

悬移质泥沙运动过程模拟分析

吴凤元, 樊贇贇, 梁力, 孙安冬

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: 为了实现悬移质泥沙运动过程的模拟分析,应用联合 $k-\varepsilon$ 紊流方程和悬沙输运方程的单流体模型,采用有限体积数值方法对其离散求解,分别对净冲刷和净淤积试验算例进行了计算模拟,计算结果与试验结果吻合良好,说明该模型是正确有效的,可以用来模拟悬移质泥沙的运动问题.分别对两个试验中泥沙上扬和沉降的运动过程进行数值模拟,结果表明:净冲刷和净淤积试验中泥沙开始上扬和沉降直至稳定状态分别运行 24 s 和 35 s.采用单流体模型可以有效地对悬移质泥沙运动过程进行数值模拟,为河流海岸工程中的水沙研究提供可靠的参考和依据.

关键词: 悬移质泥沙;单流体模型;有限体积法;运动过程;数值模拟

中图分类号: TV 139.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)03-0431-05

Simulation Analysis of Suspended Sediment Motion Process

WU Feng-yuan, FAN Yun-yun, LIANG Li, SUN An-dong

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: FAN Yun-yun, E-mail: yunyunfan@126.com)

Abstract: In order to realize the simulation analysis of suspended sediment motion process, single-fluid model combined $k-\varepsilon$ turbulence equation and suspended sediment transport equation was solved by finite volume method. Numerical simulation on two experimental cases was performed and the calculation results agreed well with two experiment results, verifying the effectiveness of the single-fluid model. Then, numerical simulations on suspended sediment up and down motion process in the two experiments were performed. The results showed that sediment run 24 s and 35 s from the beginning up to a steady state and from the beginning down to a steady state respectively. It is indicated that the single-fluid model is effective to simulate motion process of suspended sediment. It can provide a scientific reference and basis for the study of water and sediment in river coastal engineering.

Key words: suspended sediment; single-fluid model; finite volume method; motion process; numerical simulation

河流海岸工程中的水沙运动是一种常见的自然现象,并伴随有底床冲淤变形等水沙问题的存在,因此了解水沙的运动规律具有重要意义^[1-5].通过得到悬移质泥沙的运动过程,不仅可以找到水流作用下悬移质泥沙运动的发展规律,还可以为引水排沙、河床演变等复杂工程问题提供科学依据.

国内外学者在泥沙模型方面进行了大量研

究,并取得了一定的成果^[4-5].但大多数的研究以稳态泥沙浓度分布居多,细致分析讨论其非稳态运动过程以及规律的研究则相对较少.本文首先建立联合 $k-\varepsilon$ 紊流方程和悬沙输运方程的单流体模型,应用该模型分别对净冲刷和净淤积试验进行数值计算,验证了计算模拟的正确有效性.并对试验过程中悬移质泥沙上扬和沉降的运动过程进行了数值模拟,得到试验中悬移质泥沙运动的

收稿日期: 2015-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41201007,51474048);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N130401003,L1501009);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室项目(SKLG2012K010);辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2013103).

作者简介: 吴凤元(1989-),男,辽宁铁岭人,东北大学博士研究生;梁力(1955-),男,辽宁丹东人,东北大学教授,博士生导师.

全过程,并对结果进行分析.

1 水沙运动基本方程

1.1 水流基本方程

根据 Boussinesq 假定,可将垂向二维不可压缩流体的连续方程和雷诺平均的动量方程表示如下:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial wu}{\partial z} - (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu_t \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \nu_t \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial ww}{\partial z} - (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \nu_t \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} + \nu_t \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (3)$$

$k-\varepsilon$ 紊流模型:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial wk}{\partial z} - \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial k}{\partial z} \right) = G - \varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial w\varepsilon}{\partial z} - \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = (C_1 G - C_2 \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}. \quad (5)$$

式中紊动黏性系数和紊动动能产生项分别为

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

$$G = \nu_t \left\{ \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

式中: u, w 分别为笛卡尔坐标下 x 和 z 方向流速; p 为压强; ρ 为水的密度; g_x 和 g_z 分别为 x 和 z 方向的体积力; ν 为水的运动黏性系数; ν_t 为紊动黏性系数; k 为紊动动能; ε 为紊动耗散率; $C_\mu, C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为紊流经验常数,本文取值如表 1 所示.

