$H_{1\%}/\text{m}$	$H_{5\%}/\text{m}$	H_s/m	$\bar{H}/\text{m}$	波长/m	周期/s
N	E_1	8.5	4.93	4.11	3.49	2.27	70.16	7.17
	E_2	8.5	4.89	4.08	3.46	2.25	69.71	7.14
	E_3	8.5	4.89	4.08	3.46	2.25	69.71	7.14
	E_4	-0.9	3.96	3.32	2.94	2.08	47.02	6.86
	E_5	-1.2	3.75	3.75	2.90	2.07	45.84	6.85
NE	E_1	8.5	5.01	4.17	3.55	2.31	71.06	7.23
	E_2	8.5	4.99	4.16	3.53	2.30	70.84	7.22
	E_3	8.5	4.99	4.16	3.53	2.30	70.84	7.22
	E_4	-0.9	3.96	3.38	3.00	2.13	47.68	6.95
	E_5	-1.2	3.75	3.75	2.95	2.11	46.35	6.91
E	E_1	8.5	4.60	3.82	3.24	2.10	66.22	6.90
	E_2	8.5	4.60	3.82	3.24	2.10	66.22	6.90
	E_3	8.5	4.64	3.86	3.27	2.12	66.70	6.93
	E_4	-0.9	3.96	3.05	2.68	1.87	44.14	6.51
	E_5	-1.2	3.04	2.61	2.28	1.56	38.71	5.95
NNW	E_1	8.5	4.22	3.50	2.96	1.91	61.59	6.58
	E_2	8.5	4.20	3.48	2.95	1.90	61.34	6.56
	E_3	8.5	4.22	3.50	2.96	1.91	61.59	6.58
	E_4	-0.9	3.28	2.82	2.47	1.70	41.67	6.21
	E_5	-1.2	2.93	2.51	2.18	1.49	37.63	5.81

从表 4 可以看出,在设计高水位时,100 a 一遇的 NE 向的波列累积频率为 1% ($F=1\%$) 的波高达 5.01 m(E_1 点)。考虑到附近观测站距工程区有段距离,且水深有变化,不宜直接利用实测海浪资料进行验证,在此用相关工程中推算的数据进行验证。南京水利科学研究院 2014 年完成的《连云港市连岛中心渔港波浪数模计算》中设计高水位与 100 a 一遇波浪组合的 NNE 向的波列累积频率为 1% ($F=1\%$) 的波高为 5.30 ~ 5.40 m。本工程与其工程的地理位置相比,距离深水区相对较为远一些,本工程前沿的波高与此相比小 4% ~ 5%,是合理可信的。

5 结语

本文采用 SWAN 模型自嵌套的方法,将实测江苏沿海北部波浪谱作为入射边界,模拟了江苏沿海北部寒潮期间的风浪场,将模拟结果与近岸的实测资料进行对比分析,结果表明模拟出的有效波高比采用模型中默认的 JONSWAP 谱模拟出的结果与实测值符合得更好,也能更好地反映出波高的变化过程,并且显著提高了相关性系数,大大降低了均方根误差。采用实测谱对平均周期的模拟结果也有显著提升,但效果没有波高的模

拟好。

将北部实测谱运用到连云港徐圩新区达标尾水排海工程设计波要素计算中,经过与南京水利科学研究所 2014 年完成的《连云港市连岛中心渔港波浪数模计算》中确定的相关组合的设计波要素比较,计算结果是合理可信的。

参考文献:

[1] 范飞,朱志夏,梁丙臣. 江苏海域波浪数值模拟研究[J]. 海洋湖沼通报,2014(3): 22-28.

[2] 李孟国,杨树森,韩西军. 辐射沙洲海域深水港开发建设水动力泥沙问题研究[J]. 水运工程,2011(4): 1-8.

[3] 谭凤,张庆河,庞启秀,等. 基于 WRF-SWAN 模式的韦帕台风波浪场模拟[J]. 水道港口,2012,33(1): 14-18.

[4] 杨斌. 江苏辐射沙洲两翼波浪特性研究[D]. 南京: 河海大学,2014.

[5] Atlas R, Ardizzone J, Hoffman R N. Application of satellite surface wind data to ocean wind analysis[C] //International Society for Optics and Photonics. Optical Engineering Applications, 2008.

[6] 张鹏,陈晓玲,陆建忠,等. 基于 CCMP 卫星遥感海面风场数据的渤海风浪模拟研究[J]. 海洋通报,2011,30(3): 266-271.

(本文编辑 武亚庆)

~~~~~  
( 上接第 35 页 )

3) 耦合法是在波浪断面试验结果验证的基础上,采用波浪数学模型,选取合理的波浪破碎指标和波浪能量耗散参数,直接模拟围区内的波浪分布,计算中考虑了越浪波高传递至龙湾二期堤前的沿程衰减、波浪相互作用时的能量损耗等因素,堤前设计波浪要素更符合实际,可作为海堤设计的依据。

4) 瓯飞一期主堤施工至 4.0 m 高程,断面结构均稳定,只有堤后方闭气土被越浪水体冲刷,并未造成堤身结构性的损坏,瓯飞一期主堤施工至 5.0 m 高程,龙湾二期海堤能满足 50 a 一遇的设计要求。综合考虑工程安全、投资和瓯飞一期的建设进度,龙湾二期可以不采取加高加固措施。

参考文献:

[1] Goda. Re-analysis of Laboratory Data on Wave Transmission over breakwaters [R]. Japan: PHRI, 1969: 3-18.

[2] 杨正己,贺辉华,潘少华. 波浪作用下抛石堤的稳定性及消浪特性[J]. 水利水运科学研究,1981(3): 34-45.

[3] Van der Meer J W, Angremond K. Data on wave transmission due to overtopping [J]. Institution of Civil Engineers, 1992(2): 25-41.

[4] 邹红霞,陈国平. 不规则波作用下潜堤透射系数的计算方法及统计分布[J]. 水运工程,2010(3): 11-16.

( 本文编辑 武亚庆 )