

三峡大坝施工期水环境三维数值预测方法

韩龙喜

(河海大学水文水资源及环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 对三峡大坝一期围堰及二期围堰施工期不同的水流、污染物输运特性进行了分析, 建立了三峡大坝坝下水域三维水量、水质模型。模拟结果表明, 除在排污口形成的混合区内存在轻微污染外, 由于大坝下泄流量较大, 稀释能力较强, 整体水质状况主要取决于上游来水水质, 变化不大。

关键词: 三峡工程; 水环境; 三维数值模拟

中图分类号: TV 131.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2002)04-427-06

1997年三峡工程第一阶段施工任务完成, 实现大江截流, 第二阶段工程施工开始, 兴建了以厂房坝段为主体的左岸二期施工围堰。施工区长江主流由一期工程施工期的左岸调整到二期工程的右岸。本文建立了三维水力水质数学模型, 模拟预测施工期坝下水质的三维变化, 为该水域水污染控制、水环境保护与管理提供必备的工具。

1 三维水量水质数学模型

1.1 基本方程

笛卡尔坐标系下, 三维水流运动方程为

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (4)$$

式(1)为连续方程, 式(2)~(4)为动量方程。式中 u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向的流速分量; P 为动水压强; ρ 为水的密度; ν_t 紊动粘性系数

$$\nu_t = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

收稿日期: 2001-04-13; 修订日期: 2001-07-02

作者简介: 韩龙喜(1964-), 男, 江苏扬州人, 河海大学水文水资源及环境学院副教授, 博士, 主要从事计算水力学及水环境方面研究。

式中 K 为紊动能; ε 为紊动能耗散率; $C_\mu = 0.09$, K 、 ε 采用 $K-\varepsilon$ 模型求解。其中紊动能 K 的控制方程为

$$\frac{\partial K}{\partial t} + u \frac{\partial K}{\partial x} + v \frac{\partial K}{\partial y} + w \frac{\partial K}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{y_t}{\alpha_k} \frac{\partial K}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{y_t}{\alpha_k} \frac{\partial K}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{y_t}{\alpha_k} \frac{\partial K}{\partial z} \right) + P_K - \varepsilon \quad (6)$$

式中 P_K 为紊动能产生项; 紊动能耗散率 ε 的控制方程为

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{y_t}{\alpha_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{y_t}{\alpha_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{y_t}{\alpha_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} P_K - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (7)$$

式中 α_k , α_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ 为紊流模型常数, 分别为 $\alpha_k = 1.0$, $\alpha_\varepsilon = 1.32$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ 。

三维扩散质输运方程为三维对流扩散方程, 数学表示为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(E_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_C - K_C C \quad (8)$$

式中 C 为水质浓度; S_C 为污染源项; K_C 为降解系数; E_x , E_y , E_z 分别为 x , y , z 方向的紊动扩散系数。

1.2 边界条件

(1) 入流边界 Γ_1 水流边界采用第一类边界条件: $u|_{\Gamma_1} = u_m$, $v|_{\Gamma_1} = v_m$, $w|_{\Gamma_1} = w_m$, $K|_{\Gamma_1} = K_m$, $\varepsilon|_{\Gamma_1} = \varepsilon_m$; 水质边界采用第一类边界条件: $C|_{\Gamma_1} = C_m$, C_m 为进口断面各节点污染物浓度, 由水质监测资料插补分析得到。

(2) 出流边界 Γ_2 水流边界采用第二类边界条件: $\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = \frac{\partial w}{\partial n} = \frac{\partial K}{\partial n} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = \frac{\partial P}{\partial n} = 0$, $Z_S|_{\Gamma_2} = Z_{S \text{ out}}$, $Z_{S \text{ out}}$ 为出口断面各条垂线的水位, 可与二维计算耦合得到。水质边界采用第二类边界条件。

(3) 固壁边界 Γ_3 对固壁边界, 有 $\frac{u_T}{u^*} \Big|_{\Gamma_3} = \frac{1}{k} \ln(Z^* E)$, $u_n|_{\Gamma_3} = 0$, $K|_{\Gamma_3} = u_*^2 / \sqrt{C_\mu}$, $\varepsilon|_{\Gamma_3} = u_*^3 / k Z_n$, $\frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = 0$ 。其中 $k = 0.4$ 为卡门常数; u_T 为流速在 Γ_3 上的切向分量; u_n 为流速在 Γ_3 上的法向分量; u^* 为摩阻流速; E 为反映壁面糙率的参数, 对于水力光滑壁面取 9.0; $Z^* = Z_n u_* / \nu$, ν 为粘性系数; Z_n 为计算边界到壁面的距离, 调整 Z_n 使无量纲量 Z^* 满足 $30 < Z^* < 100$, 可以获得足够精确的结果。

