

复式河道一维洪水演进数值模拟

张防修^{1,2}, 王艳平², 韩龙喜¹, 张晓丽², 吴英海³

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;
3. 国家环境保护总局华南环境科学研究所, 广东 广州 510655)

摘要 针对复式河道的特点, 建立复式河道一维非恒定流数学模型, 采用四点线性隐格式离散圣维南方程组, 在动量方程中通过对主槽宽度进行修正, 很好地解决了漫滩瞬间流量波动问题。通过 2006 年汛期调水调沙期间的实测资料对黄河下游白鹤—孙口河段洪水演进过程进行验证, 结果表明, 计算的洪峰变化过程比较符合实测情况, 洪水传播时间的计算值与实测值基本吻合。

关键词 复式河道 洪水演进 行洪宽度 数值模拟

中图分类号 TV133 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2008)05-0006-04

Numerical simulation of one-dimensional flood routing for a compound channel//ZHANG Fang-xiu^{1,2}, WANG Yan-ping², HAN Long-xi¹, ZHANG Xiao-li², WU Ying-hai³ (1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 3. South China Institute of Environmental Sciences, SEPA of China, Guangzhou 510655, China)

Abstract A one-dimensional unsteady numerical model for a compound channel is established, and the Saint-Venant equations are discretized by use of the Preissmann weighted implicit four-point scheme. In the momentum equation, the width of the main channel is modified in order to avoid flow fluctuation at floodplain sites. On the basis of observed sediment-runoff regulation data in 2006, this model was verified by flood routing along the Baihe and Sunkou reach of the lower Yellow River. It is shown that the calculated peak stage hydrograph and the time of propagation of the flood peak accord well with those of the observed flood.

compound channel ; flood routing ; width of flood discharge ; numerical simulation

Key words : compound channel ; flood routing ; width of flood discharge ; numerical simulation

我国平原地区大部分天然河流的断面形态不规则, 表现为比较复杂的由主槽和边滩构成的复式断面。在汛期, 由主槽和滩地共同行洪的复式河道是我国河流洪水的主要演进方式, 水位超过平滩水位后, 水流在主槽和滩地内流动, 主槽和滩地共同过流。在中枯水季节, 水流多在主槽内流动。洪水漫滩后, 主槽、滩地水流相互作用, 水位~流量关系将与一般的明渠流有所不同, 致使主槽行洪能力降低, 滩地行洪能力增大, 过水能力的估算较一般的明渠流困难。此时洪水过程表现为洪量大、洪峰持续时间长、水位高, 对平原地区防洪工程的运行产生较大的影响。因此, 正确估计河道的过流能力以及确定各种防洪水位就显得尤其重要。

复式断面滩槽水流特征的问题是一个复杂的流体力学问题, 主要是主槽和滩地两股不同流速的水

流相互影响作用形成一种复杂的流动现象, 其物理表现为典型的三维特性。随着现代计算技术和计算机的高速发展, 人们已成功地开发出求解漫滩水流的三维紊流数学模型, 所采用的紊流模型主要以三维紊流代数应力模型为主, 但这样对于求解长河段、长系列的洪水演进, 通过三维模型显然是不适合的。传统的复式断面水力计算方法有单式断面法和分割断面法, 这些方法的计算结果仅在高水位时趋于一致并趋于实际值^[1]。为了寻求合理、准确的漫滩水流计算方法, 许多学者通过实验、解析计算和数值模拟进行了大量的研究, 提出了许多重要的方法, 如 SKM, COHM 等。这些方法一般都能够给出漫滩水流流速分布和床面切应力分布的解析计算公式, 但是每种模式都具有特定的适用条件, 像 SKM 能较准确地反映漫滩水流现象, 可以应用于各种形态的河

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAB06B02) 国家自然科学基金和黄河研究联合基金(50439020) 水利部黄河泥沙重点实验室开放基金(2007006)

作者简介 张防修(1979—), 男, 山东鱼台人, 博士研究生, 从事环境水力学、河流动力学研究。E-mail: zhangfx79@tom.com

• 6 • 水利水电科技进展, 2008, 28(5) Tel: 025-83786335 E-mail: jz@hhu.edu.cn http://hhu.edu.cn

