

波-流作用下悬沙体积比垂向分布研究

王建峰^{1,2},李世森¹,张 海³

(1. 天津大学 建筑工程学院,天津 300072;2. 中国石油天然气总公司 工程技术研究院,天津 300451;3. 天津城市建设学院,天津 300384)

摘要: 在悬沙体积比垂向分布的研究中往往只研究悬沙体积比时均浓度分布,忽略悬沙体积比随时间的变化。而 Wikramanayake 悬沙模型采用时不变的紊动黏滞系数,利用奇异摄动理论中的多重尺度法分离波流作用下悬沙运动的对流扩散方程,将悬沙体积比按照时均值和周期分量进行了分析。作者在 Wikramanayake 悬沙模型中的周期浓度的基础上考虑了对流项的影响,从而使描述瞬时悬沙体积比的数学模型更加合理。

关键词: 波流;悬沙体积比垂向分布;时均浓度;周期分量

中图分类号: TV142

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)06-0035-06

近年来海岸河口地区的泥沙输移问题是河口海岸学家的研究重点。其中在悬沙体积比垂向分布的研究中,往往研究的是悬沙体积比垂向时均浓度,忽略悬沙体积比的周期变化。然而在试验研究和实测资料中发现悬沙体积比的周期分量(减去悬沙垂向时均值后随时间 t 变化的悬沙体积比)的幅值能达到时均值的大小^[1~5],其中 Vincent 和 Green^[5] 研究了一个波列中泥沙的悬浮和输移规律,发现在底床附近泥沙输移主要是周期悬沙的输移而不是时均值的输移。另外,随着测量技术的提高,可以通过 ABS (Acoustic Backscatter Sensors)、OBS(Optical Backscatter Sensors)和 EMCM(Electromagnetic current meter)等测量仪器得到瞬时悬沙体积比和相应的瞬时流速分布。因此有必要建立描述随时间变化的悬沙体积比模型,为建立更精确的泥沙输移数学模型奠定基础。Wikramanayake 悬沙模型^[6]采用时不变的紊动黏滞系数,利用奇异摄动理论中的多重尺度法分离波流作用下悬沙运动的对流扩散方程,将悬沙体积比按照时均值和周期分量进行分析。作者在 Wikramanayake 悬沙模型中的周期浓度的基础上考虑了对流项的影响,使悬沙体积比的垂向分布更加合理。

1 波-流作用下悬沙的控制方程

建立以 $x - y$ 坐标平面平行于水平面、 z 轴向上为正的右手坐标系,坐标原点取在底部床面上,则波流共同作用下三维悬沙对流扩散的控制方程为(取 x 轴与波向一致):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - f) \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (1)$$

其中 c 为悬沙体积比,以单位体积水体内所含的泥沙体积计, f 为泥沙的沉降速度, v_x 、 v_y 和 v_z 为黏滞系数, u 、 v 为水质点水平流速的 x 、 y 方向分量, w 为垂向流速, t 为时间。在研究悬沙体积比的垂向分布中,忽略垂向速度对悬沙体积比的影响,即取 $w = 0$;同时忽略水平方向的泥沙扩散,则:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - f \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (2)$$

为了得到波流共同作用下悬沙体积比的时均量和周期分量,对方程(2)进行多重尺度小参数摄动展开,令:

$$c = \bar{c}_0 + \tilde{c}_1 + \dots \quad (3)$$

其中 \bar{c}_0 为小参数, \bar{c}_0 代表悬沙体积比的时均浓度, \tilde{c}_1 代表悬沙体积比周期分量。

将式(3)代入式(2)后按 ϵ 的幂次整理,并设波向和水流方向的夹角为 ϕ_w ,有 $u = u_w + u_c \cos \phi_w$, $v = u_c \sin \phi_w$,其中 u_w 为波浪水质点速度的水平分量, u_c 为水流流速。则有:

$$0: \frac{\partial \bar{c}_0}{\partial t} + (u_w + u_c \cos \phi_w) \frac{\partial \bar{c}_0}{\partial x} + u_c \sin \phi_w \frac{\partial \bar{c}_0}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial \bar{c}_0}{\partial z} \right) + f \frac{\partial \bar{c}_0}{\partial z} \quad (4)$$

$$1: \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial t} + (u_w + u_c \cos \phi_w) \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial x} + u_c \sin \phi_w \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial z} \right) + f \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial z} \quad (5)$$

