

浪、潮、风暴潮联合作用下的底应力效应*

金正华 王涛 尹宝树

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

摘要 运用建立的二维非线性浪、潮和风暴潮耦合模式分析了波流相互作用下的底应力及其对耦合波浪场和流场的影响。由渤海的两次强寒潮过程的数值实验表明,在波流相互作用下,底应力明显增大,增大的底应力对波浪场影响甚微,但将明显改变水位和流速的大小,这种影响在近岸浅水区更加显著。

关键词 底应力 波流相互作用 水位 流速

学科分类号 P731.2

近岸海浪和海流是近岸沉积物冲、淤、搬迁的主要动力因素,“波浪掀沙,海流输沙”的观点使人们愈加重视二者综合作用的研究。在大风过程中,这种现象尤其明显。当大风浪时,波底剪切应力将超过起沙临界值,使海底泥沙掀起,与此同时,受波、流相互作用影响的近底流将是驱动海底泥沙运动的主要动力。因此,对波、流相互作用和泥沙搬运,底应力的研究是非常重要的。Grand 等(1979)和 Christoffersen 等(1985)对这一问题提出了较为完善的理论,该理论一般都是基于时间不变的二层涡动粘性模式,这“二层”是由一个与深度比较很薄的高度湍动的波浪边界层和一个不太湍动的流边界层组成,给出了波、流相互作用下底应力的计算方法,而国内对这方面的研究尚不多见。本研究在浪、潮、风暴潮耦合模式中进一步考虑波、流相互作用下的底应力效应,并以渤海海域的两次大风过程为实例,计算出波、流相互作用下的底应力对波浪和海流动力过程的影响。

1 数值模拟

1.1 基本方程和定解条件

笛卡尔坐标下, x 轴向东为正, y 轴向北为正, 平面二维非线性动力方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + \zeta)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(h + \zeta)v] = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\tau_{ax} - \tau_{bx}}{h + \zeta} + A \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\tau_{ay} - \tau_{by}}{h + \zeta} + A \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, u, v 为流速在 x, y 方向的分量; h 为未扰动水深; ζ 为海面相对未扰动水面的高

* “九五”攻关资助项目, D48970108 号。金正华, 女, 出生于 1970 年 5 月, 硕士, E-mail: xdxia@ms. qdio. ac. cn
收稿日期: 1997-07-11, 收修改稿日期: 1998-01-06

度; τ_{ax} 、 τ_{ay} 为风应力在 x, y 方向的分量; τ_{bx} 、 τ_{by} 为底应力在 x, y 方向的分量; f 为科氏参量; A 为水平涡动粘性系数; ρ 为水体密度。

定解条件: 初始条件, $t = 0$ 时刻, $\zeta = 0$, $u = v = 0$; 闭边界, 法向流速为零 ($V_n = 0$);

开边界, 给出各点的潮位值, 表达式为 $\zeta(x, y, t) = \sum_{i=1}^2 f_i H_i(x, y) \cos[\sigma_i t + (v + u)_i - g_i]$, 式

中, ζ 值由 M_1 、 M_2 分潮叠加计算给出, M_1 取 K_1 和 O_1 分潮的平均; H 、 g 为分潮的调和常数; $(v + u)_i$ 为 t 时刻各分潮的初相位; f_i 为交点因子; t 为时间。

1.2 风应力项计算

$$\text{风应力项 } \tau_{ax}, \tau_{ay} \text{ 的计算采用公式 } \begin{cases} \tau_{ax} = \rho_a C_d |W| W_x \\ \tau_{ay} = \rho_a C_d |W| W_y \end{cases} \quad (2)$$

式中, C_d 为拖曳系数, $C_d = \lambda \left\{ \frac{0.4}{14.56 - 2 \ln W} \right\}^2$, $\lambda = 1.1$; W 为风速, W_x 和 W_y 分别为 W 在 x, y 方向的分量; ρ_a 为空气密度。