道,但是该方法中出现了 3 个需要率定的系数^[2],从而限制了这种模式的发展。

一维水动力学模型在明渠河流中的应用研究成果较为成熟,但复式河道具有不同于一般明渠的复杂断面构造。复式断面河道的过流能力计算以及洪水水位确定问题,虽然国内外已有不少研究成果,但在实用性及适用性等方面仍然存在缺陷,因此,继续加强对该问题的研究,对我国的防洪管理和河道治理具有重要的现实意义。本文在进行黄河下游洪水演进计算时,根据黄河下游典型复式河槽的特点,在前人研究成果之上,通过对断面综合糙率与行洪宽度的处理,探讨适合滩槽比比较大的复式河槽洪水演进的数值计算技巧。

1 水动力学控制方程及其数值求解

复式河道断面形态如图 1 所示。整个断面分成 3 个部分,其过水面积分别为 A_1, A_2, A_3 , 流量分别为 Q_1, Q_2, Q_3 。 A_2 表示主槽面积, A_1 和 A_3 分别表示左右滩地面积。断面总流量 $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$, 总面积 $A = A_1 + A_2 + A_3$, 断面平均流速 $u = \frac{Q}{A} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{A_1 + A_2 + A_3}$, 断面每部分的平均流速 $u_i = \frac{Q_i}{A_i}$ 。

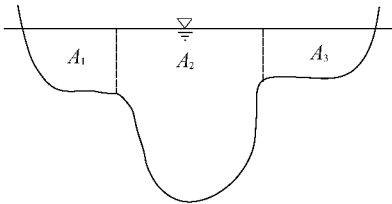


图 1 复式河道断面形态示意图

假设滩地和主槽中水流的摩阻比降相同,所以

$$\sqrt{S_f} = \frac{Q_1}{K_1} = \frac{Q_2}{K_2} = \frac{Q_3}{K_3} = \frac{Q}{K}$$

$$\beta = \frac{A}{\left(\sum_{i=1}^3 K_i\right)^2} \sum_{i=1}^3 \frac{K_i^2}{A_i}$$

式中: S_f 为摩阻坡度(根据曼宁公式估算); K_1, K_2, K_3 为各部分的流量模数; β 为动量修正系数。

天然河道中的水流按准一维流动处理^[3-4], 守恒形式的圣维南方程可以写为

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} + P \right) = gA(S_0 - S_f) + R \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{\frac{4}{3}}}$$

$$P = g \int_0^{h(x,t)} (h(x,t) - \xi) b(\xi, x, t) d\xi$$

$$R = g \int_0^{h(x,t)} (h(x,t) - \xi) \frac{\partial b(\xi, x, t)}{\partial x} d\xi$$

式中: S_0 为河底比降; ξ 为相对于河底的高度, m; b 为相对于 ξ 的过水断面宽, m_0 。

复式河道断面形态变化剧烈, 将河槽加以概化后进行计算, 由于河底很不规则, $\frac{\partial h}{\partial x}$ 与 $\frac{\partial Z_b}{\partial x}$ 项的数量级远大于 $\frac{\partial Z}{\partial x}$ 及方程中其他项, 为了避免方程离散带来过大的误差, 将压强项与河床比降及河床反力合并为水面比降, 方程可以简化为

$$\begin{cases} B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right) = -gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) \end{cases} \quad (2)$$

黄河下游洪水演进计算采用四点线性隐格式离散圣维南方程组^[5]。对方程进行线性化处理后可以得到线性差分方程组, 通过给定外部边界条件, 利用追赶法对方程进行求解。

2 模型关键技术处理及模型验证

2.1 复式河道关键技术处理

2.1.1 断面糙率

曼宁糙率系数可以理解为表征断面粗糙程度的量。复式河道断面中, 主槽与滩地具有不同的地貌特征, 糙率沿湿周也不尽相同。为了能够全面反映大断面的阻力特性, 就要求解复式断面的综合糙率。本文采用爱因斯坦方法求解断面的综合糙率^[6]:

$$n = \left(\frac{\chi_1 n_1^{\frac{3}{2}} + \chi_2 n_2^{\frac{3}{2}} + \chi_3 n_3^{\frac{3}{2}}}{\chi_1 + \chi_2 + \chi_3} \right)^{\frac{2}{3}}$$

