

正交曲线坐标系准三维全沙数学模型

朱木兰¹, 金海生²

(1. 厦门理工学院水资源环境研究所, 福建 厦门 361005; 2. 日本工营株式会社中央研究所, 日本 筑波 300-1259)

摘要: 为了定量地预测规划河道特别是规划河堰附近的河床冲淤情况, 做好拦河堰与河道的规划工作, 建立了一个能考虑各泥沙粒径组的级配、流线曲率与流路曲率的差异以及能同时对推移质与悬移质泥沙进行计算的准三维全沙数学模型。用正规划重建倒伏式拦河堰的某河的现有河道实测资料对该模型进行了验证。验证结果表明, 冲淤计算结果与实测结果基本一致。以该河规划重建的倒伏式拦河堰为讨论对象, 取其上下游一定的规划河道区间为计算河段, 对设计洪水时的冲淤情况进行了模拟预测。预测结果表明, 该模型的水位计算结果与一维非均匀流模型的计算结果基本一致并更符合河道的水流特征, 河道冲淤趋势符合河道及水流的特征, 规划堰上下游附近的河床冲刷量最大为 3.0 m, 整个计算河段的冲淤量也在 -3.0 ~ 3.0 m 范围内。可见, 规划河道具有较好的稳定性, 规划堰的选址是比较合适的。

关键词: 拦河堰; 准三维模型; 全沙; 推移质; 悬移质; 流线曲率; SIMPLER 法

中图分类号: TV147+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2008)04-0525-07

拦河堰通常由坚硬固定的混凝土制成, 平时虽可抬高水位以利引水, 但洪水来袭时, 却也会因为水位的上升而不利于两岸堤防的安全性。近年来, 随着工程技术的提高, 一种新型的倒伏式拦河堰正逐步得到广泛应用。这种倒伏式拦河堰平时可像一般的拦河堰一样, 抬高水位以利引水, 而洪水时, 则可完全倒伏下去, 使洪水顺利宣泄, 确保堤防安全。一些河流上的拦河堰由于建筑物陈旧, 或由于旧式的非倒伏式结构阻碍了洪水下泄等原因, 面临着需要拆除重建, 河道重新进行规划的问题。为了做好倒伏式拦河堰与河道整体的规划工作, 建立一个能定量预测规划河道特别是规划河堰附近河床冲淤情况的数学模型是很有必要的。

考虑到拦河堰附近的河段其泥沙组成细小, 计算模型除了考虑推移质泥沙之外还有必要考虑悬移质泥沙。目前, 虽有不少关于河床冲淤的一、二维的数学模型, 但关于准三维和三维全沙模型的研究还比较缺乏。此外, 现有的数学模型, 或仅仅考虑了代表粒径, 或只考虑了推移质泥沙, 或没有考虑流线与流路曲率的差异。比如, 芦田等^[1]的二维数学模型, 虽然考虑了泥沙的粒径分布, 但该模型没有包含对悬移质泥沙的计算, 故仅适用于推移质泥沙占主导地位的山区河流, 且该模型没有考虑流线与流路曲率的差异。而通常情况下, 水流的弯曲形状与弯道的弯曲形状是不一致的(图1)。凹岸冲刷最强烈的部位, 其流线的曲率与弯道的曲率迥然不同。为了提高对弯道冲刷位置、冲刷深度以及整个河床变形情况的预测精度, 西本等^[2]提出了采用流线曲率来计算弯道环流以及输沙量的二维数学模型。但该模型仅仅考虑了代表粒径, 仅能用于推移质泥沙计算。

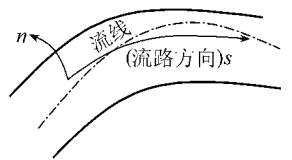


图1 正交曲线坐标系的定义
Fig.1 Definition of the orthogonal curvilinear coordinates

从兼顾计算精度与实际工程的应用性需要出发, 采用准三维全沙模型来预测河道冲淤情况是比较合适的。本文针对现有河床冲淤数学模型的不足, 建立了一个能考虑各泥沙粒径组的级配、流线曲率与流路曲率的差异以及能同时对推移质与悬移质泥沙进行计算的准三维全沙数学模型, 并用规划重建倒伏式拦河堰的某河其现有河道的实测资料对该模型进行了验证, 以该河规划重建的倒伏式拦河堰为讨论对象, 取其上下游一定的规划河道区间为计算河段, 对设计洪水时的冲淤情况进行了模拟预测。

