

潮汐风暴潮中波浪对表面风应力系数的影响

林 祥¹,尹宝树²

(1.河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室,江苏 南京 210098 ;2.中国科学院海洋研究所,山东 青岛 266071)

摘要 利用依赖波浪成长状态波龄在表面风应力作用下的潮汐风暴潮数值模式,对渤海 2 个风过程个例引起的水位做了数值模拟研究,并给出了波浪作用下表面风应力系数大小的定量计算.个例 1 数值模拟结果表明,在最大风速时,考虑波浪作用的表面风应力数值是不考虑波浪作用时的 1.5 倍,相应的水位比不考虑波浪作用时的结果增大 16 cm,与实测值更加吻合.个例 2 的计算结果也得到了类似结论,表明在进行潮汐风暴潮数值模拟时,必须考虑波浪的作用.

关键词 波浪;潮汐风暴潮;风应力系数;数学模型

中图分类号:P731.22 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2007)06-0714-04

目前,国内外对潮汐风暴潮的研究已经取得了很大的进展,尤其是随着电子计算机的广泛使用,我国近几年潮汐风暴潮的数值研究发展极快^[1-5],这对于了解潮汐风暴潮的机制和预报、海岸工程建筑、海上石油开发具有很大的理论价值和现实意义.但在实际应用中,人们往往单纯地使用潮汐风暴潮数学模型来进行模拟,没有考虑波浪对潮汐风暴潮的影响.事实上,波浪、潮汐风暴潮是互相作用、互相影响的.国际上开展波浪和潮汐风暴潮相互作用的数值研究始于 1988 年,Wolf 等^[6]首先就波浪和风暴潮的相互作用进行了数值研究,后来 Tolmann 等^[7-9]也对波浪和潮汐风暴潮相互作用的不同方面进行了研究,得到了一些初步的有一定价值的结果.目前,有关波浪和潮汐风暴潮相互作用的研究仍然是近岸海洋动力学研究的前沿方向.本文通过一个适合浅海的波浪和潮汐风暴潮相互作用的数值模式,来研究波浪对表面风应力系数的影响,并结合渤海的 2 个风过程个例,给出了波浪影响表面风应力系数大小的量级估计.

1 波浪和潮汐风暴潮耦合作用的数值模式

1.1 波浪数值模式

本研究采用波浪数值模式(YWE-WAM 模式)^[10]计算波浪场.

波浪场初始条件: $t = 0$ 时, F 取为 JONSWAP 谱.

开边界条件:采用能量驱动方法模拟涌浪的传入,即在开边界处假定波浪已达充分成长状态,输入相应风速的 PM 谱值.

1.2 潮汐风暴潮数值模式

在笛卡儿直角坐标系下,平面二维非恒定流基本方程可近似表达如下:

连续方程为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(h + \zeta)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(h + \zeta)v] = 0$$

(1)

动量方程为

$$\frac{du}{dt} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\tau_{ax} - \tau_{bx}}{h + \zeta} + A_x \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

(2)

$$\frac{dv}{dt} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\tau_{ay} - \tau_{by}}{h + \zeta} + A_y \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

(3)

式中： u, v ——流速在 x, y 方向的分量； t ——时间； $f = 2\omega \sin \varphi$ ， ω 为地球自转角速度， φ 为地理纬度； g ——重力加速度； ζ ——潮位； ρ ——海水密度； τ_{ax}, τ_{ay} ——表面风应力在 x, y 方向的分量； τ_{bx}, τ_{by} ——底应力在 x, y 方向的分量； h ——平均海平面以下的水深； A_x, A_y ——侧向涡动黏性系数。

初始条件为： $\zeta(x, y, 0) = 0, u(x, y, 0) = 0, v(x, y, 0) = 0$ 。边界条件：陆域边界条件（闭边界）有 $v \cdot n = 0$ ；水边界（开边界）给出各点的潮位值。