收稿日期:2007-07-26;修回日期:2008-03-19

基金项目:天津市应用基础研究计划项目(043605411)

作者简介:王建峰(1978-),男,河北宁晋人,博士研究生,主要从事结构与流体相互作用的研究,电话:022-27408023, E-mail: zhanghai@tju.edu.cn

则式(4)为悬沙体积比时均浓度垂向分布的控制方程,式(5)为悬沙体积比垂向分布周期分量的控制方程。

1.1 悬沙体积比时均值的垂向分布

将式(4)在一个波周期 T 内积分再求平均,然后沿 z 轴积分,根据自由表面的泥沙通量为零,得悬沙体积比时均值垂向分布的一维扩散方程为:

$$\bar{c}_0 + v_z \frac{\partial \bar{c}_0}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

在求解方程(6)时,采用 Grant 和 Madsen^[7] 提出的紊动黏滞系数模型:

$$v_z = \begin{cases} ku^*_{cw} z & z < z_r \\ ku^*_{cw} & z_r < z < z_r + \delta \\ ku^*_{c} z & z > z_r + \delta \end{cases} \quad (7)$$

式中 u^*_{cw} 为波流共同作用下最大摩阻流速, u^*_c 为水流作用下摩阻流速, k 为 von Karman 常数,取 $k=0.4$, δ 为模型参数, Wikramanayake^[8] 通过试验数据分析,建议取 $\delta=0.5$, δ 为边界层厚度,由下式确定:

$$\delta = \frac{ku^*_{cw}}{\omega} \quad (8)$$

式中 ω 为波浪的圆频率, W_f 为水流相对波浪的强度,定义为:

$$W_f = \frac{u^*_c}{u^*_{cw}} \quad (9)$$

为了方便计算,取无量纲垂向坐标 $\eta = z/\delta$ (10)

将式(7)代入式(6)得方程,并取 a 为无量纲沉速, $a = W_f / ku^*_{cw}$, 其中, W_f 为泥沙沉速,边界条件为 $\bar{c}_0 = \bar{c}_r$ 时, $\bar{c}_0 = \bar{c}_r$ (\bar{c}_r 为时均参考点悬沙体积比, z_r 为参考点高度, r 一般小于 z_r)。根据 $\bar{c}_0 = \bar{c}_r$ 和 $\partial \bar{c}_0 / \partial z = 0$ 处的连续条件,可以解得悬沙体积比时均值的表达式为:

$$\bar{c}_0 = \begin{cases} \bar{c}_r \left[\frac{z - z_r}{\delta} \right]^{-a} & z < z_r \\ \bar{c}_r \left[\frac{z - z_r}{\delta} \right]^{-a} e^{-a(z - z_r)/\delta} & z_r < z < z_r + \delta \\ \bar{c}_r \left[\frac{z - z_r}{\delta} \right]^{-a} \left[\frac{e^{-a(z - z_r)/\delta}}{e^{-a(z_r - z_r)/\delta}} \right]^{-a'} & z > z_r + \delta \end{cases} \quad (11)$$