收稿日期: 2007-09-25

基金项目: 福建省自然科学基金(D0740002); 厦门理工学院引进人才科学技术研究(700110)

作者简介: 朱木兰(1967—), 女, 福建厦门人, 博士, 主要从事水资源水文、河流动力学和水污染控制研究。

1 准三维全沙数学模型

1.1 水流计算

为了能很好地处理河流蜿蜒曲折的边界条件,本模型采用了如图 1 所示的正交曲线坐标系(s, n).

本文以 Kalkwijk 等^[3]的研究结果为基础,在采用曲线坐标系的二维浅水控制方程式^[1-2]中导入了考虑弯道次生环流影响的 2 个附加项,得到如下考虑了次生环流影响的准三维水流模型. 其中,式(1)(2)分别为 s, n 方向的运动方程式,式(3)为连续方程式.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{uv}{r_s} - \frac{v^2}{r_n} + \frac{k_{sn}}{h} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{u^2 h^2}{r_s} \right) + 2k_{sn} \frac{u^2 h}{r_s^2} =$$
$$-g \frac{\partial H}{\partial s} - \frac{\tau_s}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial n} \right)$$

(1)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} + \frac{uv}{r_n} - \frac{u^2}{r_s} =$$
$$-g \frac{\partial H}{\partial n} - \frac{\tau_n}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial s} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial n} \right)$$

(2)

$$\frac{\partial (uh)}{\partial s} + \frac{\partial (vh)}{\partial n} + \frac{vh}{r_s} + \frac{uh}{r_n} = 0$$

(3)

式中: u, v —— s, n 方向的垂线平均流速; r_s, r_n —— s, n 坐标线的曲率半径; g ——重力加速度; H ——水位; h ——水深; ϵ ——紊动黏性系数; τ_s, τ_n —— s, n 方向的床面剪切力; k_{sn} 的计算公式为

$$k_{sn} = 5 \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} - 15.6 \left(\frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right)^2 + 37.5 \left(\frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right)^3$$

(4)

式中: κ ——卡门常数, $\kappa = 0.4$; C ——Chezy 常数.

需要特别指出的是,方程式(1)中的 $\frac{k_{sn}}{h} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{u^2 h^2}{r_s} \right)$ 与 $2k_{sn} \frac{u^2 h}{r_s^2}$, 就是考虑弯道次生环流影响的 2 个附加项. 对于实际工程,采用三维方程过分繁琐,而采用二维方程又难于有效模拟弯道的水流与冲淤特性,所以,本文采用在平面二维方程中加入考虑垂向特性的影响项(弯道次生环流的影响项)的模型,即准三维模型.

1.2 河床冲淤量与各粒径组级配的计算

1.2.1 河床冲淤量的计算

在考虑全沙的条件下,河床冲淤量可按如下式(5)所示的泥沙连续式进行计算.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \sum_k \left\{ \frac{\partial q_{bsk}}{\partial s} + \frac{\partial q_{bnk}}{\partial n} + \frac{q_{bnk}}{r_s} + \frac{q_{bsk}}{r_n} + (E_{sk} - D_{sk}) \right\} = 0$$

(5)

式中: k ——粒径的分组数; q_{bsk} —— d_k 粒径组在 s 流路方向的推移质单宽输沙率; q_{bnk} —— d_k 粒径组在 n 方向的推移质单宽输沙率; z_b ——河床高度; E_{sk}, D_{sk} —— d_k 粒径组的浮上量与沉降量; λ ——河床材料的孔隙率.