风场资料是由岸边站资料修正的模型风场给出, 时间步长取为 7.5min。

1.3 底应力的计算

作用于风暴潮的底应力将受到底波浪边界引入的湍动影响, 这样浅水区的海流不仅受到海底粗糙度的影响, 同时也受到波底边界层特性的影响。本研究出于计算量和时间的考虑, 对这一问题采用了相对简单的表达式, 计算波流相互作用下的底应力效应。

$$\text{在潮汐潮流计算中底应力项采用公式 } \begin{cases} \tau_{bx} = \rho \cdot r \cdot u \sqrt{u^2 + v^2} \\ \tau_{by} = \rho \cdot r \cdot v \sqrt{u^2 + v^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $r = n \cdot g / C_z^2$, $C_z = 250h^{1/5}$, n 为可调系数。

在波浪、潮汐、风暴潮耦合计算中, 底应力由三部分组成, 一是海流的, 二是波浪的, 三是波、流相互作用后派生的, 同时考虑到浪、流成任意角度的情况, 底应力项表达式如下:

$$\begin{cases} \tau_{bx} = C_f \rho |U| u + \frac{\pi}{8} \rho f_w |U_w| u_w + \frac{B\rho}{\pi} \sqrt{2} (C_f f_w)^{1/2} |U| u_w \\ \tau_{by} = C_f \rho |U| v + \frac{\pi}{8} \rho f_w |U_w| v_w + \frac{B\rho}{\pi} \sqrt{2} (C_f f_w)^{1/2} |U| v_w \end{cases} \quad (4)$$

式中, U 为平均流速; u, v 分别为 x, y 方向的平均流速; $U = \sqrt{u^2 + v^2}$; U_w 为波浪底部质点速度; u_w 和 v_w 分别为 U_w 在 x, y 方向的分量; $U_w = \sqrt{u_w^2 + v_w^2}$ 。

在浅水区波浪破碎前, $U_w = \frac{\pi H_w}{T \sinh(kh)}$, 式中, $k = 2\pi / L$, k 为波数, L 为波长; T 为波周期; H_w 为有效波高。

在波浪破碎后的破波带内, $U_w = \alpha' \sqrt{gh}$, $\alpha' = 0.3-0.6$; $C_f = r$ 为底摩阻系数; f_w

为波浪底摩阻系数, $f_w = 2 \left(\frac{U_w^2 T}{2\pi\gamma} \right)^{1/2}$, γ 为水的运动粘性系数, $\gamma = 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$ 。

B 为波、流相互作用影响系数, 此值关系很复杂, 不易确定, 根据 Soulsby (转引自辛文杰, 1997) 的研究, 它与波、流间的夹角有关, 当波浪与水流同向时, $B = 0.9170$; 当两者垂直时, $B = -0.1983$; 当夹角不确定时, $B = 0.359$ 。

1.4 波浪要素的确定

波、流相互作用下的底应力须用波浪场的要素加以确定。本研究采用二维的 YW-SWP 模式计算波浪场, 基本方程为适合任意水深的组成波能量平衡方程 (尹宝树等, 1994)。

$$\left\{ \left\{ \left\{ \left\{ \frac{\partial E}{\partial t} = -\nabla \cdot (C_g \cdot E) \right\} - \frac{\partial}{\partial \theta} [(C_g \cdot \nabla \theta) E] \right\} + S_{in} + S_{bo} + S_{br} \right\} + S_{nl} \right\} \quad (5)$$

式中, E 为二维方向谱; 第一重括号为传播项, 第二重括号为折射项, 第三重括号为能量输入和耗散项, 第四重括号为能量非线性转移项。传播项中 C_g 为群速度: $C_g \cdot \nabla \theta = -\frac{|C_g|}{k}$

$\times \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right) \cdot \left[\frac{k^2 \sec^2(kh)}{\text{th}kh + kh \sec^2(kh)} \right]$; 风能量输入源函数 $S_{in} = \alpha + \beta E$,

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_1 U^2 \cos(\theta - \psi); & f = f_{\max}, |\theta - \psi| < 90^\circ \\ 0 & \end{cases}, \quad \alpha_1 = \frac{\alpha_0}{2\pi f_{\max}}, \quad \alpha_0 \text{ 为可调系数, } \psi \text{ 为风}$$

向, θ 为波向, f 为频率, f_{\max} 为最大频率, U 为 10m 高处风速; $\beta = \max \left\{ 0, \beta_0 \cdot 0.25 \right.$