(4) 自由水面边界 Γ_4 水流边界压力项采用第一类边界条件, 其它采用第二类边界条件。

2 数值计算方法

在三维水量、水质模拟时, 在平面上引进正交贴体坐标, 使得边界网格线贴岸布设, 有利于提高计算精度、减少物理存储和无效运算。

首先用正交曲线坐标变换将三维计算区域的平面区域变换为矩形区域, 用冻结法处理底部不规则边界, 用守恒性较好的有限体积法离散方程, 最后用SIMPLEC程式进行求解。

2.1 正交曲线坐标下的控制方程

引入正交曲线坐标变换

$$\xi = \xi(x, y), \quad \eta = \eta(x, y), \quad \zeta = z \quad (9)$$

式中 ξ 、 η 、 ζ 分别为变换平面上的纵向坐标、横向坐标、垂向坐标。

正交曲线坐标中的拉梅系数为 $h_\xi = \sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2}$, $h_\eta = \sqrt{x_\eta^2 + y_\eta^2}$, $h_\zeta = 1$ 。设流速在正交曲线坐标下的分量分别为 u 、 v 、 w 则有

$$u = \frac{x_\xi}{h_\xi}u + \frac{x_\eta}{h_\eta}v, \quad v = \frac{y_\xi}{h_\xi}u + \frac{y_\eta}{h_\eta}v, \quad w = w \quad (10)$$

在曲线坐标系下, 流速 u 、 v 、 w 及污染物浓度 C 的通用控制方程转化为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{h_\xi h_\eta} \frac{\partial}{\partial \xi} (h_\eta u \varphi) + \frac{1}{h_\xi h_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} (h_\xi v \varphi) + \frac{\partial}{\partial z} (w \varphi) \\ & = \frac{1}{h_\xi h_\eta} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\gamma_{\xi\xi} \frac{h_\eta}{h_\xi} \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \right] + \frac{1}{h_\xi h_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\gamma_{\eta\eta} \frac{h_\xi}{h_\eta} \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\gamma_{zz} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] + S_\varphi \end{aligned} \quad (11)$$

为表达方便, 以下 u 、 v 、 w 去掉上标“~”, 直接写成 u 、 v 、 w , 但此时是曲线坐标系下 ξ 、 η 、 ζ 方向的流速分量。

2.2 控制方程的离散^[1]

采用有限体积法离散方程, 变量布设采用交错网格技术。流速及污染物浓度通用控制方程在节点 P 的离散方程为

$$a_P \varphi_P = a_E \varphi_E + a_W \varphi_W + a_N \varphi_N + a_S \varphi_S + a_T \varphi_T + a_B \varphi_B + b \quad (12)$$

2.3 离散方程的求解

采用压力校正法求解水流方程, 该方法控制体积内物理量守恒性好, 动量方程中已隐含水流连续方程, 使得计算过程具有适应性强及计算稳定的特点。对水质离散方程, 由于 J. B. Scarborough 提出的高斯-赛得尔条件得到满足, 可采用迭代法或 ADI 逐行法计算^[2]。

3 三峡工程施工期水质模拟

3.1 网格布设及进口边界条件处理

计算区域为茅坪溪出口以上 900 m 至出口下游 2 000 m 的共 2 900 m 水域。平面网格采用正交曲线网格, 共有 54×37 网格节点。在垂向上, 分为 14 层, 纵向网格长 50 m 左右, 横向网格长 20 m 左右。

计算区域上边界流速按对数型垂线流速分布公式给出各网格节点流速, 对数流速分布公式为

$$V = V_m (1.116 + 0.267 \ln \eta) \quad (13)$$

式中 η 为由河底向上起算的相对水深; V_m 为垂线平均流速; V 为网格节点的流速。

根据式(13), 可得到各个方向的流速分量。出流边界的水位, 根据三峡大坝至葛洲坝间水域的二维模拟计算得到。对茅坪溪入流, 由于入流流量很小($1 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右), 因而动量较小, 在水流、水质模拟时, 忽略其入流动量对模拟水域的影响。对污染源输入, 以单位时间 COD 干物质排放量作为源强, 从相邻的岸边表层控制体进入。