1.2.1.1 悬移质与推移质泥沙的存在比例

在流速比较缓慢的情况下,推移质与悬移质 2 种状态的泥沙同时存在. 一部分泥沙沿着河床底面以推移质的形式被输送,另一部分则浮到水中以悬移质的形式被输送. 当泥沙开始启动但水流相对较弱时,泥沙仅以推移质的形式被输送,但随着水流强度的增大,开始有泥沙进入悬浮状态,泥沙将同时以推移质和悬移质形式被输送. 因为悬移质的移动速度接近于水流速度,悬移质的输沙量将大于推移质的输沙量,当水流强度在一定范围以上时,推移质的输沙量可以忽略不计. 另一方面,泥沙能悬浮于水中被输送是因为垂直向上的紊动强度克服了泥沙因重力引起的下沉,而根据边界层理论的研究结果,壁面紊流的垂向紊动强度与壁面摩阻流速 u_* 成比例,其比例系数为 0.60~0.93. 因此,可近似认为,当 $W_{sk} \leq (0.60 \sim 0.93) u_*$, 即当 $\frac{u_*}{W_{sk}} \geq (1.08 \sim 1.67)$ 时泥沙能保持悬浮输送. 本文参考 Spasojevic 等的方法^[4],利用如下式(6)对推移质与悬移质泥沙所占比例进行计算.

$$\gamma_{sk} = \left(\frac{q_s}{q_{t_{sk}}} \right) = A_r + B_r \ln \left(\frac{u_*}{W_{sk}} \right) \quad (6)$$

式中: q_s ——悬移质输沙量; $q_{t_{sk}}$ ——全沙(推移质+悬移质)输沙量; W_{sk} —— d_k 粒径组的沉速; A_r, B_r ——系数, $A_r = -0.0346, B_r = 0.45$ (这相当于 $u_*/W_{sk} < 1.08$ 时, $\gamma_{sk} = 0$, 即悬移质输沙量为 0; $u_*/W_{sk} > 10$ 时, $\gamma_{sk} = 1$, 即全部为悬移质输沙, 推移质输沙可忽略不计)。

1.2.1.2 推移质单宽输沙率 q_{bsk} 和 q_{bnk} 的计算

为了计算出流路方向的单宽输沙率 q_{bsk} 和与之正交的 n 方向的单宽输沙率 q_{bnk} , 首先采用如下式(7)所示的芦田-道上修正式^[15]与式(8)所示的长谷川式^[6]来计算出流线方向 s 和与之垂直的 n 方向的单宽输沙率 q_{bsk} 与 q_{bnk} , 然后基于式(10)(11)所示的变换式, 对 q_{bsk}, q_{bnk} 进行转换计算, 求出流路方向的 q_{bsk} 和其垂直方向的 q_{bnk} 。这里, 式(7)是在芦田-道上所提出的只有推移质泥沙存在的原有式子上, 考虑到一部分泥沙以悬移质形式被输送的情况, 将原有式子乘上推移质泥沙所占比例 $(1 - \gamma_{sk})$ 进行修正而获得的计算式。

芦田-道上修正式

$$\frac{q_{bsk}}{\sqrt{dgd_k^3}} = (1 - \gamma_{sk}) \times 17P_{bk} \frac{u_{*e}^3}{(dgd_k)^2} \left(1 - \frac{u_{*ck}^2}{u_*^2} \right) \left(1 - \frac{u_{*ck}}{u_*} \right) \quad (7)$$

长谷川式

$$q_{bnk} = q_{bsk} \left(\frac{\hat{v}'_b}{V_b} - \frac{1}{\sqrt{\mu_s \mu_k}} \frac{u_{*ck}}{u_*} \frac{\partial z}{\partial n} \right) \quad (8)$$

式中: d ——水中泥沙相对密度, $d = 1.65$; u_* ——摩阻流速; u_{*e} ——有效摩阻流速; u_{*ck} ——混合沙的 k 粒径组的临界摩阻流速; P_{bk} ——交换层中 d_k 粒径组的级配; μ_s ——静摩擦系数; μ_k ——动摩擦系数; $\frac{\partial z}{\partial n}$ ——与流线正交的方向的河床坡降; V_b ——水流的底部流速; $\hat{v}'_b$ ——由次生环流所产生的 n 方向的底部流速。 $\hat{v}'_b$ 的计算公式为