1.2 悬沙体积比垂向分布的周期分量

在研究悬沙体积比垂向分布的周期分量时,一般是忽略对流项的影响,但为了使求得悬沙体积比垂向分布更加合理,在作者的分析中考虑了对流项的影响。在建立坐标系时, x 轴取为波浪传播的方向,这样悬沙体积比的周期分量对 y 坐标的导数为零,由式(5)可得到考虑对流项影响的悬沙体积比垂向分布周期分量的控制方程:

$$\frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial \tilde{c}_1}{\partial z} \right) + \frac{\partial W_f \tilde{c}_1}{\partial z} \quad (12)$$

方程(12)的边界条件为自由表面的泥沙通量为零和参考点处的悬沙体积比:

$$\tilde{c}_1 = \tilde{c}_r = \text{Re} \left\{ \tilde{c}_r e^{i t} e^{-i k x} \right\} \quad (z = z_r) \quad (13)$$

其中 k 为波数,由于 \tilde{c}_1 是方程(12)的周期解, $\text{Re}\{\}$ 为取括号内函数的实部,设:

$$\frac{\tilde{c}_1}{\tilde{c}_r} = \text{Re} \left\{ c_1(z) e^{i t} e^{-i k x} \right\} \quad (14)$$

则有:

$$\tilde{c}_1 = \tilde{c}_r \text{Re} \left\{ c_1(z) e^{i t} e^{-i k x} \right\} \quad (15)$$

其中 $c_1(z)$ 为 z 的复数函数,把式(15)代入式(12)后整理得:

$$i(1 - ku) c_1 = \frac{\partial c_1}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial c_1}{\partial z} \right) \quad (16)$$

边界条件为 $z = z_r$ 时, $c_1 = 1$; $z \rightarrow \infty$ 时, $c_1 = 0$ 。取无量纲垂向坐标 η ,采用式(7)定义的紊黏系数模型,分段求解过程如下:

(1) 当 $W_f < 1$ 时,将式(7)、(8)和式(10)代入式(16),同时左右同除以 δ^2 ,整理得:

$$i \left(1 - \frac{ku}{\delta} \right) c_1 = \frac{W_f}{ku^*_{cw}} \frac{\partial c_1}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\partial c_1}{\partial \eta} \right] \quad (17)$$

令 $\alpha = \frac{ku}{\delta} = \frac{u}{\delta k}$, 则为考虑对流项后引进的参数,代表流速和波浪传播速度的比值,即:

$$\frac{\partial^2 c_1}{\partial \eta^2} + (1 + \alpha) \frac{\partial c_1}{\partial \eta} - i(1 - \alpha) c_1 = 0 \quad (18)$$

方程(18)解的形式为^[9]:

$$c_1 = A \frac{e^{-\lambda_+ \eta}}{\sqrt{1 - \alpha}} K_a \left(2 \sqrt{1 - \alpha} \frac{\eta}{e^{\lambda_+}} \right) + B \frac{e^{-\lambda_- \eta}}{\sqrt{1 - \alpha}} J_a \left(2 \sqrt{1 - \alpha} \frac{\eta}{e^{\lambda_-}} \right) \quad (19)$$

其中 A 和 B 为待定复系数, $K_a()$ 表示 a 阶第二类变形贝赛尔函数, $J_a()$ 表示 a 阶第一类贝赛尔函数。

(2) 当 $W_f < 1$ 时,将式(7)、(8)和式(10)代入式(16)并整理得:

$$\frac{\partial^2 c_1}{\partial \eta^2} + a \frac{\partial c_1}{\partial \eta} - i(1 - \alpha) c_1 = 0 \quad (20)$$

该方程解的形式为:

$$c_1 = C e^{\lambda_+ \eta} + D e^{\lambda_- \eta} \quad (21)$$

其中 C 和 D 为待定复系数, λ_{\pm} 为式(20)特征方程的两个特征根,形式为:

$$\lambda_{\pm} = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 + 4i(1 - \alpha)}}{2} \quad (22)$$