3.2 浓度扩散系数的选取^[3]

$$E_{\xi\xi} = \alpha_{\xi} h u^*$$

$$E_{\eta\eta} = \alpha_{\eta} h u^*$$

$$E_{zz} = \alpha_z h u^*$$

式中 $E_{\xi\xi}$ 、 $E_{\eta\eta}$ 、 E_{zz} 分别为纵向、横向、垂向扩散系数； α_{ξ} 、 α_{η} 、 α_z 为经验常数，分别取为 4.0、0.50、0.067。

3.3 三峡施工期水环境模拟

采用 1996–1997 年丰、平、枯 3 次水文、水质同步观测资料进行模型率定，采用 1998–1999 年丰、平、枯 3 次水文、水质同步观测资料进行模型验证，水量模型验证和水质模型验证计算成果分别见表 1 和表 2。

表 1 水量模型验证水面测点流速计算与监测成果

Table 1 Observed and calculated velocities at nodes on water surface

断面位置	1998 年 7 月 31 日			1998 年 10 月 31 日			1999 年 2 月 25 日		
	起点距/m	$V_{\text{测}}/(m \cdot s^{-1})$	$V_{\text{计}}/(m \cdot s^{-1})$	起点距/m	$V_{\text{测}}/(m \cdot s^{-1})$	$V_{\text{计}}/(m \cdot s^{-1})$	起点距/m	$V_{\text{测}}/(m \cdot s^{-1})$	$V_{\text{计}}/(m \cdot s^{-1})$
茅坪溪口	30	4.46	4.02	30	0.78	1.23	30	0.55	0.53
上游 100m	100	4.11	4.26	100	1.28	1.47	100	0.72	0.73
茅坪溪口	30	3.76	3.52	30	1.20	1.22	30	0.66	0.55
下游 50m	100	2.93	2.91	100	1.27	1.38	100	0.45	0.72
茅坪溪口	30	3.84	3.44	30	1.11	1.16	30	0.68	0.47
下游 100m	100	3.55	4.20	100	1.09	1.26	100	0.63	0.71
茅坪溪口	30	1.55	1.74	30	1.24	1.12	30	0.61	0.41
下游 200m	100	3.04	3.67	100	1.12	1.22	100	0.60	0.68
茅坪溪口	30	0.58	0.55	30	0.32	0.43	30	0.37	0.20
下游 500m	100	1.69	1.95	100	0.72	1.06	100	0.44	0.38
茅坪溪口	30	0.88	0.80	30	0.17	0.11	30	0.15	0.11
下游 2000m	100	1.00	1.26	100	1.04	0.67	100	0.25	0.20

表 2 水质模型验证水面测点 COD_{Mn} 浓度计算与监测成果

Table 2 Observed and calculated pollutant concentrations at nodes on water surface

断面位置	1998 年 7 月 31 日			1998 年 10 月 31 日			1999 年 2 月 25 日		
	起点距/m	$C_{\text{测}}/(mg \cdot s^{-1})$	$C_{\text{计}}/(mg \cdot s^{-1})$	起点距/m	$C_{\text{测}}/(mg \cdot s^{-1})$	$C_{\text{计}}/(mg \cdot s^{-1})$	起点距/m	$C_{\text{测}}/(mg \cdot s^{-1})$	$C_{\text{计}}/(mg \cdot s^{-1})$
茅坪溪口	30	2.3	2.2	30	2.6	2.3	30	1.8	1.7
下游 50m	100	2.2	2.0	100	2.3	2.0	100	1.8	1.7
茅坪溪口	30	2.2	2.2	30	2.3	2.3	30	1.7	1.7
下游 100m	100	2.1	2.0	100	2.2	2.0	100	1.6	1.6
茅坪溪口	30	2.1	2.2	30	2.2	2.0	30	1.6	1.6
下游 200m	100	2.0	2.0	100	2.1	2.0	100	1.6	1.6
茅坪溪口	30	2.2	2.1	30	2.1	2.0	30	1.6	1.6
下游 500m	100	2.1	2.1	100	2.0	2.0	100	1.6	1.6
茅坪溪口	30	2.1	2.0	30	2.0	2.0	30	1.7	1.6
下游 2000m	100	2.0	2.0	100	1.9	1.9	100	1.7	1.6

经统计分析，水量模拟率定时，计算流速平均绝对误差为 0.08 m/s，平均相对误差为 20.4%。模拟验证时，计算流速平均绝对误差为 0.22 m/s，平均相对误差为 23.2%。水质参数率定时，计算浓度平均绝对误差为 1.79 mg/L，平均相对误差为 19.4%。模拟验证时，平均绝对误差为 0.09 mg/L，平均相对误差为 5.2%。本文水质模型验证误差较模型率定小，是因为模