$$\hat{v}'_b = -N_* \frac{h}{r} V_b \quad (9)$$

式中: N_* ——Engelund 常数^[7]; $\frac{1}{r}$ ——流线曲率^[2]。最后, 将流线方向 s 和与之垂直的 n 方向的单宽输沙率的计算值 q_{bsk}, q_{bnk} 转换成流路方向 s 以及其正交方向 n 的计算值 q_{bsk}, q_{bnk} 。转换计算公式为^[2]

$$q_{bsk} = q_{bsk} \frac{u}{V} - q_{bnk} \frac{v}{V} \quad q_{bnk} = q_{bsk} \frac{v}{V} + q_{bnk} \frac{u}{V} \quad (10)$$

式中 V 为垂线平均流速。

1.2.1.3 悬移质泥沙的浮上量 E_{sk} 与沉降量 D_{sk} 的计算

a. 浮上量 E_{sk} 的计算. d_k 粒径组的悬移质泥沙的浮上量 E_{sk} 的计算公式为

$$E_{sk} = W_{sk} C_{ek} \quad (11)$$

式中 C_{ek} 为 d_k 粒径组的平衡基准面的体积分数(或泥沙含量), 其计算公式为

芦田-道上式

$$C_{ek} = 0.025 P_{bk} \left[\frac{g(\xi_0)}{\xi_0} - \alpha(\xi_0) \right] \quad (12)$$

其中

$$g(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi_0^2\right) \quad \alpha(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\xi_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi^2\right) d\xi \quad \xi_0 = \frac{W_{sk}}{0.75u_*} \quad (13)$$

b. 沉降量 D_{sk} 的计算. d_k 粒径组的悬移质泥沙的沉降量 D_{sk} 与因重力作用所产生的沉速有关, 其计算公式为

$$D_{sk} = W_{sk} C_{ak} \quad (14)$$

式中 C_{ak} 为 d_k 粒径组的底面体积分数。基于 Lane-Kalinske 的铅直体积分数分布式, 底面体积分数 C_{ak} 与水深平均体积分数 C_k 的关系表达式为

$$C_{ak} = \frac{\alpha}{1 - e^{-\alpha}} C_k \quad (15)$$

式中 $\alpha = \frac{15W_{sk}}{u_*} \left(1 - \frac{a}{h} \right)$, $a = 0.05h$ 。另一方面, 水深平均体积分数 C_k 可根据对非恒定三维对流扩散方程式

进行水深方向积分后所得的式(16)进行计算.

$$\frac{\alpha h C_k}{\partial t} + \frac{\alpha h u C_k}{\partial s} + \frac{\alpha h v C_k}{\partial n} + \frac{h u C_k}{r_n} + \frac{h v C_k}{r_s} = \frac{\alpha [h(-\overline{u' C'_k})]}{\partial s} + \frac{\alpha [h(-\overline{v' C'_k})]}{\partial n} + \frac{h(-\overline{u' C'_k})}{r_n} + \frac{h(-\overline{v' C'_k})}{r_s} + (E_{sk} - D_{sk}) \quad (16)$$

$$\text{其中} \quad -\overline{u' C'_k} = \epsilon_{ss} \frac{\partial C_k}{\partial s} \quad -\overline{v' C'_k} = \epsilon_{sn} \frac{\partial C_k}{\partial n} \quad (17)$$

式中 ϵ_{ss} 、 ϵ_{sn} 分别为 s 、 n 方向的悬移质泥沙体积分数的扩散系数.

1.2.2 各粒径组级配的计算

伴随着河床变形,交换层中泥沙的各粒径组级配也随之发生变化,其变化量可通过式(18)进行推算.

$$\frac{\partial P_{bk}}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)E_m} \left(\frac{\partial q_{bsk}}{\partial s} + \frac{\partial q_{bnk}}{\partial n} + \frac{q_{bnk}}{r_s} + \frac{q_{bsk}}{r_n} + D_{sk} - E_{sk} \right) + \frac{1}{E_m} \frac{\partial z_b}{\partial t} [\eta P_{bk} + (1-\eta)P_{bko}] = 0 \quad (18)$$