$\times \frac{\rho_a}{\rho} \omega \left\{ 28 \frac{u_*}{C} \cos(\theta - \psi) - 1 \right\} \left. \right\}$, 式中波速 $C = \frac{g}{2\pi f} \text{th}kh$, $h = h(x, y)$ 为未扰动水深,

$\omega = 2\pi f$, β_0 为可调系数, 摩擦速度 $u_* = \sqrt{C_d} U$; 底摩擦耗散源函数 $S_{bo} = -\frac{\Gamma}{g^2 \text{sh}^2 kh}$,

$\Gamma = 0.038 \text{m}^2/\text{s}^2$; 波破碎耗散源函数 $S_{br} = -\varepsilon f^2 \left[\iiint E d f d \theta \right]^{0.25} E$, $\varepsilon = 4 \times 10^{-4}$ 。由于计算波-波非线性相互作用项 S_{nl} 的复杂性, 采用参量化方法和适合我国海区特点的文氏

理论风浪谱作为控制谱形, 方向函数取为 $\frac{1}{2\pi} \cos^2(\theta - \psi)$ (文圣常等, 1984)。

2 计算方法

本研究采用“ADI”差分方法进行数值计算, 计算域选为渤海, 时间步长 7.5min, 空间步长 $15' \times 15'$ 。首先提前 4 天进行潮汐、潮流的模拟, 一直计算到风场起始时刻, 在得到的稳定潮汐潮流场上加上风应力项并在开边界加入潮汐边界条件, 进行潮汐、风暴潮非线性

性耦合的数值模拟,在每一时间步,算出耦合水位和流速,然后将水位加到未扰动水深上,进行下一时间步波浪场的数值模拟,将计算出的波要素用于计算底应力,把计算出的底应力加到潮汐、风暴潮耦合计算中,得到新的水位和流速,如此进行下去,直到风过程结束,最终得到考虑波、流相互作用下底应力影响的浪、潮、风暴潮共同作用下的水位和流场。

3 计算实例与计算结果

本研究选用两个典型的强寒潮过程 CY6404 和 CY8710 作为检验个例。渤海是具有复杂岸形和海底地形的浅海区,每年都有多次的寒潮出现,它一般只引起渤海南部大增水和北部大减水,而且这种风暴引起的强流向,总趋势是偏南向,在近岸海域是沿岸向。这两个过程都是强的风驱动动力过程,有利于体现波浪对流场的作用。

CY6404 过程作用时间为 1964 年 4 月 5 日 8 时到 4 月 7 日 8 时,检验点为图 1 中 A 点, CY8710 过程作用时间为 1987 年 10 月 29 日 2 时到 11 月 1 日 2 时,检验点为图 1 中 B 点。模拟的水位和流场见图 2,从模拟结果看,这两个寒潮过程都引起渤海北部大减水,渤海南部大增水,莱州湾增水很大,部分区域增水 1m 以上;流场的强流向为偏南向,在沿岸区域是沿岸向,在辽东湾,基本上是西南向的强流。这些结果与实测基本上是吻合的。

从考虑波、流相互作用下底应力的耦合模式 (WSTB) 和不考虑波、流相互作用下底应力的耦合模式 (WST) 对波浪场和流场的模拟结果比较看,大部分区域波、流相互作用下的底应力明显增大,尤其在浅水区,底应力增大 60% 以上,有些甚至增大 90% 以上。这是由于水深较浅,近底波轨道速度比较大,因而底应力增值明显。由于没有考虑流对波浪场的影响,改变的底应力对波浪场影响很小,波高和波向几乎没有变化,见图 3。

增大的底应力对流场的影响不容忽视。从图 4 看, WSTB 模式与 WST 模式的增水差值明显,增大的底应力使渤海南部增水和北部减水都减小,而且越到近岸影响越大,渤海湾大部分区域增水减小 30cm 以上,渤海东北部减水减少 30cm 以上。这是因为偏南向的强流因受到增大底应力的影响,流速减小所致。在近岸区域,因水深较小,波、流相互作用更明显,这种影响也愈加明显。

波、流相互作用下增大的底应力对流速的影响是明显的。从 WSTB 模式和 WST 模式计算出的 x 方向流速差值和 y 方向流速差值的分布图(图 5)看,在沿岸区域尤其是沿整个辽东湾,向西方向的流速和向南方向的流速明显减小,有些区域减小值超过 30cm/s,在深水区,减小量级不大,个别区域也有增大现象,这与流场、地形、风场等各种复杂因素有