表 1 $k-\varepsilon$ 模型常数取值
Table 1 $k-\varepsilon$ model constant value

C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

1.2 悬沙输运方程

本文采用的水沙数学模型为单流体模型,其悬沙输运方程如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial wc}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial \omega_s c}{\partial z}. \quad (8)$$

式中: c 为泥沙浓度; ω_s 为泥沙沉速; ε_s 为泥沙扩散系数,采用如下公式得到:

$$\varepsilon_s = \nu + \nu_t / \sigma_c. \quad (9)$$

式中 σ_c 为 Schmidt 数,取值范围一般为 0.5 ~ 1.0,本文取 $\sigma_c = 0.7$ ^[4].

1.3 边界条件

1) 进出口边界. 入口处采用 Dirichlet 型边界条件,在计算区域的进口断面给定输运变量的初值,出口处采用 Neumann 型边界条件,所有变量的梯度为 0.

2) 壁面边界. 水流方程的床面边界条件采用壁面函数法^[5]. 悬沙输运方程的床面边界条件为^[5]

$$\left(\omega_s c + \varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \right) \Big|_{z=\delta} = \alpha \omega_s (c_b - c_b^*). \quad (10)$$

式中: δ 通常取 $2D_{50}$ 或 $2/3$ 的床面粗糙高度 k_s ; α 为恢复饱和系数; c_b 为近底泥沙浓度,可用下式确定^[5]:

$$c_b = c_m + \alpha c_b^* [1 - \exp(-\omega_s(z_m - \delta)/\varepsilon_s)]. \quad (11)$$

式中: c_m 和 y_m 分别为最底层网格中心处的泥沙浓度和高度; c_b^* 为近底水流挟沙力,由 Van Rijn^[6]公式计算得到.

3) 自由表面边界. 在水流自由表面,流速和紊动动能 k 的法向梯度为零. 紊动耗散率边界条件根据文献[7]得到.

悬沙输运方程的自由表面边界条件为^[5]

$$\left(\omega_s c + \varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \right) \Big|_{z=\eta} = 0, \quad (12)$$

式中 η 为自由面位置.

1.4 控制方程的离散与求解

本文选用有限体积数值方法对控制方程进行离散,采用 SIMPLE^[8]数值方法求解流场,并采用 TDMA 算法对离散的代数方程组进行数值求解,限于篇幅本文不再做详细介绍.

2 数值模拟

2.1 净冲刷试验数值模拟

Van Rijn 在 1981 年进行了净冲刷试验研究^[9]. 试验情况如图 1 所示,水槽中床面泥沙颗粒在清水来流作用下上扬直至形成稳定的泥沙浓度分布. 试验水槽长 30 m,宽 0.5 m,高 0.7 m,试验水深为 0.25 m,水深平均流速为 0.67 m/s,床面泥沙粒径 $D_{50} = 0.23$ mm, $D_{90} = 0.32$ mm. 计算中取 D_{50} 为代表粒径,相应的沉速 $\omega_s = 0.22$ m/s,床

面粗糙高度 $k_s = 0.01 \text{ m}$. 划分的计算网格水平向长度为 0.04 m , 竖直向长度为 0.01 m . 时间步长为 0.01 s .