(3) 当 $W_f > 1$ 时,将式(7)、(8)和式(10)代入式(16)并整理得:

$$\frac{\partial^2 c_1}{\partial \eta^2} + \left(1 + \frac{a}{\delta} \right) \frac{\partial c_1}{\partial \eta} - i(1 - \alpha) c_1 = 0 \quad (23)$$

该方程解的形式为:

$$c_1 = E \frac{e^{-\lambda_+ \eta}}{\sqrt{1 - \alpha}} K_{a'} \left(2 \sqrt{1 - \alpha} \frac{\eta}{e^{\lambda_+}} \right) + F \frac{e^{-\lambda_- \eta}}{\sqrt{1 - \alpha}} J_{a'} \left(2 \sqrt{1 - \alpha} \frac{\eta}{e^{\lambda_-}} \right) \quad (24)$$

式中 E 和 F 为待定复系数。由边界条件 $z = z_r$ 时 $c_1 = 0$ 可得 $F = 0$, 则:

$$c_1 = E \frac{e^{-\lambda_+ \eta}}{\sqrt{1 - \alpha}} K_{a'} \left(2 \sqrt{1 - \alpha} \frac{\eta}{e^{\lambda_+}} \right) \quad (25)$$

由边界条件 $z = z_r$ 时, $c_1 = 1$, 以及 c_1 在 $z = \infty$ 和

= / 处的连续条件和光滑条件可以得到 5 个线性方程, 联立可解得 A, B, C, D, E , 从而得到 c_1 的表达式, 由式 (15) 得到 \tilde{c}_1 的表达式。参数中除 ν 为模型参数, 取 0.5 外, 其余的 α, β, γ 都是由 Wikramanayake^[8] 波流模型所确定。只是在 Wikramanayake 的波流模型中, 经过多组实验数据的试算后发现等效 Nikuradse 糙率 k_n 增大 5 倍后悬沙体积比曲线拟和更好, 故在本模型中取增大 5 倍后的 k_n 代入 Wikramanayake 波流模型得到计算悬沙体积比所需要的参数。参考点浓度的计算可参考文献 [10]。

总之, 需要给出的波浪条件为近底波浪流速的幅值 u_b 、角频率 ω ; 水流条件为给定高度 z_h 处的流速 u_r 、波浪和水流的夹角 ϕ_w ; 泥沙的中值粒径 d_{50} 、重力加速度 g 、沉速 w_f 、泥沙参考点浓度 c_r 、流体的密度 ρ 、水深 h 和运动黏滞系数 ν 也需要给出。当这些已知条件给出后, 可以根据上述的模型计算波流共同作用下悬沙体积比的垂向分布。

2 理论模型验证

2.1 悬沙体积比垂向分布时均值的验证

因为计算泥沙浓度为体积水体内含有的泥沙体积, 与对比文献中的泥沙单位可能会不一致, 所以在进行验证时计算数据按照对比数据的浓度单位进行换算。

2.1.1 算例一

床面泥沙中值粒径 d_{50} 为 0.23 cm, 水深 h 为 1.8 m; 波浪条件为: 底部水质点最大水平轨迹速度为 34.85 cm/s, 周期 T 为 5.85 s; 水流条件为在高度 0.2 m 处的流速 u_r 为 16.4 cm/s; 沙纹高度 λ 为 0.695 cm。计算结果和 Vincent 和 Green^[5] 的试验数据见图 1。

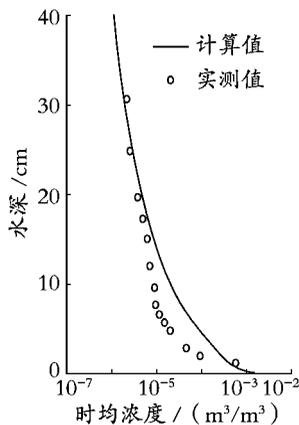


图 1 时均浓度计算值与 Vincent^[5] 实测值比较

Fig. 1 Comparison between the predicted mean suspended sediment concentration and Vincent^[5] measured concentration