式中: λ ——泥沙的孔隙率; P_{bko} ——交换层下层的 d_k 粒径组的级配; E_m ——交换层的厚度; η ——系数,冲刷条件下 $\eta=0$,淤积条件下 $\eta=1$,即

$$\eta = \begin{cases} 1 & \frac{\partial z_b}{\partial t} > 0 \\ 0 & \frac{\partial z_b}{\partial t} < 0 \end{cases} \quad (19)$$

1.3 计算方法

为了避免产生振动解,计算中采用了交错网格法^[8].对于水流计算,首先对控制方程(1)和(2)中的对流项采用迎风差分,其他项采用中心差分;其次对连续方程式采用中心差分^[9].对于河床冲淤计算,对式(16)中的时间项 $\frac{\alpha h C_k}{\partial t}$ 采用时间前差分,对流项 $\frac{\alpha h u C_k}{\partial s}$, $\frac{\alpha h v C_k}{\partial n}$ 采用迎风差分,扩散项等其他附加项采用中心差分.此外,对泥沙连续式(5)以及交换层中各粒径组级配的计算式(18)中的 $\frac{\partial z_b}{\partial t}$, $\frac{\partial P_{bk}}{\partial t}$ 时间项采用时间前差分, $\frac{\partial q_{bsk}}{\partial s}$ 项采用迎风差分^[10-11], $\frac{\partial q_{bnk}}{\partial n}$ 项采用中心差分.采用 Patankar^[8]提出的 SIMPLER 计算方法,由离散后的水流控制方程式(1)(2)(3)联立求解出 u 、 v 、 H 、 h 各个变量的值,采用 ADI 方法,由式(16)求出水深平均体积分数 C_k .假定在微小时间段 Δt 内,所求出的水流状态(u 、 v 、 H 、 h)保持不变,则根据式(5)和(18)可求出该微小时间段的河床变动量和各粒径组级配的变化量,从而可推算出下个时刻($t+\Delta t$)的河床高和各粒径组的级配.

2 模型的验证与应用

目前,某河正在进行河道整治规划.与此相配套,正规划将现有的固定式河堰改建成新的倒伏式河堰.本文计算对象为以规划堰为中心的上下游约为 5 km 的规划河段,其河道宽度约为 662 m.计算网格总数为 6618 个,网格平均大小约为 22.4 m × 22.8 m.为了提高计算精度,网格布置时除考虑河岸堤防的形状外,还考虑了河漫滩与主槽的内部边界形状.

2.1 模型的验证

由于是规划河道,目前没有实测资料进行验证.为此,采用如下方法对模型进行验证:首先,针对现有河道在 1982 年 9 月 1 日洪水(洪峰流量为 7758 m³/s)条件下进行河床变形的模拟计算.水流计算条件为上游进口断面给定洪水过程线、下游出口断面给定水位过程线.进口输沙率采用平衡供沙条件,上游边界的悬沙体积分数采用平衡体积分数.其理由是:由于缺少进口实测输沙率资料,通过对比历年的河床高程测量图,将计算始断面选择在一个河床高程基本保持不变的断面上,从而可以认定该计算始断面的供沙与输沙率基本处于一种平衡状态.模拟结果表明,洪水过后现有固定拦河堰下游主槽出现冲刷,冲刷深度在 5~7 m 范围内.这与洪水前后拦河堰下游附近的实测结果基本一致.然后,针对本文所讨论的对象即规划河道,将一维非均

匀流模型与本文模型的计算水位进行比较,以对本文模型进行进一步的验证.计算流量为 $11\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的设计洪水流量.河床主槽的曼宁糙率系数设定为 0.022 ,河漫滩的曼宁糙率系数设定为 0.030 . 2 种模型的计算水位比较如图 2 所示.