1.3 风应力计算

在不考虑波浪的作用下，一般按式（4）计算表面风应力：

$$\tau = \rho_a C_d |u_{10}| u_{10} \tag{4}$$

其中
$$C_d = \lambda \left(\frac{0.4}{14.86 - 2 \ln |u_{10}|} \right)^2$$

考虑波浪作用的表面风应力计算公式为

$$\tau = \rho_a C_d |u_{10}| u_{10} \tag{5}$$

其中
$$Z_0 = 3.7 \times 10^{-5} \frac{|u_{10}|^2}{g} \left(\frac{C_p}{|u_{10}|} \right)^{-0.9} \quad C_d = \lambda \left(\frac{0.4}{\ln 10 - \ln Z_0} \right)^2$$

式中： u_{10} ——10 m 高度处风速； ρ_a ——空气密度； C_d ——风应力系数； Z_0 ——粗糙度； C_p ——波浪峰频对应的波速； λ ——系数，在本文中取 $\lambda = 1.0^{[11]}$ 。

1.4 底应力计算

当不考虑波流相互作用时，底应力可以直接利用公式（6）计算。

$$\begin{cases} \tau_{bx} = \frac{\rho u \sqrt{u^2 + v^2}}{(h + \zeta) C^2} \\ \tau_{by} = \frac{\rho v \sqrt{u^2 + v^2}}{(h + \zeta) C^2} \end{cases} \tag{6}$$

式中 C 为谢才系数。

1.5 计算方法和实现过程

本文采用“ADI”法进行数值模拟。模拟计算区域为渤海地区（117°38'E ~ 122°30'E，37°6'N ~ 41°54'N），见图 1。空间步长取为 $2' \times 2'$ ；受 CFL 条件限制，时间步长取为 120 s。首先在风场来临前 4 d 进行潮汐的模拟，得到稳定的潮汐后加上风应力项进行数值模拟，得到水位与流速，然后将水位和流速输入到波浪模式，进行下一时间步的波浪场数值模拟。利用计算得到的波参数可以计算出表面风应力系数，将计算得到的表面风应力系数代入潮汐风暴潮数值模式，得到新的水位、流速，然后再把水位、流速代入波浪模式进行计算，如此进行下去，直到风过程结束，得到考虑波浪和潮汐风暴潮相互作用机制下的波高、水位和流速等参数。

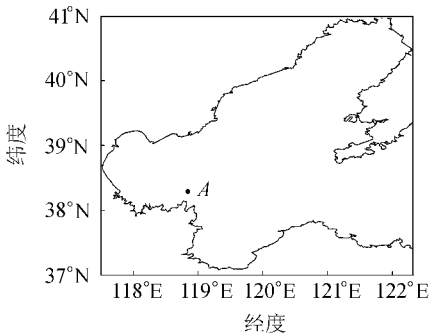


图 1 渤海计算区域与实测点 A
Fig.1 Calculation region of Bohai Sea and location of test point A

2 数值模拟结果

模拟计算所采用的 2 个风场个例采用中国海洋大学提供的 1998 年 4 月 22 日 20 时至 25 日 2 时（个例 1）和 1999 年 4 月 1 日 0 时至 2 日 14 时（个例 2）的大风过程。实测点 A 风速过程及数值模拟结果见图 2~9（图中，系列 1 为没有考虑波浪作用的计算结果，系列 2 为考虑波浪作用的计算结果）。

从图 3 和图 7 可以看出，当风场刚开始的时候，波浪还没有成长，因此 C_d 几乎没有变化，随着风速的增大，波高的增加，波浪对 C_d 的影响越来越大；在风速达到最大的时候，图 3 中考虑波浪影响后的 C_d 值达到没有考虑波浪影响 C_d 值的 1.5 倍，图 7 中考虑波浪影响后的 C_d 值是没有考虑波浪影响 C_d 值的 1.6 倍。从图 4 和图 8 可以看出，风应力随 C_d 的变化而变化，从而影响到所要模拟的水位。

从图 5 和图 9 可以看出，考虑波浪对 C_d 影响后的水位与不考虑波浪对 C_d 影响下的水位有明显的变化，特别是当风速达到最大的时候，计算得到的水位值比潮汐风暴潮模式计算的结果增大幅度分别为 16 cm（图

5 和 5 cm(图 9) ,与实测值更加吻合.