式中 χ_1, χ_2, χ_3 分别为滩槽的湿周; n_1, n_2, n_3 分别为滩槽的糙率。

2.1.2 洪水漫滩处理方法

建立复式河道一维非恒定流数学模型, 对洪水演进进行模拟, 模型对非漫滩水流质量严格守恒。笔者在实际计算过程中发现在滩槽比不是很大的情况下通过动量修正系数对动量方程进行修正, 可以避免不考虑滩地水流所引起的误差。但是有时遇到断面滩地宽度是主槽宽度 10 余倍的地形时, 洪水在漫滩或退水的瞬间宽度变化巨大, 平均水深变化也非常大, S_f 的变化就非常大, 在这种情况下流量就会出现明显的波动现象, 仅仅通过动量修正系数进行修正不能取得令人满意的效果。针对这样的情况一般有如下几种处理方法: ①滩槽分别列方程进行计算, 由于很难确定滩槽间的动量交换, 这种处理会给计算结果带来很大的误差。②当滩地只起到调蓄

作用而不起输送水量作用时,即滩地流速很小,动量方程起作用的是主河槽部分,因此动量方程中断面面积 A 及河宽 B 均按主槽部分计算。在连续方程中出现面积 A 及河宽 B 都应包括滩地在内的全部河宽和过水面积^[7-8]。③考虑滩槽之间的动量交换,引入动量修正系数对动量方程进行修正,这样可以弥补不考虑滩地水流动量所引起的误差。

在滩槽比比较大的情况下,将动量方程中用的主槽宽度适当加大或变小,称为行洪河宽,这样就使得宽度和水深变化为一个缓变的过程,可以弥补宽度突变引起的误差^[9]。这种处理方法是介于上述第2种方法与第3种方法之间的一种方法,避免了第2种方法没有考虑滩地水流动量而引起的误差,也避免了第3种方法中把滩地宽度作为计算滩地动量的宽度,而忽略了滩地滞洪的作用。行洪河宽介于主槽宽度与全断面宽度之间的一个虚拟宽度,是一个与断面形态有关的宽度,其大小是一个与主槽过水面积、宽度和滩地过水面积、宽度有关的函数,在确定的过程中需要有一定的经验性。笔者所在的课题组在实际计算过程中根据滩槽特点,给出了行洪宽度的公式(式(3)),并把该式应用于2006年调水调沙期间洪水演进的计算,取得了较好的模拟结果。

$$B = \frac{\sum_{i=1}^3 A_i B_i}{\sum_{i=1}^3 A_i} \tag{3}$$

2.2 模型验证

在2006年汛期调水调沙期间,以黄河下游白鹤—孙口河段洪水演进为例对模型进行了验证。白鹤—孙口河道长414.5 km,是黄河下游河南省内黄河主要的行洪河段,平滩流量约为3400 m³/s。

图2示出了黄河下游花园口大断面实测河底高程,从图2中可以看出花园口断面属于典型的复式断面,滩地比较宽,滩地宽度与主槽宽度的滩槽比比较大,且断面形态复杂。黄河下游白鹤—孙口河段各断面均具有这样的特点,为了能够反映实际情况,在黄河下游洪水演进计算时一般把下游大断面概化

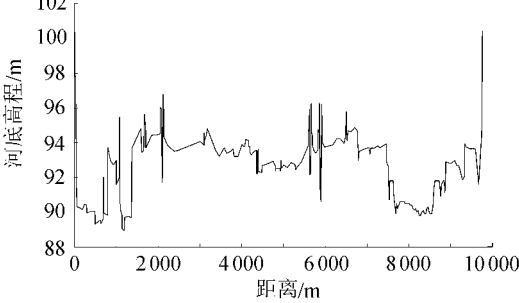


图2 花园口大断面实测河底高程

为30~50个不等的子断面。

图3为调水调沙期间小浪底水库下泄流量过程线。以小浪底下泄流量为进口流量,对小浪底以下白鹤—孙口河段洪水演进进行模拟。分析该河段长系列实测水位、流量、冲淤变化资料与河段地貌特征,白鹤—伊洛河口河段河床组成较粗,多砾石组成,在该河段主槽糙率取为0.025,滩地糙率取为0.032,伊洛河口—孙口河段河床组成材料稍细,主槽糙率取为0.012,滩地糙率取为0.028。