2.1.2 算例二

床面泥沙中值粒径 d_{50} 为 0.0036 cm, 平均水深 h 为 1.8 m; 波浪条件: 波高 H 为 1.42 m、周期 T 为 4.6 s, 底部水质点最大水平轨迹速度为 34.85 cm/s; 水流给定高度 2.715 m 处落潮时流速 u_r 为 37 cm/s, 涨潮时 u_r 为 42 cm/s。计算结果和赵冲久^[11] 现场实测数据比较见图 2 和图 3。

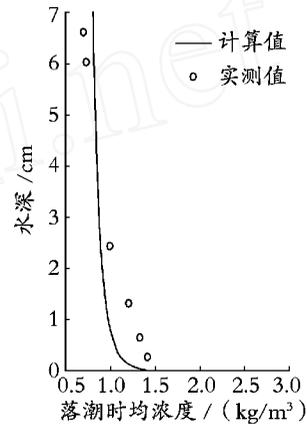


图 2 落潮时均浓度计算值与赵冲久^[11] 实测值比较

Fig. 2 Comparison between the predicted mean suspended sediment concentration and Zhao^[11] measured concentration during the ebb tide

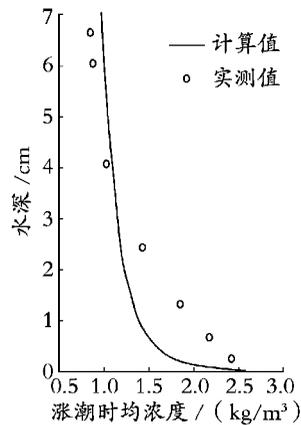


图 3 涨潮时均浓度计算值与赵冲久^[11] 实测值比较

Fig. 3 Comparison between the predicted mean suspended sediment concentration and Zhao^[11] measured concentration during the flood tide

2.1.3 算例三

床面泥沙中值粒径 d_{50} 为 0.38 mm, 平均水深 h 为 1.58 m; 波浪条件: 波高 H 为 0.65 m, 周期 T 为 12.9 s, 底部水质点最大水平轨迹速度为 0.799 m/s; 水流给定高度 0.3 m 处落潮时的流速 u_r 为 0.13 cm/s。计算结果和 Nielsen^[12] 实测数据见图 4。

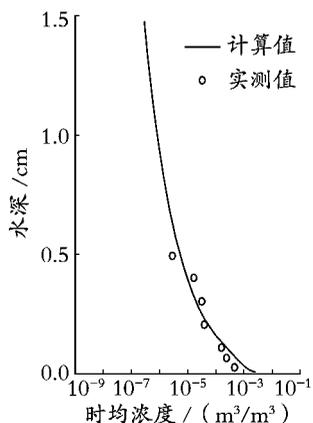


图4 计算时均浓度与 Nielsen^[12]实测值比较

Fig. 4 Comparison between the predicted mean suspended sediment concentration and Nielsen^[12] measured concentration

由图1~图4可见计算结果与实验值吻合较好,表明选取的悬沙体积比时均值模型能较好地模拟波浪共同作用下悬沙体积比时均值。

2.2 悬沙体积比垂向分布周期分量的验证

在给定底床上,悬沙体积比的垂向分布为:

$$c(z, t) = \bar{c}_0(z) + \tilde{c}_1(z) \cos(t + \phi(z)) \quad (26)$$

其中, $\bar{c}_0(z)$ 为悬沙体积比垂向分布的时均值, $\tilde{c}_1(z)$ 为悬沙体积比周期分量的幅值, $\phi(z)$ 为悬沙体积比周期分量的相位。