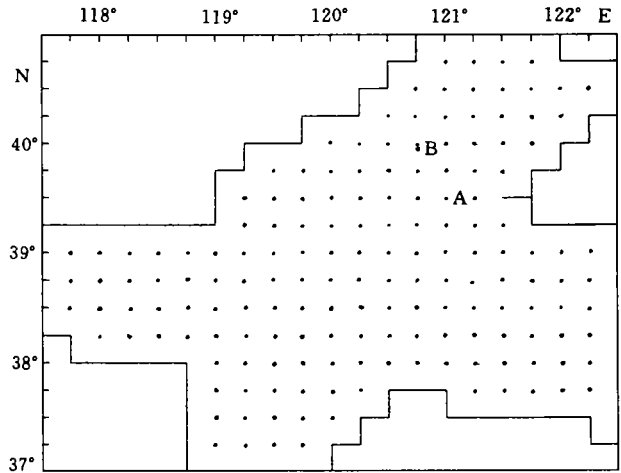


图 1 渤海检验点位置及网格点

Fig.1 Calculation grid and test points locations in Bohai Sea

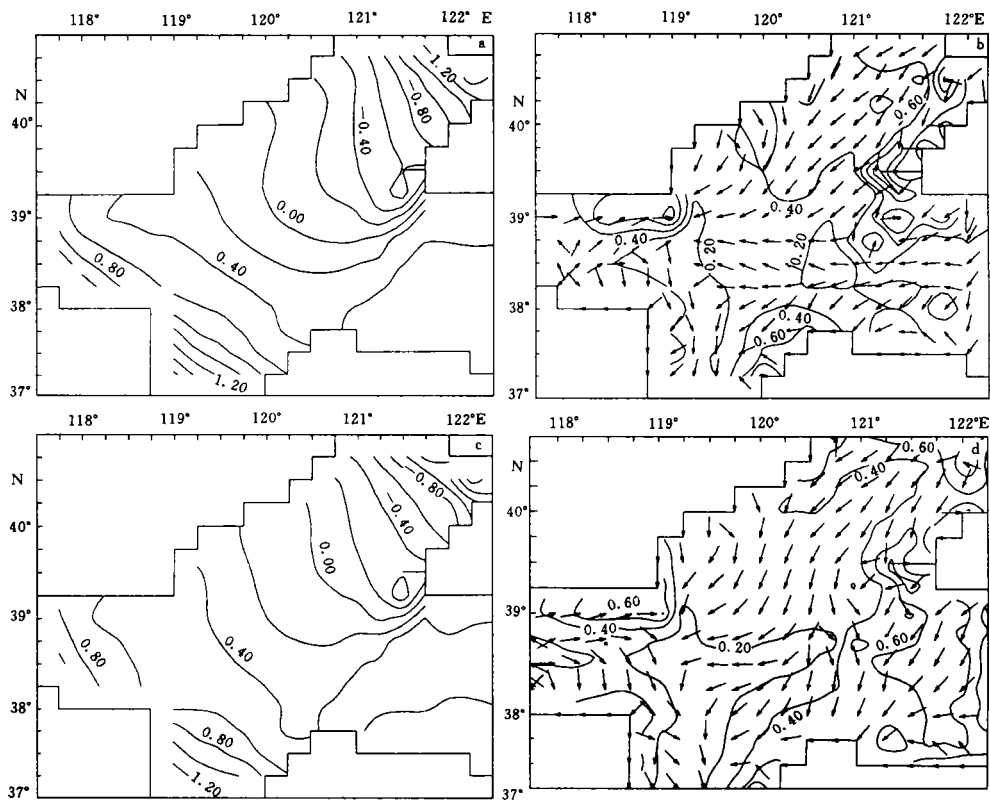


图2 水位(m) (a, c)和流速(m/s)流向(b, d)分布曲线

Fig.2 Distribution curve of water level(m)(a,b) and current velocity and direction(m/s)(b,d)