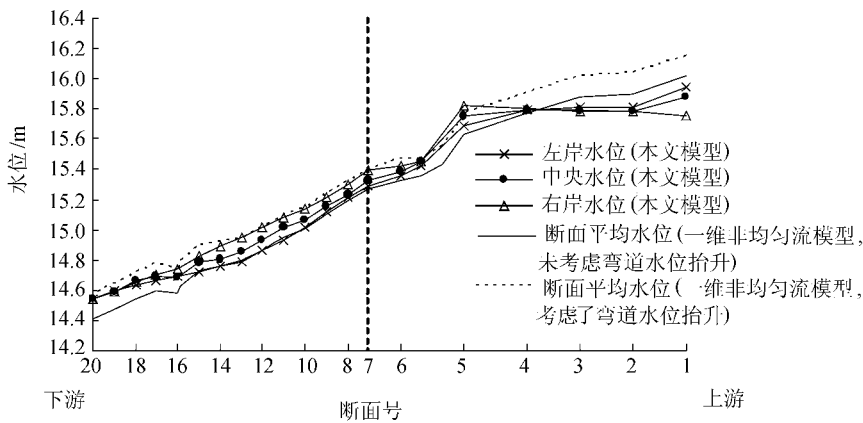


图 2 本文模型与一维非均匀流模型计算水位的比较

Fig.2 Comparisons of water levels between the proposed model and a one-dimensional non-uniform model

从图 2 可知,除上游端外,本文模型左岸、中心和右岸这 3 处的水位值基本位于一维非均匀流模型的 2 条断面平均水位曲线之间.但在上游端,本文模型与一维非均匀流模型存在一定差异,这是因为上游端附近的河道主槽存在急扩急缩现象,形状较为复杂.一维非均匀流模型由于无法精确地考虑河道平面形状变化的影响,其计算结果与本文模型的计算结果存在一定的差异.本文模型的计算结果更符合对象河道的地形特征.

2.2 模型的应用

应用本文模型对规划河道进行冲淤模拟预测,以研究倒伏式的新堰建成后的上下游冲淤变化情况.以图 3 所示的设计洪水过程线作为计算始断面的洪水条件,以图 4 所示的水位过程线作为计算出口断面的水位条件.此外,河床泥沙组成条件以拦河堰为界,上下游呈现出较大的差异.粒径分布如表 1 所示.供沙条件采用平衡供沙条件,其理由如前所述.拦河堰所在位置的床面设定为不可冲刷,洪水过程中拦河堰处于完全倒伏状态.河床冲淤模拟预测结果如图 5 所示.

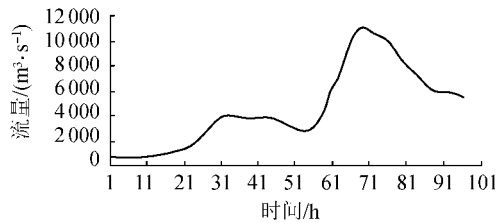


图 3 设计洪水过程线

Fig.3 Design flood hydrograph

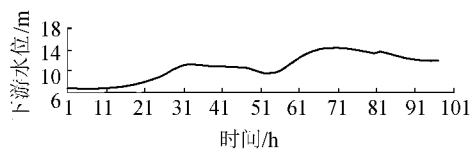


图 4 下游水位过程线

Fig.4 Water level hydrograph at the downstream boundary

表 1 河床泥沙的粒径分布

Table 1 Size distribution of riverbed material		
泥沙各粒径组粒径/mm	各粒径组级配/%	
	拦河堰上游	拦河堰下游
0.003 2	0	15
0.014 0	0	1
0.024 0	0	4
0.037 0	2	6
0.051 0	2	8
0.075 0	2	10
0.106 0	3	14
0.250 0	16	33
0.425 0	40	4
0.850 0	26	5
2.000 0	5	0
4.750 0	4	0

从图 5 可知:断面 3~5 区间由于河道断面比较宽,流速比较缓慢,主要呈现出堆积倾向,堆积高度为 $0.25\sim1.0\text{ m}$,最大堆积高度为 2.0 m .而拦河堰附近的上下游区间,即断面 5~13 区间由于河道断面渐渐变窄,水流渐渐加速,则呈现出冲刷倾向,最大冲刷量出现在拦河堰上下游附近,冲刷深度为 $2.5\sim3.0\text{ m}$.其后的断面 14~20 区间,由于河床主槽右岸原河床比较低,水流主要集中于主槽右岸,再加上弯道次生环流的作用,该区间的右岸即凹岸呈现出冲刷趋势,其冲刷深度为 $1.0\sim2.0\text{ m}$,而河床主槽左岸由于河床比较高,水深

较小,挟沙能力较低,上游区间冲刷下来的泥沙便在这里发生淤积,淤积高度为1.0~2.0 m,最大淤积高度为3.0 m.

