

· 综 合 ·



深槽水域垂向二维水沙运动数值模拟

邹方勇, 冯卫兵

(河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用网格堵塞技术实现实际地形的模拟, 采用有限体积法离散方程, 采用SIMPLER算法求解耦合的速度场和压力场, 并建立了沿宽度积分的垂向二维水流泥沙数学模型。将计算结果和试验资料进行对比, 结果吻合良好。

关键词: 垂向二维; 有限体积; 泥沙输移; 数学模型; 网格堵塞法

中图分类号: TV 149.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)08-0001-04

Numerical simulation on vertical 2D flow of narrow water area

ZOU Fang-yong, FENG Wei-bing

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

Abstract: A 2D vertical finite volume model of tidal flow and sediment transport is established by laterally integrating Navier-Stokes equation. The orthogonal curvilinear grid is used, and actual topographic forms are generalized by jam technology of mesh, numerical equations is discreted using finite volume method, coupled equations of pressure force and velocity is solved by SIMPLER numerical modality.

Key words: 2D vertical; finite volume method; sediment transportation; numerical simulation; jam technology of mesh

水流泥沙数学模型可分为一维、平面二维、垂向二维、三维(准三维)和二三维嵌套等几种类型。在某些河口或内河水域, 水深比较大, 水面比较窄, 水下地形也崎岖多变, 水沙运动情况复杂。在这些地段, 往往悬沙浓度沿宽度方向变化不太大, 这时就不适宜采用平面的二维水沙数学模型模拟水沙运动, 采用三维水沙数学模型复杂又困难, 而用垂向二维水流泥沙数学模型就能够较好地进行模拟, 获得垂向的水力要素和泥沙分布情况, 本文在平面二维水流泥沙数学模型基础上, 建立了垂向的二维水沙数学模型, 并对跨深槽的水槽水流泥沙运动进行了模拟计算, 将计算结果和试验资料进行了对比。

形, 把Navier-Stokes方程沿河宽积分, 并取横向平均而得, 推导时基于如下假定^[1]:

- 1) 水质点横向流速对时间、空间的偏导数可忽略不计;
- 2) 水力要素(如流速), 在控制断面上沿横向分布足够均匀;
- 3) 两岸侧向摩阻力相等;
- 4) 两岸边壁采用无滑动条件 $u=v=w=0$;
- 5) 不计质量力。

基于以上假设, 在笛卡尔坐标系下(图1)对流体运动基本方程组沿y向积分后, 得到垂向二维水流运动的控制方程:

1.1 连续方程

1 控制方程

垂向二维水流控制方程是将河道概化成矩

$$\frac{\partial(Bu)}{\partial x} + \frac{\partial(Bw)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2012-01-31

作者简介: 邹方勇(1985—), 男, 硕士研究生, 从事水流泥沙及波浪力研究。

1.2 水位方程

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} (B \int_{-h}^{\zeta} u dz) = 0 \quad (2)$$

1.3 动量方程

$$\frac{\partial (Bu)}{\partial t} + u \frac{\partial (Bu)}{\partial x} + w \frac{\partial (Bu)}{\partial z} + \frac{B}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (Bv_{tx} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (Bv_{tz} \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (3)$$

1.4 静水压强近似分布

$$P = P_a + \rho g (\zeta - z) \quad (4)$$

以上各式中： t 为时间； ζ 为水位（水面至基准面的垂向距离）； u, w 分别为横向平均流速的 x, z 方向的分量， B 为河道横断面的概化宽度， h 为概化水底地形后的水深； v_{tx}, v_{tz} 分别为 x, z 方向的紊动黏滞系数； P_a 为大气压强， P 为总压强； ρ 为水的密度； g 为重力加速度。坐标系统见图1。

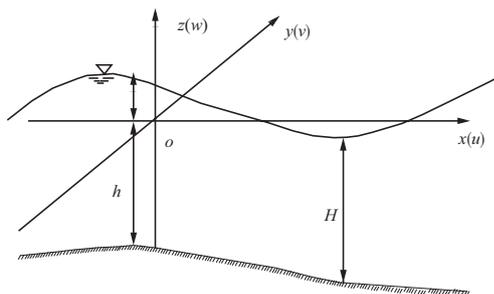


图1 坐标系统

1.5 垂向二维悬沙输移方程

将河道概化成矩形,对三维悬沙对流扩散方程沿宽度方向积分平均,可以得到垂向二维悬沙对流扩散方程

$$\frac{\partial (BS)}{\partial t} + \frac{\partial (BuS)}{\partial x} + \frac{\partial [B(w - \omega_s)S]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (Bv_{sx} \frac{\partial S}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (Bv_{sz} \frac{\partial S}{\partial z}) \quad (5)$$