型验证较模型率定时污染源源强大大减小, 上边界入流浓度对监测点浓度影响程度加大所致。图1为1999年2月25日二期围堰施工期水流模拟的水面流速分布。模拟结果显示, 水流被围堰缩窄后突然放大, 在围堰后形成一较大尺度的回流, 与观测结果吻合。往下游, 受地形影响作用加大, 水流流态综合反映了来流及地形的影响。

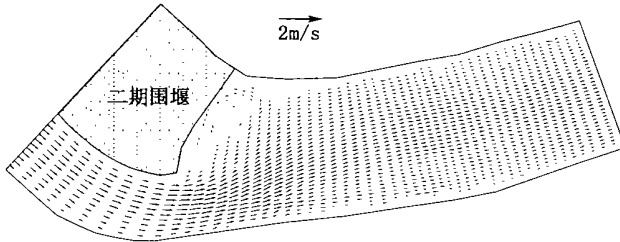


图1 水面流速矢量分布(25/02/1999)

Fig. 1 Velocity vector in the water surface

图2、图3为1999年2月25日二期围堰施工期水质模拟的浓度分布情况。由于不计排放口动量的影响, 故断面最大浓度沿岸分布。

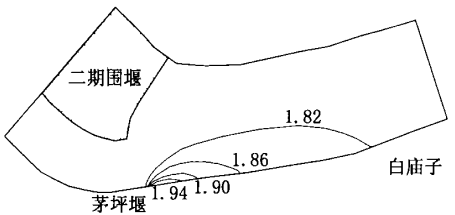


图2 第12层(水位58.16m) COD_{mn} 浓度分布
(25/02/1999)

Fig. 2 COD Concentration in twelfth layer

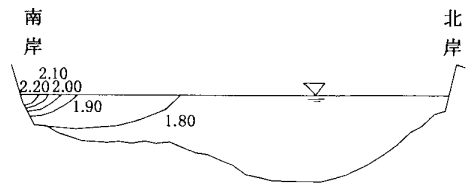


图3 茅坪溪口下40m断面 COD_{mn} 浓度分布
(25/02/1999)

Fig. 3 COD Concentration in the lower section of
Maopingxi

4 结 论

(1) 三峡工程在施工过程中, 水流条件发生了急剧变化, 相应的扩散质的传输特性也发生变化。由于施工水域水深流急, 以采用三维水力、水质模拟方法为宜。因围堰附近水流呈各向异性, 用双方程紊流模型模拟虽存在一定缺陷, 但仍不失为一种有效方法。

(2) 三维水力数值模拟结果显示, 水流流态综合反映了来流及地形的综合影响。在围堰施工期, 由于来流受到断面束窄的影响, 水流紊动剧烈, 往下游来流影响作用减小, 水流受边壁的影响明显显示出来。

(3) 三维水质数值模拟结果显示, 在排放口形成的污染带范围内, 沿横断面方向, 离岸边距离越远, 浓度梯度越小, 上层浓度大于下层浓度。浓度场的分布特征符合扩散质在水体中的紊动输运机理。

(4) 在一般的水质模拟中, 污染物的自净系数是一个敏感参数, 其如何取值对模拟结果影响

较大。由于三峡坝区水体纵向距离较小、水流流速较大,故对流、扩散作用占主导地位,自净系数是一个不敏感参数,对三维模拟结果影响较小。

参考文献:

- [1] Patankar S v, Spalding D b. A calculating Procedure for Heat Mass and Momentum Transfer in Three Dimensional Parabolic Flow[J]. Heat mass Transfer, 1972, 12: 1787- 1806.
- [2] 金忠青. N S 方程数值解及紊流模型[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. 123- 126.
- [3] 张书农. 环境水力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. 104- 150.

3-D numerical simulation for water environment in the region of Three-Gorge Project during construction period

HAN Long-xi

(College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Because of construction of the world famous Three Gorge Project, the local turbulent flow, compared to the original, has been changed greatly. The variation of hydrodynamics results in change of water environment. Based on the features of hydrodynamics and contaminant transportation of the water body affected by constructing the Three-Gorge Project's first- and second-stage cofferdam, this paper establishes a 3-D hydraulic and water quality model. The results of simulation indicate that there is a pollution zone in the area close to the discharge outlet, but the polluted range and the contaminant concentration is not big. Most of the water body is not affected and the water quality is close to that of inflow.

Key words: Three-Gorge Project; water environment; 3-D numerical simulation