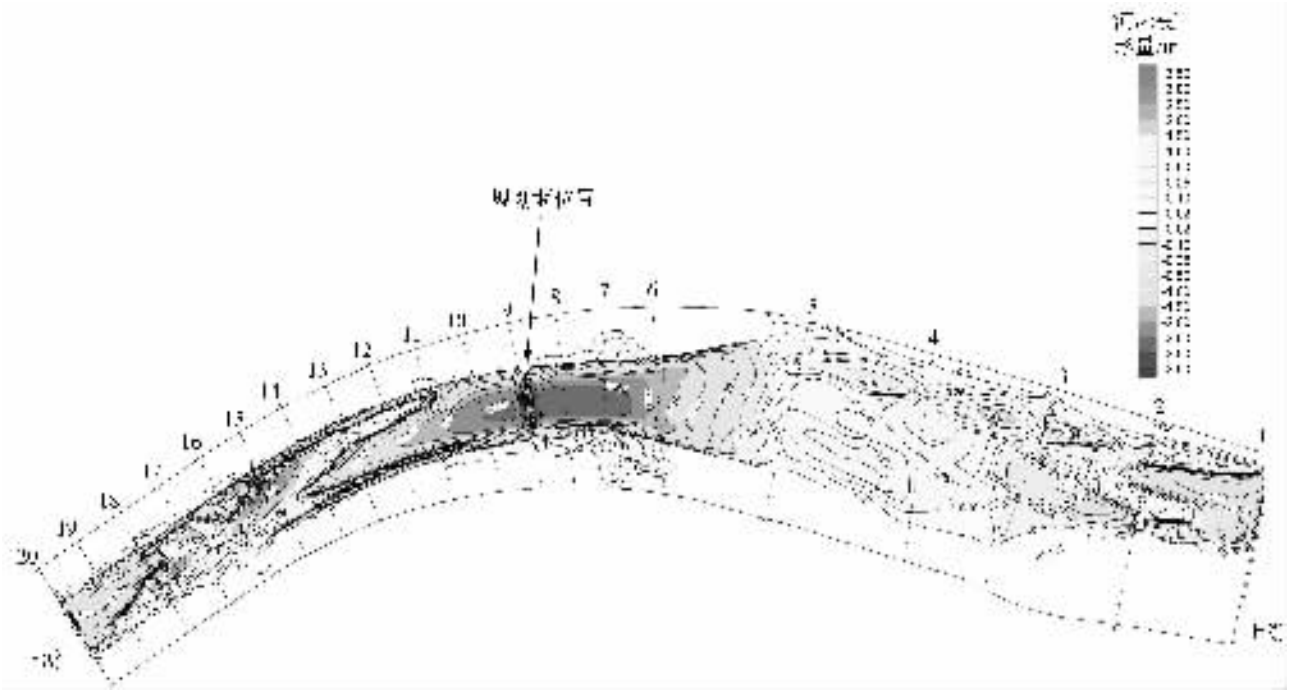


图5 河床冲淤模拟预测结果

Fig.5 Prediction of riverbed variation

上述分析结果表明,模拟预测结果所呈现出的冲淤情况符合河道及水流的特征.此外,拦河堰上下游附近的河床最大冲刷深度为3.0 m,整个计算河段的冲淤量也在-3.0~3.0 m范围内.可见,规划河道具有较好的河道稳定性,规划拦河堰的选址也是比较合适的.