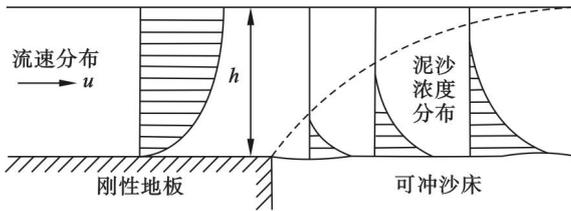


图 1 净冲刷试验示意图

Fig. 1 Sketch of net entrainment from loose bed in the experimental flume flow

当计算运行到 24 s 时, 泥沙浓度达到稳定状态, 其沿程分布如图 2 所示. 距离冲刷起点处不同位置泥沙浓度沿水深分布的计算值与实测值的比较见图 3. 从图中可以看出, 计算结果与实测结果吻合良好, 验证了模型以及计算的正确有效性.

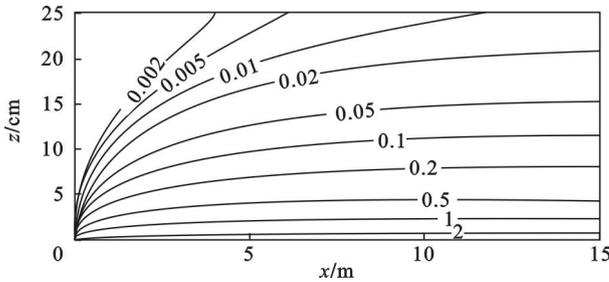


图 2 泥沙浓度沿程分布最终计算结果 (单位: kg/m^3)
Fig. 2 Calculation results of sediment concentrations longitudinal variations (unit: kg/m^3)

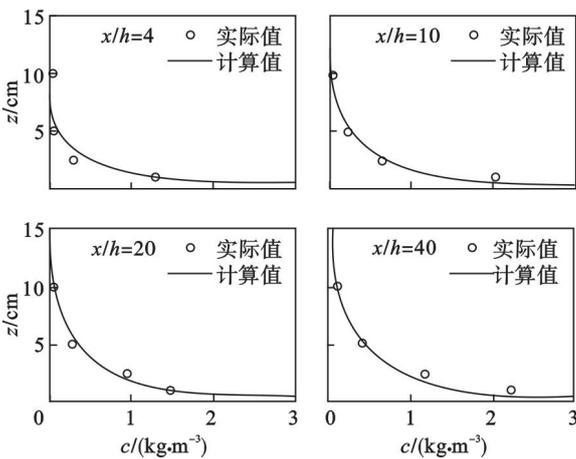


图 3 泥沙浓度计算结果与实测结果对比图

Fig. 3 Comparison of the calculated and measured sediment concentrations

图 4 为试验中不同时刻泥沙浓度的沿程分布计算结果. 从图中可以看出, 当运行到 5 s 时, 自由水面泥沙浓度几乎为 0. 而当运行到 10 s 时, 距离起始冲刷点分别为 4 m 和 6.2 m 位置处的泥沙

质量浓度已经分别达到 $0.002 \text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $0.005 \text{ kg}/\text{m}^3$. 随着运行时间的增加, 自由水面沿水平方向的泥沙含量逐渐增大, 当运行到 20 s 时, 计算结果已经和稳定状态的泥沙分布结果基本一致.