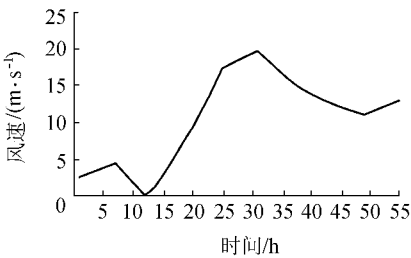


图 2 个例 1 风过程实测点 A 风速过程曲线

Fig.2 Wind speed curve for point A in case 1

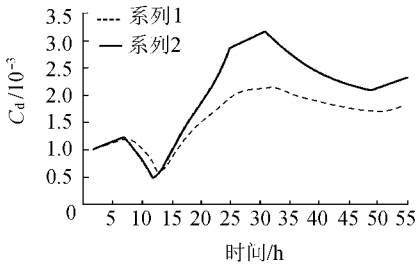


图 3 个例 1 风过程实测点 A 的 C_d 比较曲线

Fig.3 Comparison of calculated results of C_d at point A in case 1

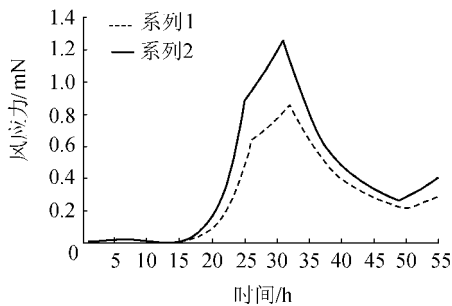


图 4 个例 1 风过程实测点 A 的 $|\tau|$ 比较曲线

Fig.4 Comparison of calculated results of $|\tau|$ at point A in case 1

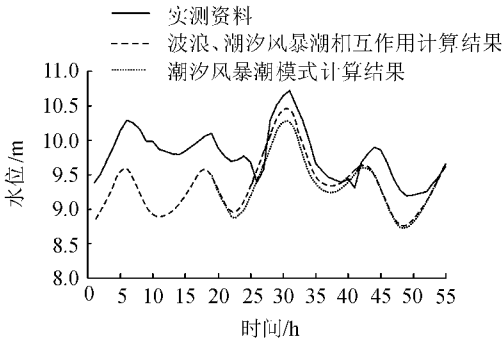


图 5 个例 1 风过程实测点 A 水位比较曲线

Fig.5 Water level curve for point A in case 1

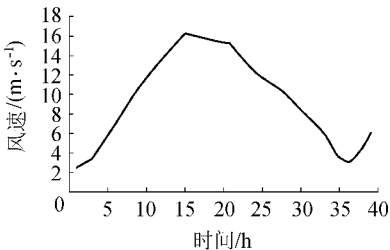


图 6 个例 2 风过程实测点 A 风速过程曲线

Fig.6 Wind speed curve for point A in case 2

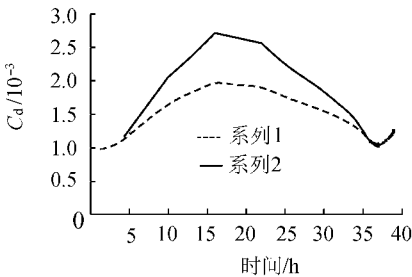


图 7 个例 2 风过程实测点 A 的 C_d 比较曲线

Fig.7 Comparison of calculated results of C_d at point A in case 2

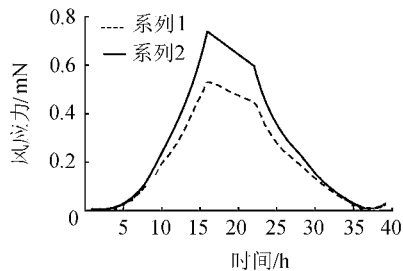


图 8 个例 2 风过程实测点 A 的 $|\tau|$ 比较曲线

Fig.8 Comparison of calculated results of $|\tau|$ at point A in case 2

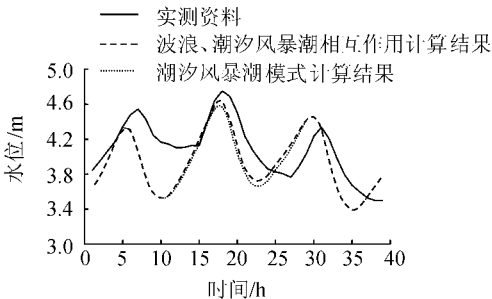


图 9 个例 2 风过程实测点 A 水位比较曲线

Fig.9 Water level curve for point A in case 2

3 结 论

个例 1 和个例 2 这 2 个风过程的计算表明 ,考虑波浪影响后的 C_d 值明显比不考虑波浪影响的 C_d 值大 ;水位对 C_d 值的依赖性比较大 ;从计算结果看 ,水位值的变化与 C_d 值的变化很密切.在 A 点 ,个例 1 和个例 2 这 2 个风过程考虑波浪作用后的 C_d 值引起水位增值分别达 16 cm 和 5 cm 之多.因此 ,在模拟潮汐风暴潮的时候 ,要考虑波浪对表面风应力系数的影响.事实上 ,波浪对潮汐风暴潮的作用不仅仅体现在影响表面风应力系数这一方面 ,也体现在波致辐射应力以及波流相互作用、潮汐风暴潮对波浪的作用等方面 ,这些还有待于做进一步的研究.

参考文献 :

[1] 张延廷 ,王以娇 .8114 台风风暴潮与天文潮非线性耦合作用的初步探讨[J].海洋学报 ,1986 (3) :283-290.
[2] 张延廷 ,王以娇 .8114 台风影响下黄海水位场和流场的数值模拟[J].海洋学报 ,1986 (1) :1-7.
[3] 窦振兴 ,张存智 ,张矾峰 .渤海风海流的数值计算[J].海洋学报 ,1986 (5) :527-533.
[4] 张延廷 ,王以娇 .渤海潮汐及大风作用下水位的数值模拟[J].海洋学报 ,1989 (6) :701-707.
[5] 赵永良 ,张延廷 ,陈则实 .黄海风暴潮和天文潮非线性耦合作用的数值研究[J].海洋学报 ,1992 (3) :37-46.
[6] WOLF J ,HUBBERT K P ,FLATHER R A . A feasibility study for the development of a joint surge and wave model[J]. Proudman Oceanographic Laboratory Report ,1988 (1) :199.