3 结 论

a. 弯道次生环流对输沙率有极大的影响,而其强弱与流线曲率有密切关系.一般的模型通常简单地用流路曲率来代替流线曲率.实际上,河道越弯曲,两者的差异往往越大.本文模型考虑了两者的差异,在计算输沙率时采用了流线曲率.此外,本文模型还在平面二维浅水方程式中加入了反映水流垂向特性的影响项,考虑了各泥沙粒径组的级配以及推移质与悬移质泥沙的全沙计算.因此,本文模型更适用于弯道和拦河堰附近的河床冲淤计算.

b. 模型的验证计算结果表明,本文所提出的准三维全沙数学模型具有一定的计算精度.

c. 模型的应用计算结果表明,本文所建立的准三维全沙数学模型对河道冲淤的模拟预测结果符合河道及水流的特征,规划拦河堰上下游附近的河床最大冲刷深度为3.0 m,整个计算河段的冲淤量也在-3.0~3.0 m范围内.可见,规划河道具有较好的河道稳定性,规划拦河堰的选址是比较合适的.

参考文献:

[1] 昉田和男,江头进治,刘炳义.蛇行流路における流砂の分级および河床 动に関する数值解析[J].水工学论文集,1991,35:383-390.

[2] 西本直史,清水康行.流綫の曲率を考慮した蛇行水路の河床 动計算[J].土木学会论文集,1992,456:11-20.

[3] KALKWILK J P Th,DE VRIEND H J. Computation of the flow in shallow river bends[J]. Journal of Hydraulic Research,1980,18(4):327-342.

[4] GESSLER D,HALL B,SPASOJEVIC M et al. Application of 3D mobile bed hydrodynamic model[J]. Journal of Hydraulic Engineering,ASCE,1999,125(7):737-749.

[5] 日本土木学会.水理公式集第2编河川编平成11年版[M].东京:日本土木学会,1999:163-165.

- [6] 长谷川和义. 洄积蛇行の平面及び河床形状と流れに關する水理学的研究 [D]. 札幌 北海道大学 ,1983.
- [7] ENGELUND F. Flow and bedtopography in channel bend[J]. Journal of Hydraulic Division ,ASCE ,1974 ,100(HY11) :1631-1648.
- [8] PATANKAR S V. Numerical heattransfer and fluid flow[M]. Washington ,D C : Hemisphere Publishing Corporation ,1980.
- [9] ZHU Mu-lan ,SHIMIZU Y ,NISHIMOTO N. Calculation of curved open channel flow using physical curvilinearnon-orthogonal coordinates [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids ,2004 ,44(1) :55-70.
- [10] 横山洋 ,渡边康玄 ,铃木优一 .2ウエイ低水路を有する河川における河床 動計算に關する研究 [J]. 水工论文集 ,2003 ,48 :201-206.
- [11] 横山洋 ,铃木优一 ,渡边康玄 .分岐・合流流れを有する河川における河床 動計算に關する研究 [J]. 北海道開 土木研究所月报 ,2004 ,615 :2-9.

Quasi-three-dimensional mathematical model of total sediment transport in orthogonal curvilinear coordinates

ZHU Mu-lan¹ , JIN Hai-sheng²

- (1. *Water Resources and Environmental Institute , Xiamen University of Technology , Xiamen 361005 , China ;*
2. *Research and Development Center , Nippon Koei Co. , LTD. Tsukuba 300-1259 , Japan*)

Abstract : In order to predict the erosion and deposition conditions of a riverbed , especially the conditions near a planned weir , a quasi-three-dimensional simulation model of total sediment transport in orthogonal curvilinear coordinates was developed. The model considered not only the sediment sorting effect but also the difference between streamline curvature and channel curvature. The model was verified by the measurement data of a river where the weir is being re-planned. The results show that the calculations basically agree with the measurements. The verified model was then used to predict the erosion and deposition under the conditions of design flood. The prediction results indicate that the calculated water levels of the proposed model are in good agreement with those of the one-dimensional non-uniform flow model and the topographical characteristics of the river channel. It is also indicated that the prediction of riverbed deformation agrees with the characteristics of the river channel and flows , the maximum erosion depth near the weir is about -3.0 m , and the erosion and deposition depths along the whole river reach are in the range of -3.0 m to 3.0 m . Therefore , the planned channel has good stability , and the selected location of the planned weir is suitable.

Key words : weir ; quasi-three-dimensional model ; total sediment transport ; bed load ; suspended load ; streamline curvature ; SIMPLER method