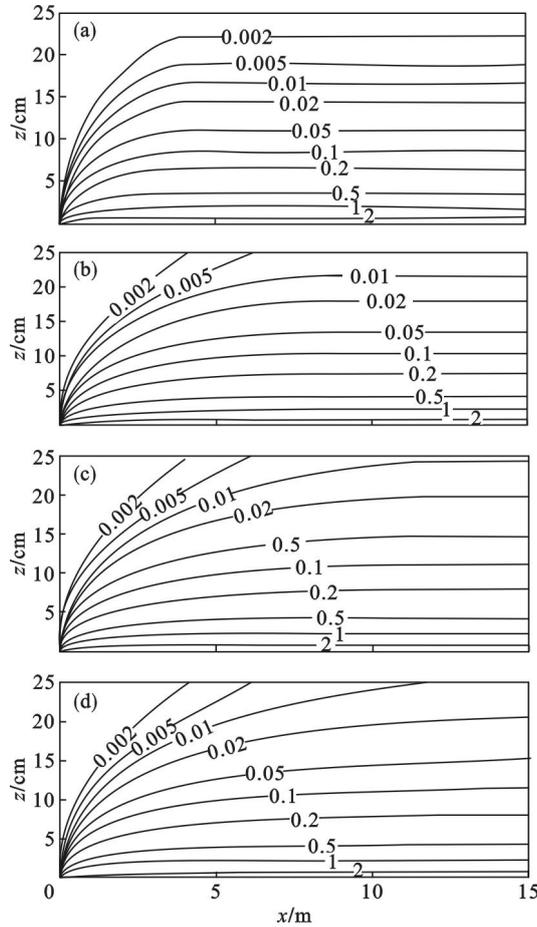


图 4 不同时刻泥沙浓度的沿程分布计算结果 (单位: kg/m^3)
Fig. 4 Calculation results of sediment concentrations longitudinal variations at different time (unit: kg/m^3)
(a)— 5 s ; (b)— 10 s ; (c)— 15 s ; (d)— 20 s .

2.2 净淤积试验数值模拟

Wang 和 Ribberink 在 1990 年进行了净淤积试验研究^[10]. 试验情况如图 5 所示, 试验水槽长 30 m , 宽 0.5 m , 在水槽前部通过加沙箱加沙, 挟沙水流经过 10 m 无底孔水槽的调节后进入长为 16 m 的有底孔水槽. 通过多孔床面捕捉沉降的泥沙, 致使上扬通量几乎为零. 水槽试验水深为 0.215 m , 水深平均流速为 $0.56 \text{ m}/\text{s}$. 计算时按均匀沙处理, 泥沙颗粒的沉速取 $0.0065 \text{ m}/\text{s}$, 床面的有效粗糙高度 $k_s = 0.0025 \text{ m}$. 进口含沙量条件由水槽实测资料给出, 数值求解时由最小二乘法拟合给出. 划分的计算网格水平向长度为 0.01 m , 竖直向长度为 0.0025 m . 时间步长为 0.01 s .

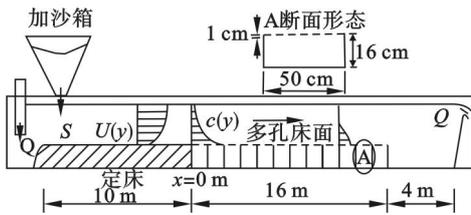


图 5 净淤积试验示意图

Fig. 5 Sketch of net deposition on honeycombed bed

计算运行 35 s 后,泥沙浓度分布达到稳定状态,稳态泥沙浓度沿程分布结果如图 6 所示. 距离进口不同位置泥沙浓度沿水深分布的计算值与实测值的比较见图 7. 从图中可以看出,计算结果与实测结果吻合良好,验证了计算模拟的正确有效性.

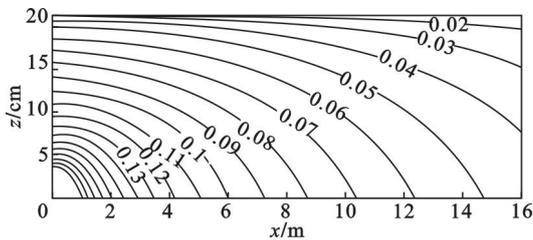


图 6 泥沙浓度分布最终计算结果 (单位: kg/m³)

Fig. 6 Calculation results of sediment concentrations longitudinal variations (unit: kg/m³)