式中： S 为横断面平均悬沙浓度； ω_s 为泥沙颗粒沉降速度； v_{sx}, v_{sz} 为泥沙在 x, z 方向上的扩散系数。

2 定解条件

2.1 网格堵塞技术

为了有效模拟天然水域底边界的实际地形情况,可以使用网格堵塞技术将位于流动区域之外的控制体堵住,使其不参与计算(图2)。然后在河底每个网格的边壁,都采用河底边界条件。在计算

时,预先在垂向上铺设网格,将地形不过水的网格进行堵塞处理,采用大系数法与壁函数法相结合,即不过水网格采用大系数法处理,亦即在计算时,令其计算式的分母为一大系数(如 10^{30}),则其各值的计算结果即为0;而与不过水网格相邻的网格节点则采用壁函数法来进行处理。这样做既可以避免复杂的网格生成,又能够准确地拟合不规则边界。

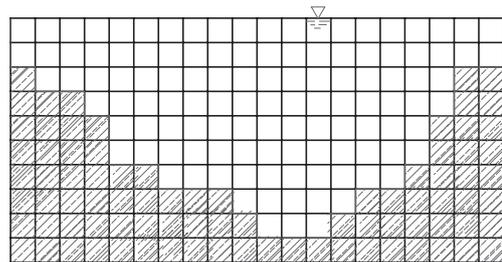


图2 网格堵塞

2.2 自由表面边界条件^[2]

自由表面满足 $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$ 。

自由表面泥沙的边界条件应满足自由表面法线方向泥沙净通量为零,即

$$(uS - v_{sx} \frac{\partial S}{\partial x}) \cos(n, x) + [(w - \omega_s)S - v_{sz} \frac{\partial S}{\partial z}] \cos(n, z) = 0 \quad (6)$$

式中： (n, x) 和 (n, z) 分别表示边界外法线方向 n 与 x 轴、 z 轴正方向的夹角。

2.3 河底边界条件^[2]

河底水流边界条件采用无滑移条件,即 $u=w=0$ 。

河底泥沙边界条件可取为:

$$(uS - v_{sx} \frac{\partial S}{\partial x}) \cos(n, x) + [(w - \omega_s)S - v_{sz} \frac{\partial S}{\partial z}] \cos(n, z) = F_n = \begin{cases} -E \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right) & \tau_b \geq \tau_e \\ 0 & \tau_d < \tau_b < \tau_e \\ \alpha w_b S \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right) & \tau_b < \tau_d \end{cases} \quad (7)$$

式中： F_n 表示底部边界外法线方向上的泥沙通量； α 为沉降概率； w_b 为底部泥沙有效沉速； τ_b 是底床剪切应力； τ_e 是冲刷的临界剪切应力； E 是冲刷系数； τ_d 是泥沙淤积的临界剪切应力。

2.4 上下游开边界条件

水流在上下游开边界上有两类边界条件,即

水位过程线或流速过程线:

$$\zeta_{\Gamma} = \zeta(x, t)|_{x=\Gamma} \text{ 或 } u_{\Gamma} = u(x, z, t)|_{x=\Gamma}$$

泥沙在上下游边界上给出实测含沙量过程线:

$$S_{\Gamma} = S(x, z, t)|_{x=\Gamma}$$

2.5 初始条件

初始条件虽对计算结果有一定的影响, 但经过一段时间后这种影响可以随着计算迭代次数的增加而消除, 因此初始条件往往取常数值, 通常水流初始条件给定初始水位和流速为零, 泥沙初始条件按照上下游悬沙浓度线性差值给定。

3 参数的确定和地形变化的判定

3.1 水流紊动黏滞系数的确定

垂直和水平紊动黏滞系数分别采用下列式子来确定^[3]:

$$\begin{cases} v_{tz} = K_1 l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| f(R_i) \\ v_{tx} = K_x H u \Delta t (1 - \frac{r}{R}) \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(R \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $R_i = -g(\partial \rho / \partial z) / \rho (\partial u / \partial z)^2$ 为分层里查逊数; $f(R_i) = (1 + \beta R_i)$ 相当于 v_{tz} 的阻尼系数, $\beta = 1.0$; K_1 为系数; l_m 为混合长度; K 为 von Karman 常数; $z_0 = K_s / 30$, K_s 为粗糙度; $K_x = 5.0 \sim 10$, 为常数; Δt 为时间步长; R 为假想主流线平均长度; r 为计算点到边壁的距离; H 为总水深。