a, b. 1964年4月6日3时; c, d. 1987年10月30日14时

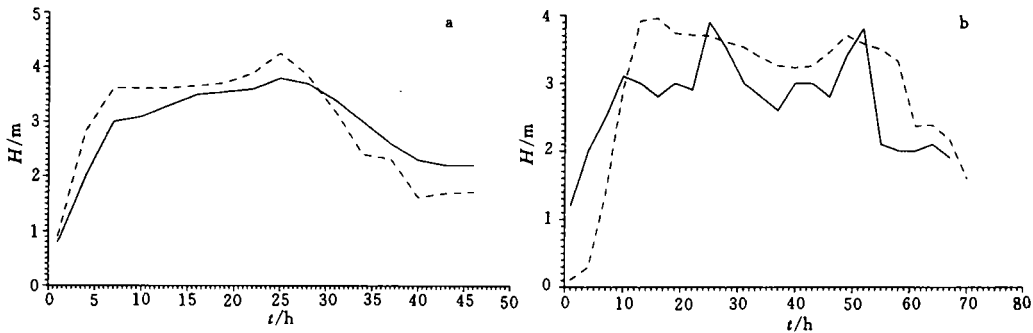


图3 检验点A(a)和B(b)有效波高(m)过程曲线比较

Fig.3 Comparison of process curve of sufficient wave height of test point location A(a) and B(b)