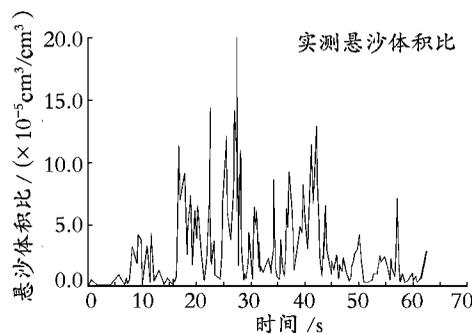
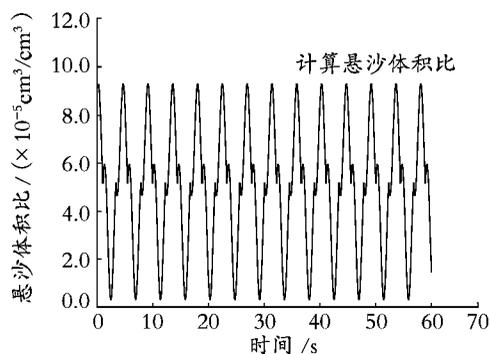


图5 悬沙体积比计算值与 Hanes^[13]实测值比较

Fig. 5 Comparison between the predicted time series of suspended sediment concentration and Hanes^[13] measured concentration

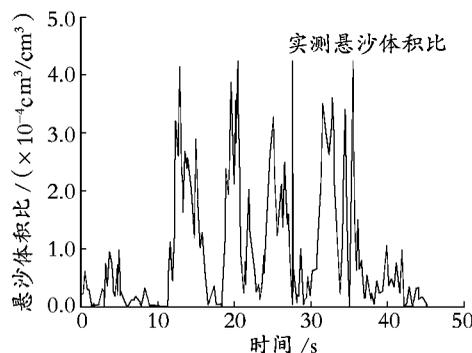
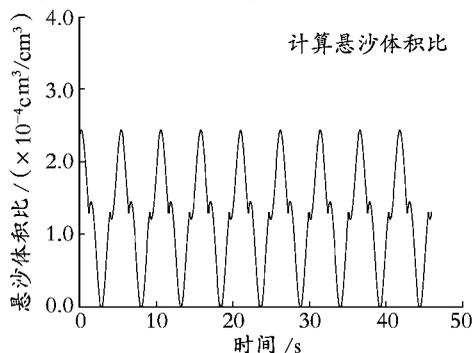


图6 悬沙体积比计算值与 Wright^[14]实测值比较

Fig. 6 Comparison between the predicted time series of suspended sediment concentration and Wright^[14] measured concentration

2.2.1 算例一

床面泥沙中值粒径 d_{50} 为 0.018 cm,水深 h 为 1.8 m,静水沉速 w_f 为 1.95 cm/s。其中实际波浪条件为不规则波,验证时取底部水质点最大水平轨迹速度 u_b 为 55.15 cm/s,周期 T 为 4.46 s,水流给定高度 15 cm 处的流速 u_r 为 28.4 cm/s,沙纹高度为 0.695 cm。计算结果和 Hanes^[13] 的现场实测悬沙体积比见图 5。

2.2.2 算例二

床面泥沙中值粒径为 0.03 cm,水深 h 为 1.75 m,静水沉速 w_f 为 4 cm/s。其中波浪条件为不规则波,验证时取底部水质点最大水平轨迹速度 u_b 为 27.7 cm/s,周期 T 为 5.2 s,水流条件为在高度 z_r 为 10 cm 处流速 u_r 为 4.7 cm/s,沙纹高度为 1.62 m。计算结果和 Wright 等^[14] 的实验数据见图 6。

由图5中可见计算结果与实测值基本一致,但是计算得到的悬沙体积比的幅值比实测数据小,实测的悬沙体积比幅值为 1.25×10^{-4} ,而计算得到的悬沙体积比幅值为 9.0×10^{-5} 。在图6中计算得到的悬沙体积比幅值与实测数据误差相对较小,实测的悬沙体积比幅值为 3.5×10^{-4} ,计算得到的悬沙体积比幅值为 2.45×10^{-4} 。出现误差的一个可能的原因是,实测数据为不规则波列作用下的悬沙体积比,而在本模型采用了简化后的规则波进行计算。