3.2 泥沙扩散系数的确定^[2]

水平泥沙扩散系数采用 $v_{sx} = 0.2 B u$ 。

垂向泥沙扩散系数采用 $v_{sz} = v_{tz} / P_r$, 其中 P_r 为 Prandtl 数。

3.3 底部冲淤的判定^[3]

悬沙沉速受悬沙粒径、悬沙浓度、水温、盐度、流速、水深和波浪等众多因素交互作用的影响。对于非黏性泥沙, 沉速主要是粒径的函数; 而对于黏性泥沙, 沉速则与絮凝过程密切相关, 根据悬沙浓度可将其分为自由沉降、絮凝沉降、阻滞沉降。

冲刷算法采用 Partheniades 经典方法, 当底部剪应力超过不冲刷的极限时, 产生冲刷。冲刷率表示为:

$$\frac{dm}{dt} = \begin{cases} E \left(\frac{\tau_b}{\tau_c} - 1 \right) & (\tau_b \geq \tau_c) \\ 0 & (\tau_b < \tau_c) \end{cases} \quad (9)$$

式中: dm/dt 即是冲刷率。淤积模型最初是由 Krone

提出的, 模型的基本假定为: 泥沙颗粒沉降到底部时会以一定的概率沉积下来, 其沉积概率为 $0 \sim 1$ 。淤积概率为:

$$p = \begin{cases} 1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} & (\tau_b < \tau_d) \\ 0 & (\tau_b \geq \tau_d) \end{cases} \quad (10)$$

3.4 方程离散和求解^[4]

为数值求解垂向二维水沙运动方程组, 必须将方程离散, 本文用积分守恒性比较好的控制体积法离散方程, 并采用 Spalding 和 Patankar (1980) 提出的 SIMPLER 算法对离散方程进行求解, 具体步骤: 1) 对速度场赋予初始猜想值; 2) 计算动量方程系数, 求出虚拟速度 \hat{u}, \hat{w} ; 3) 计算压力方程系数, 解出压力场; 4) 把算得的压力场当作 P^* , 再求解动量方程得出 u^*, w^* ; 5) 计算压力校对方程源项, 并求解压力校对方程, 得出 P' ; 6) 用求出的 P' 校正速度场, 但不校正压力场; 7) 判别计算是否收敛, 若收敛计算泥沙方程, 若不收敛返回第 2) 步计算直至收敛为止。

4 算例及讨论

为检验模型对垂向二维水流泥沙运动模拟的效果, 采用 Van Rijn (1987) 进行的水流跨过深槽的水槽试验对水流模型进行检验, 深槽尺寸见图 3, 试验进口平均流速为 0.395 m/s , 水深为 0.204 m , 有效糙率高度为 0.02 m , 数据测量位置在图 3 中标注, 模型计算网格为 52×16 , 控制体的水平长度为 5 cm , 垂向分为 16 层, 每层 2.5 cm 左右, 试验测量了各断面的纵向流速、紊动动能的分布 (图 4 ~ 6), Alfrink (1983) 对这一试验也进行了模拟计算。

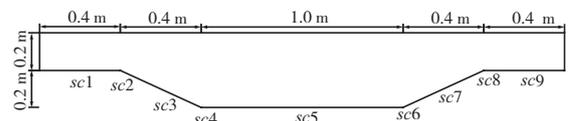


图 3 水槽剖面尺寸

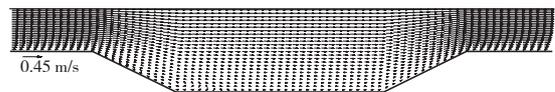


图 4 垂向流场

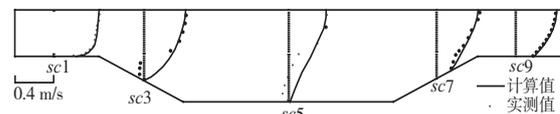


图 5 纵向流速验证

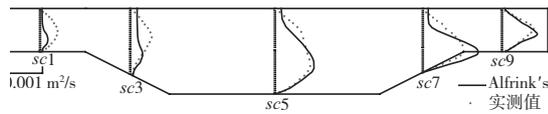


图6 纵向紊动黏滞系数分布

从计算结果和实测资料的对比看，模型在对跨深槽的水槽水流模拟中，能模拟出深槽处的回流情况，计算所得的流场分布、紊动黏滞系数断面分布也与实测数据吻合得比较好，能反映出实际情况下水力要素的分布情况，说明本模型对于模拟三维水流的运动具有一定的精度。