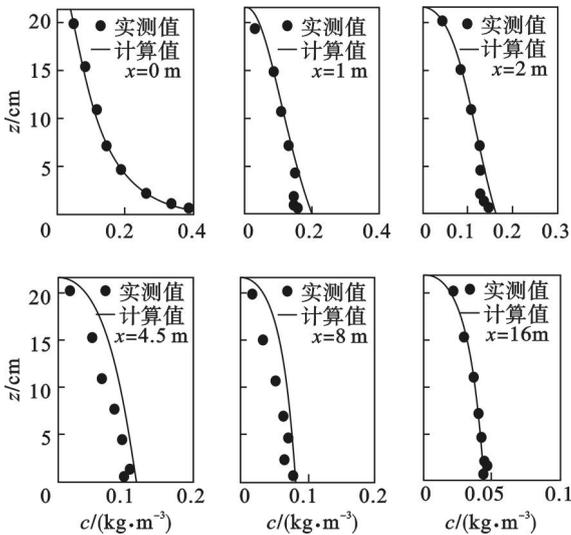


图 7 泥沙浓度计算结果与实测结果对比图

Fig. 7 Comparison of the calculated and measured sediment concentrations

图 8 为试验中不同时刻泥沙浓度的沿程分布计算结果. 从图中可以看出,当运行到 10 s 时,距离进口处 0 ~ 4 m 之间的泥沙沉降基本达到稳定状态. 当运行到 20 s 时,距离进口处 0 ~ 8 m 之间的泥沙沉降达到稳定状态,且沿水平方向的浓度梯度随时间增加而逐渐减小. 当运行到 30 s 时,计算结果已经和稳定状态泥沙浓度分布结果基本

一致,仅仅在最后的 15 ~ 16 m 内存在差异.

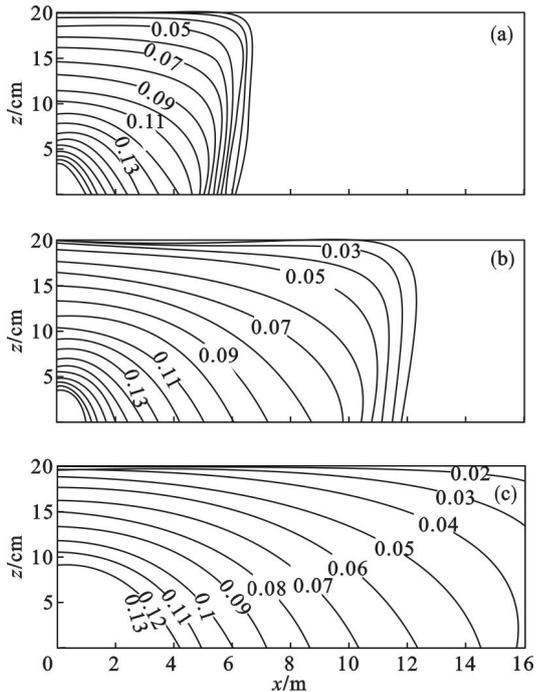


图 8 不同时刻泥沙浓度的沿程分布计算结果 (单位: kg/m³)

Fig. 8 Calculation results of sediment concentrations longitudinal variations at different time (unit: kg/m³)

(a)—10 s; (b)—20 s; (c)—30 s.

3 结 论

1) 应用联合紊流方程和悬沙输运方程的单流体模型,分别对净冲刷和净淤积试验进行了数值模拟,模拟结果与试验结果基本一致,说明计算模拟正确有效,表明该模型可以用来模拟悬移质泥沙的运动问题.

2) 在净冲刷试验中,泥沙从开始上扬直至稳定状态共运行了 24 s. 其中,当运行到 10 s 时,距离起始冲刷点分别为 4 m 和 6.2 m 位置处的泥沙质量浓度已经分别达到 0.002, 0.005 kg/m³.

3) 在净淤积试验中,泥沙从开始沉降直至稳定状态共运行了 35 s. 其中,当分别运行到 10 s 和 20 s 时,距离进口处分别为 0 ~ 4 m 和 0 ~ 8 m 之间的泥沙沉降基本达到稳定状态,且沿水平方向的浓度梯度随时间增加而逐渐减小.

参考文献:

[1] Falcini F, Piliouras A, Garra R. Hydrodynamic and suspended sediment transport controls on river mouth morphology [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2014, 119 (1): 1 - 11.

(下转第 445 页)