a. 1964年4月5日8时—4月7日8时; b. 1987年10月29日2时—11月1日2时

——实测; ——WST, WSTB

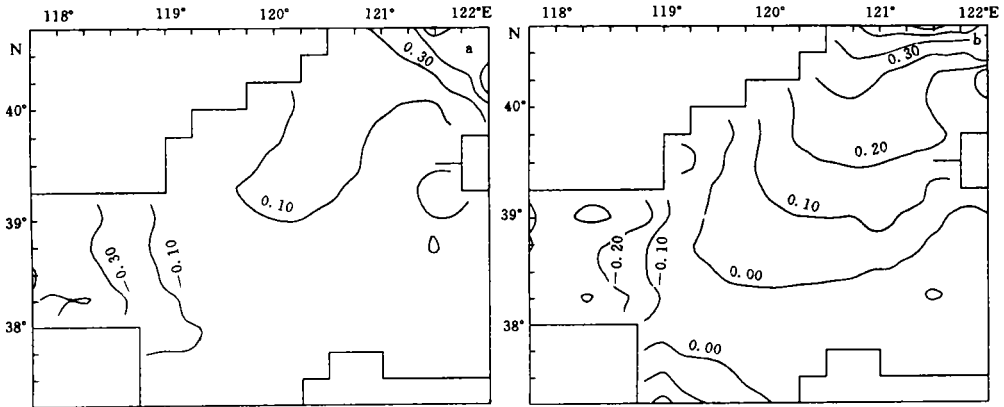


图 4 WSTB 与 WST 模式水位差(m)分布曲线

Fig.4 Distribution curve of comparison of water level(m) of WSTB and WST model

a. 1964年4月6日3时; b. 1987年10月30日8时

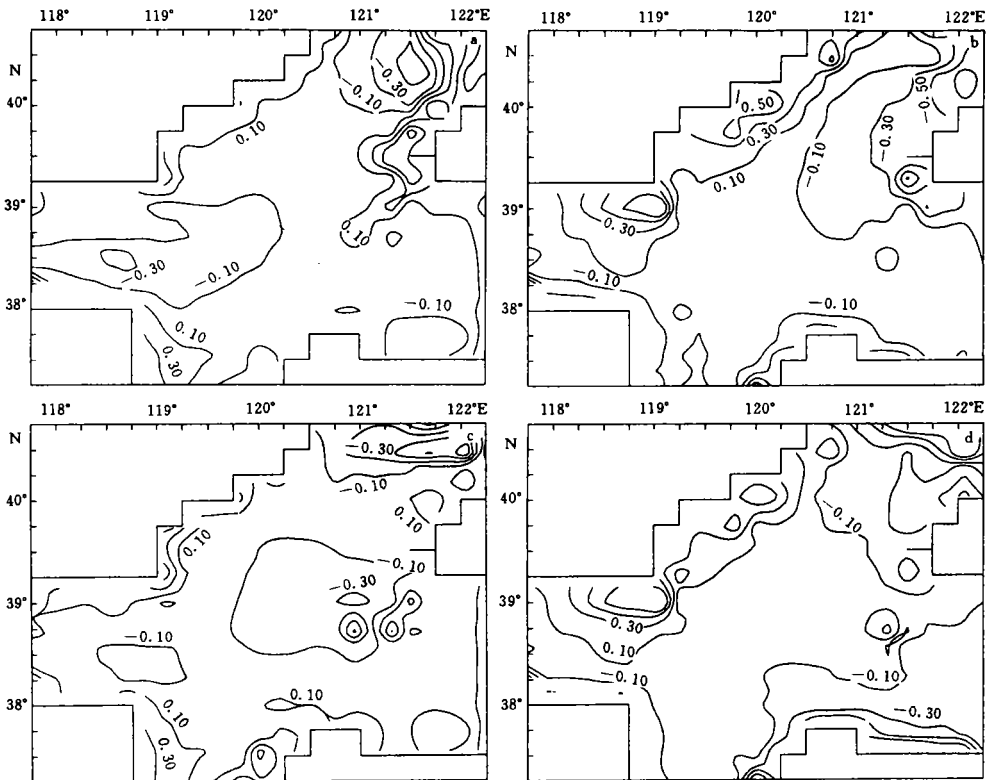


图 5 WSTB 与 WST 模式 x 方向(a,c)和 y 方向(b,d)流速差(m/s)分布曲线

Fig.5 Distribution curve of comparison of current velocity of x(a, c) and y(b, d) direction

a, b. 1964年4月6日3时; c, d. 1987年10月30日8时

关,二维平均流的采用也会给模拟结果带来一些影响。

4 结语

本研究通过对渤海海域两次寒潮过程的数值模拟,清楚地显示出波、流相互作用下底应力对水位场和流场有明显影响。强风过程中,波、流相互作用下的底应力增大,尤其是在近岸区域,将使水位和流速量值显著改变。因此,对强风驱动过程,考虑波、流相互作用下的底应力效应决不容忽视,发展这样一种综合考虑波、流相互作用下底应力效应的浪、流、潮耦合模式是十分必要的。最后应该提出,底应力对底层流影响很大,二维平均流的采用会影响底应力的效应,这一问题还有待进一步探讨。

参 考 文 献

- 文圣常 余宙文, 1984. 海浪理论与计算原理. 北京: 海洋出版社. 521—645
- 辛文杰, 1997. 潮流、波浪综合作用下河口二维悬沙数学模型. 海洋工程, 15(1): 30—47
- 尹宝树 王 涛 范顺庭, 1994. YW-SWP海浪数值预报模式及其应用. 海洋与湖沼, 25(3): 293—300
- Christoffersen J B, Jonsson I C, 1985. Bed friction and dissipation in a combined current and wave motion. *Ocean Engineering*, 12: 387—423
- Grand W D, Madsen O S, 1979. Combined wave and current interaction with a rough bottom. *J Geophys Res*, 84: 1797—1808

THE EFFECT OF BOTTOM FRICTION IN THE PROCESS OF WAVE-TIDE-SURGE INTERACTION

JIN Zheng-hua, WANG Tao, YIN Bao-shu

(*Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)

Abstract A two-dimension nonlinear combined wave-tide-surge numerical model was used to study two strong Bohai Sea weather processes to analyze the influence of bottom friction on coupled wave field and current field in wave-current interaction. A wave-dependent wind stress expression was used to couple the wave numerical model and tide-surge numerical model. This study considered the effect of water level on the wave field but did not consider the effect of current on the wave field; and revealed that, in wave-current interaction, bottom friction increases obviously. Especially in shallow water, bottom friction increased 60% or more in some areas in this study. Increased bottom friction has almost no effect on the wave field, but will change the magnitude of water level and current velocity obviously. In the two processes of this study, water level increased above to 30cm in the southwestern Bohai Sea and decreased more than 30cm in the northeastern Bohai Sea. Current velocity decreased more than 30cm / s along Liaodong Bay. The overall effect of bottom friction is specially important in near-shore areas because the relative change of water level is larger than that in the deep sea.

Key words Bottom friction Wave-current interaction Water level Current velocity

Subject classification number P731.2