[7] TOLMANN H L . Effects of tides and storm surges on North sea wind waves[J]. Phys Oceanography ,1991 (6) :766-781.
[8] MASTERNBROEK C ,BURGERS G ,JANSSEN P A . The dynamical coupling of a wave model and a storm surge model through the atmospheric boundary layer[J]. Phys Oceanography ,1993 (8) :1856-1866.
[9] WU X ,FLATHER R A ,WOLF J . A third generation wave model of European continental shelf seas[J]. Proudman Oceanographic Laboratory Report ,1994 (33) :1-48.
[10] 尹宝树 .渤海波浪和风暴潮潮汐运动相互作用的理论和数值研究[D]. 青岛 :中国科学院海洋研究所 ,1996.
[11] DONELAN M K . On the dependence of sea surface roughness on wave development[J]. Phys Oceanography ,1993 (23) :2143-2149.

Influence of interaction of waves in tide-surge on surface wind stress coefficient

LIN Xiang¹ , YIN Bao-shu²
(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence of Ministry of Education , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Institute of Oceanology , Chinese Academy of Science , Qingdao 266071 , China)

Abstract : With the tide-surge numerical mode under the action of surface wind stress , which is dependent on the age of waves in the growth stage , the water level variation of Bohai Sea during 2 wind processes was studied by numerical simulation , and the surface wind stress coefficient under action of waves was calculated. Case study shows that the surface wind stress with consideration of wave action is 1.5 times of that without consideration of wave action , and the water level increases 16 cm if wave action is taken into account. The simulated results were in good agreement with the measured data. Therefore , the wave action is necessary to be considered in numerical simulation of tide-surges.

Key words : wave ; tide-surge ; wind stress coefficient ; numerical model