2.3 对流项对悬沙体积比垂向分布周期分量的影响

在悬沙体积比垂向分布周期分量公式推导中考虑了对流项的影响,引入了参数 $\sigma = ku'$,表示波浪相对水流的强度,即流速和波浪传播速度的比值。采用 Wright 等^[14]的波浪水流条件和泥沙条件验证

对悬沙体积比垂向分布周期分量的影响,计算得 $\sigma = 0.3$ 。图 7、图 8 分别为在不考虑 σ 和考虑 σ 的情况下距底床 0.02 m 处和 0.2 m 处的悬沙体积比垂向分布对比图。图 9 为悬沙体积比垂向分布周期分量的幅值在不考虑 σ 和考虑 σ 时沿水深的变化曲线图。由图 7 可以看出在底部 σ 对悬沙体积比垂向分布周期分量的影响较小,两条曲线基本重合。而在图 8 中显示 0.2 m 处悬沙体积比垂向分布周期分量的幅值则有较大变化。图 9 显示 σ 对悬沙体积比垂向分布周期分量的幅值的影响在底部较小,而在上

部两条曲线出现变化,考虑 σ 的悬沙体积比垂向分布周期分量的幅值较不考虑 σ 时有所增大,在距底部 40 cm 处悬沙体积比垂向分布周期分量的幅值已经差了一个量级。由此表明,参数 σ 对泥沙悬沙体积比垂向分布的周期分量有一定影响。

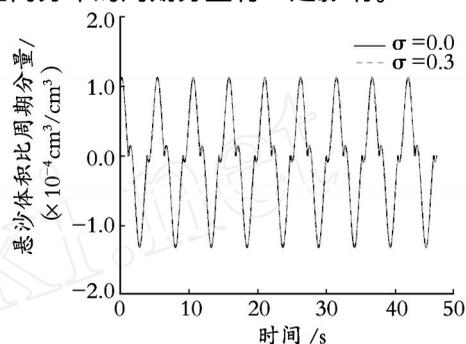


图 7 0.02 m 处 $\sigma = 0.0$ 和 $\sigma = 0.3$ 时悬沙体积比周期分量
Fig. 7 Profiles of instantaneous suspended sediment concentration components with $\sigma = 0.0$ and $\sigma = 0.3$ at 0.02 m

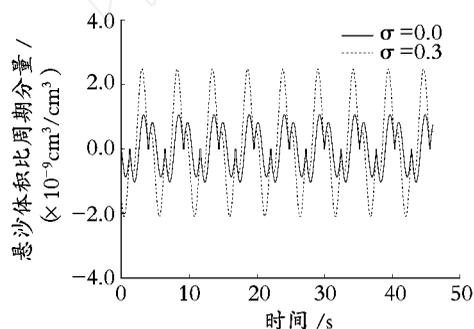


图 8 0.2 m 处 $\sigma = 0.0$ 和 $\sigma = 0.3$ 时悬沙体积比周期分量
Fig. 8 Profiles of instantaneous suspended sediment concentration components with $\sigma = 0.0$ and $\sigma = 0.3$ at 0.2 m

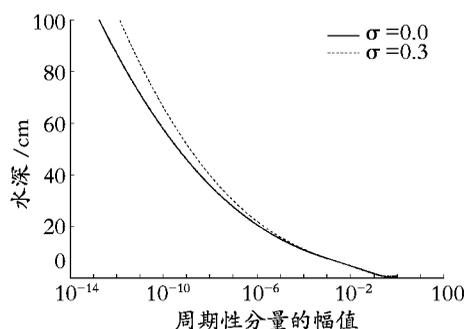


图 9 $\sigma = 0.0$ 和 $\sigma = 0.3$ 悬沙体积比周期分量幅值
Fig. 9 Profiles of magnitude of instantaneous suspended sediment concentration components with $\sigma = 0.0$ and $\sigma = 0.3$