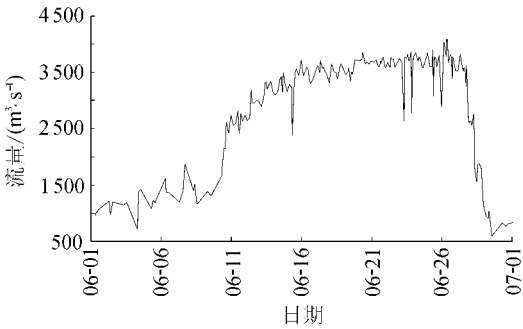


图3 小浪底水库下泄流量过程线

花园口断面位于白鹤断面以下108.9 km处,图4为花园口断面计算与实测流量过程比较。从图4中可以看出,在小流量的6月1~11日,流量计算值比实测值平均小400 m³/s,分析原因为计算结果在开始阶段受到初始条件的影响;6月13~16日流量计算值比实测值偏小300 m³/s;6月22~24日流量计算值比实测值偏小约400 m³/s;其余时间流量计算值与实测值的差值在100 m³/s之内。图5为花园口断面水位计算与实测过程对比。从图5中可以看出,在小流量计算条件下,计算水位比实测水位偏小

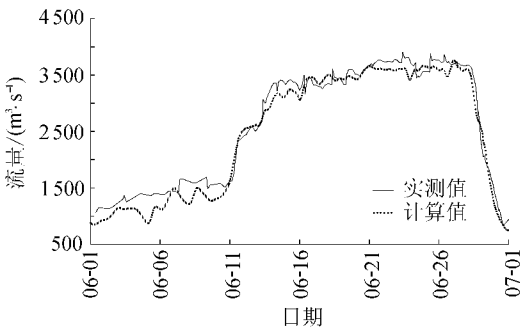


图4 花园口断面流量计算值与实测值对比

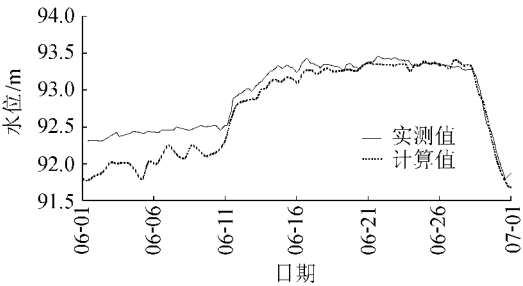


图5 花园口断面水位计算值与实测值对比

约 0.4 m,在洪峰传播的大流量计算条件下,水位计算值与实测值之差在 0.15 m 以内。通过综合分析可以看出,花园口站计算洪峰变化过程比较符合实测情况,洪水传播时间的计算值与实测值基本吻合。

高村断面位于白鹤断面以下 281.9 km 处,图 6 为高村断面计算与实测流量过程线比较。从图 6 中可以看出:由于受初始条件的影响,在小流量的 6 月 1~11 日,流量计算值比实测值平均小 350 m³/s;6 月 22~29 日流量计算值比实测值偏小约 300 m³/s;其余时间流量计算值与实测值之差在 50 m³/s 之内。图 7 为高村断面水位计算与实测过程对比,从图 7 中可以看出:与流量计算相似,在计算开始阶段的 6 月 1~8 日,水位计算值比实测值平均偏小 0.35 m;6 月 19~23 日水位计算值比实测值平均偏大 0.3 m;其余时间偏大在 0.1 m 之内。通过综合分析可以看出,高村断面计算洪峰变化过程比较符合实测情况,洪水传播时间的计算值与实测值基本吻合。