为了检验本模型对垂向二维泥沙运动的模拟效果，Van Rijn所做深槽系列试验的另一个例子（试验编号为T1），深槽的几何尺寸及其水流参数见图7，泥沙的特征参数为： $D_{50}=0.16\text{ mm}$ ，

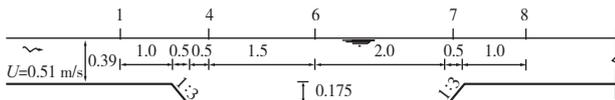
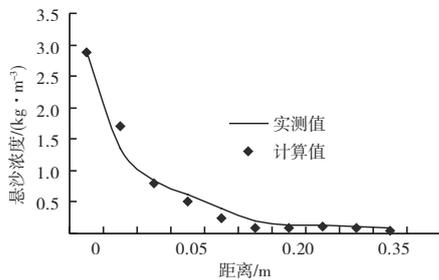
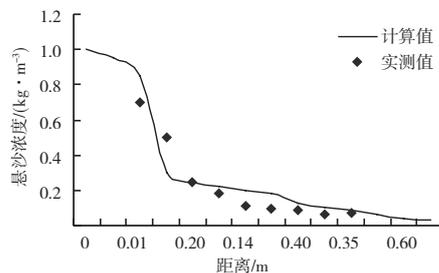


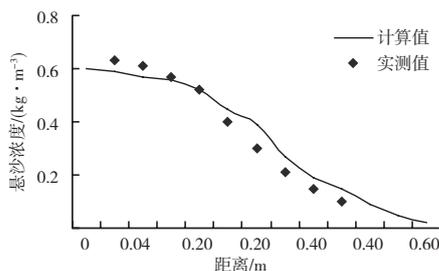
图7 深槽几何尺寸及其水流参数



a) SC2



b) SC3



c) SC4

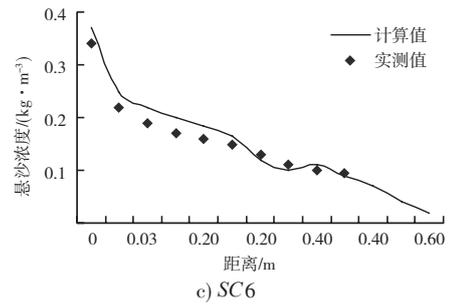


图8 垂向悬沙浓度分布

$D_{90}=0.2\text{ mm}$ 。床沙铺厚为0.2 m，悬沙的进口输沙率为0.03 kg/sm，计算后对泥沙浓度的垂向分布和实测资料进行了对比(图8)。

从图8可以看出，在进行悬沙输移计算时，所选取断面的计算结果和实测资料相差不大，基本反映了各断面垂向悬沙浓度场的分布情况，也能满足所需要的精度要求。

5 结论

本文建立了垂向二维水沙数学模型，对垂向的水流运动和泥沙输移情况进行了模拟计算，在对跨过深槽的水槽水流运动的模拟计算中，垂向的流速、紊动黏滞系数分布与实测资料比较吻合，显示了本模型能较好模拟复杂条件下的垂向二维水流运动；对于泥沙输移的计算，模拟了跨深槽水槽动床试验，并对悬沙含沙量的垂向分布与试验结果进行了对比，结果也吻合良好，说明本模型在泥沙输移模拟上也能基本满足科学研究中对模拟精度的需要，可以为工程实际提供科学参考和依据。

参考文献:

- [1] 曹祖德, 王运洪. 水动力泥沙数值模拟[M]. 天津: 天津大学出版社, 1994: 165-168.
- [2] 李世森, 李国杰, 蔡惊涛. 垂向二维悬沙输移有限元数学模型[J]. 港工技术, 2006(2): 6-9.
- [3] 时钟, 李世森. 垂向二维潮流数值模型及其在长江口北槽的应用[J]. 海洋通报, 2003(3): 2-9.
- [4] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.

(本文编辑 武亚庆)