3 结论

作者在 Wikramanayake 悬沙模型的基础上,将悬沙体积比按照时均值和周期分量进行了分析。在悬沙的周期浓度中考虑了对流项的影响,对流项对悬沙体积比垂向分布周期分量的幅值的影响在底部较小,而在上部出现变化,考虑对流项的悬沙体积比垂向分布周期分量的幅值较不考虑对流项时有所增大。由此表明考虑对流项后的悬沙数学模型更加合理。

参考文献:

[1] Homma M, Horikawa K, Kajima R A. Study on suspended sediment due to wave action[J]. **Coastal Engineering in Japan**, 1965, 8: 85-103.
[2] Sleath J F A. The suspension of sand by waves[J]. **Journal of Hydraulic Research Engineering**, 1982, 5: 439-452.
[3] Staub C, Jonsson I G, Svendsen I A. Variation of sus-

pended sediment in oscillatory flow [A]. Billy L Edge, Coastal Engineering Proc of the 19th Int Conf [C]. Houston: ASCE, 1984, 2 310-2 321.
[4] Hanes D M, Huntley D A. Continuous measurement of suspended sand concentration in a wave dominated near shore environment [J]. **Continental Shelf Research**, 1986, 6(4): 585-596.
[5] Vincent C E, Green M O. Field measurement of the suspended sand concentration profiles and fluxes and of the resuspension coefficient over a ripple bed[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1990, 95(C7): 11 591-11 601.
[6] Wikramanayake P N. Velocity profiles and suspended sediment transport in wave-current flows[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1993.
[7] Grant W D, Madsen O S. Movable bed roughness in unsteady oscillatory flow [J]. **Journal of Geophysical**

- Research**, 1982, **87**(c1): 469-481.
- [8] Wikramanayake P N. Turbulent wave-current bottom boundary layer flows [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1989.
- [9] 王竹溪, 郭敦仁. 特殊函数概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [10] 王尚毅, 顾元棫, 郭传镇. 河口工程泥沙数学模型 [M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [11] 赵冲久. 近海动力环境中粉沙质泥沙运动规律的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [12] Nielsen P. Field measurements of time-averaged suspended sediment concentrations under waves [J]. **Coastal Engineering**, 1984, 8: 51-72.
- [13] Hanes D M. Suspension of sand due to wave groups [J]. **Journal of Geophysical Research**, 1991, **96**(C5): 8 911-8 915.
- [14] Wright L D, Boon J D, Kim S C, *et al.* Models of cross-shore sediment transport on the shoreface of the Middle Atlantic Bight [J]. **Marine Geology**, 1991, 96: 19-51.

Vertical suspended sediment concentration due to wave-current flows

WANG Jianfeng, LI Shi-sen, ZHANG Hai

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Research Institute of Petroleum Engineering Technology, Tianjin 300451, China; 3. Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Received: Jul. , 26, 2007

Key words: wave-current; vertical profiles of suspended sediment concentration; mean suspended sediment concentration; instantaneous suspended sediment concentration

Abstract: The profiles of the suspended sediment concentration by a combined wave-current outside the surf zone are investigated in this paper. Wikramanayake's suspended sediment concentration model is used to perform the research on vertical profiles of suspended sediment concentration under the wave-current by employing the time-invariant turbulence viscosity coefficient. The method of multiple scales in singular perturbation theory is utilized to separate the sediment convective-diffusion equation. According to different characteristics of mean suspended concentration and instantaneous suspended sediment concentration, the mean suspended concentration and the instantaneous suspended sediment concentration are analyzed and discussed. Moreover, as for the research on the instantaneous suspended concentration, the convective term is considered in order to make the vertical profiles of suspended sediment concentration more reasonable.

(本文编辑:谭雪静)