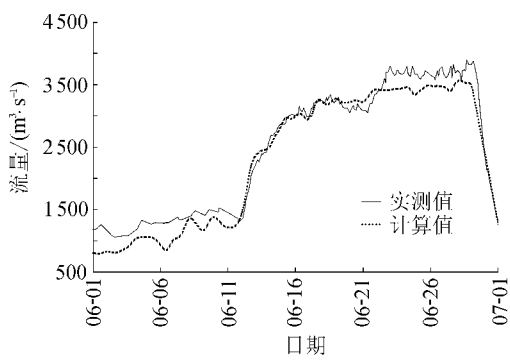


图 6 高村断面流量计算值与实测值对比

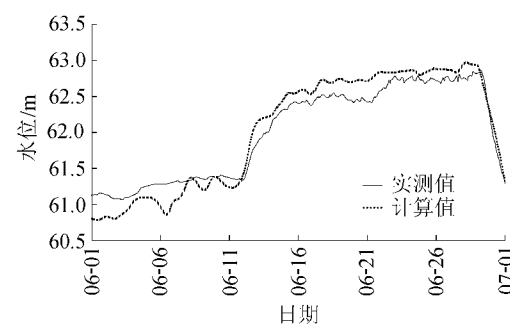


图 7 高村断面水位计算值与实测值对比

3 结 语

根据复式河道的特点,建立复式河道的一维非恒定流数学模型,针对洪水漫滩或退水瞬间断面宽度突变的情形,在动量方程中采用行洪河宽对主槽河宽进行修正,并给出行洪宽度的计算公式。应用该方法处理后的模型在 2006 年汛期调水调沙期间对黄河下游白鹤—孙口河段洪水演进进行模拟,通过对比沿程水文站流量和水位过程,对模拟结果与实测值进行比较,可以看出对于像黄河下游断面形

态这样复杂的复式河道,本模型能够得到满意的模拟效果。

参考文献:

[1] 童汉毅,槐文信,张礼卫. 复式断面明渠的速度比和流量比[J]. 武汉大学学报,2003,10(5) 9-13.
[2] 李渭新. 复式河道漫滩洪水计算[J]. 四川大学学报,2001,7(4) 6-8.
[3] 钟德钰,彭杨,张红武. 多沙河流的非恒定一维水沙数学模型及其应用[J]. 水科学进展,2006,15(6) 706-710.
[4] 谭维炎. 计算浅水动力学——有限体积法的应用[M]. 北京:清华大学出版社,1998 239-242.
[5] 汪德. 计算水力学理论与应用[M]. 南京:河海大学出版社,1989 150-158.
[6] 徐正凡. 水力学[M]. 北京:高等教育出版社,1989 22-26.
[7] 王船海,李光炽. 实用河网水流计算[M]. 南京:河海大学出版社,2002 14-15.
[8] 王伟,许唯临,蔡金德. 弯道水沙运动理论及应用[M]. 成都:成都科技大学出版社,1994.
[9] 赵克玉,王小艳. 一维泥沙数学模型中有关问题的商榷[J]. 水土保持通报,2003,23(6) 50-52.

(收稿日期 2007-12-17 编辑 高建群)

·简讯·

第三届全国岩土与工程学术大会将在成都召开

为了充分交流我国岩土与工程领域所取得的成就,共同面对西部的机遇与挑战,全面推动岩土与工程领域的科技进步,中国地质学会工程地质专业委员会、中国岩石力学与工程学会、中国建筑学会工程勘察分会、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会商定,拟在 2009 年 6 月 11~18 日联合组织召开第三届全国岩土与工程学术大会。会议主题是:联合应对——西部的机遇与挑战。具体议题包括:①西部大型工程建设的岩土与工程问题:岩石高边坡工程;深埋长隧道工程;高坝与大水库;复杂介质的交通干线建设;复杂场地的大型民用机场。②西部特殊岩土环境问题:人类工程活动与环境问题;气候变化与环境灾害;环境岩土工程与资源循环利用;西部特殊地区环境条件与工程建设。③理论探索与新技术:岩石与土力学理论;岩土工程风险评价与管理;西部地区重大地质灾害形成机理与治理技术;岩土勘探、测试、监测与施工新技术;岩土工程信息技术;岩土工程机械与仪器设备。④其他:大型岩土工程实录;发展战略与联合应对挑战;岩土工程与可持续发展;境外岩土工程。会议主办单位为中国地质学会工程地质专业委员会,协办单位为四川省国土资源厅,承办单位为成都理工大学。会务组联系 E-mail: yangminggao07@cdut.cn, http://www.gec2009.com (本刊编辑部供稿)