

一二维衔接洪水演进模型 在永定河泛区的应用研究

范 玉¹,李大鸣²,赵明雨³

(1.华北水利水电大学,郑州 450011;2.天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072;

3.沈阳工学院,辽宁 抚顺 113122)

摘 要:随着我国经济的发展,蓄滞洪区内不断进行开发利用,洪灾造成的生命与财产损失越来越严重,对滞洪区的调度运用就显得至关重要。建立蓄滞洪区一二维多口门衔接的洪水演进数学模型,根据1956年洪水资料,应用此模型对永定河泛区洪水演进过程进行模拟计算,通过计算对泛区的代表位置的水位和进行了验证。验证结果表明计算值与调查值吻合较好,同时模型对不同来流情况进行数值模拟,通过模拟得到泛区内分洪口门水位启用时间、淹没情况等信息。从而为泛区的防洪调度提供理论依据。

关键词:永定河泛区;洪水演进;一二维衔接;数值模拟

中图分类号:TV87 **文献标识码:**A

Applied Research on Flood Routing Model Linked by 1-D and 2-D in Yongding River Plains

FAN Yu¹, LI Da-ming², ZHAO Ming-yu³

(1.North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;

2.State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety Tianjin University, Tianjin, 300072, China;

3.Shenyang Institute of Technology, Fushun 113122, Liaoning Province, China)

Abstract: With the economic development and the utilization of flood detention areas, the loss of life and property becomes increasingly serious. The operation of flood detention areas is vitally important. This paper establishes a flood routing numerical model linked up by 1-D and 2-D at multi-entrance. Based on 1956 flood data, it simulates the flood routing of Yongding River flood plains through the calculation, the water level of representative sites and the starting time of flood gates are tested. The test results show that the calculated values are in good agreement with the investigated ones. At the same time, different flood stages are simulated, and the starting time of flood gates and other submerged information are obtained to provide a theoretical basis for the flood control scheduling of the flood plains.

Key words: flood area of Yongding River; flood routing; 1-D and 2-D linking; numerical simulation

我国自古以来就是一个洪水频发的国家,多年来国内外防洪经验表明,建设并有效运用滞洪区,是减轻洪水灾害的重要措施,随着我国经济的发展,蓄滞洪区内不断进行开发,如果滞洪区调度运用不当,将会造成巨大的经济损失与惨重的人员伤亡,因此有必要对滞洪区的洪水演进情况进行模拟研究,从而为防洪调度提供必要的参数,也为相关决策提供科学依据。

水流数学模型常用于研究洪水波的演进问题。一、二维联合洪水演进数值模型可反映蓄滞洪区内分洪洪水沿河槽纵向泄流和河槽内、外的横向水流交换过程。近年来,许多学者在研究一、二维衔接洪水演进模型上取得了一定进展^[1,2]。曹志芳^[3]采用有限差分法时间步长选取较大,虽然提高了计算速度,但计算结果精度不高;有限体积法把计算区域划分成一系列不重复控制体,根据地形条件,可以生成任意形状的无结构不规则网格,因此,显现出了很大的优势,在一二维洪水演进模拟中的应用也越来越多^[4],但是,目前建立的一、二维衔接数学模型大多采用“整体水位式”方法,即将口门对应的分洪区域作为一个整体,采用统一的水位值进行计算,衔接计算后获得的蓄滞洪区水量变化平均分配在该分洪区域上,从而得出新的水

收稿日期:2013-12-27

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51021004);河北省水利科研计划项目资助(HS2007-43)。

作者简介:范 玉(1979-),女,讲师,主要从事水力学与河流动力学研究工作。E-mail:fanyu@ncwu.edu.cn。

位值。这样的模拟方法略显粗糙,如范子武等建立的一、二维洪水演进数值模型可以模拟洪水沿河槽纵向的泄流以及河槽内、外的横向水流交换过程,但是模型将河槽内外横向水量交换作为一维计算分布的源项,没有在运动方程中考虑交换水量,将对模拟精度产生一定影响^[5]。本数学模型在这方面进行了改进,采用单个网格单元与口门相连接,在每个计算时段通过计算单元网格之间的水量交换、水位变化来模拟洪水在蓄滞洪区内的演进过程,演进计算结束后与口门相连接的单元水位作为下个计算时段该口门二维模型的水位初始值。范玉、李大明^[6]等采用有限体积法将计算区域进行无结构不规则网格划分,按照通道处理的方法,对控制体积分,得到不同的离散通道,对大清河滞洪区进行模拟计算,结果吻合较好,本文模型在前面研究的基础上,对永定河泛区的洪水演进进行了模拟。

1 洪水演进数学模型基本理论

1.1 基本控制方程

1.1.1 一维控制方程

用水位—流量表示的一维控制方程组如下。

连续方程:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q}{B} \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + (gA - \frac{BQ^2}{A^2}) \frac{\partial Z}{\partial x} + 2 \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_2 - g \frac{1}{A} \frac{Q}{C^2} \frac{Q}{R} + uq \quad (2)$$

1.1.2 二维控制方程

二维泛区洪水演进数学模型的控制方程由连续方程和水流运动方程组成。

连续方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (3)$$

运动方程:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} = 0 \quad (5)$$

式中: H 为水深; Z 为水位, $Z = Z_0 + H$; Z_0 为底高程; q 为源汇项; M 、 N 分别为 x 、 y 方向上的单宽流量, 且 $M = Hu$, $N = Hv$; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的平均流速; n 为糙率; g 为重力加速度。

1.2 一维、二维数学模型嵌套

河道水流通过多个分洪口门与泛区相连接, 在每个计算时刻, 先进行一维河道洪水演进计算, 计算得到口门处的河道水位作为相对应的二维模型单元网格的边界条件, 由宽顶堰流公式(6)计算得到口门处流量。

$$Q = \alpha m b \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

式中: α 为淹没系数; m 为流量系数; b 为堰顶宽度。

口门处分洪流量作为一维模型方程的旁侧出流, 同时对分蓄洪区内洪水演进过程进行模拟。计算过程中保证在每个计算时刻后口门两侧水位相同, 一维模型与二维模型流量变化大小相等, 方向相反。对于河网内的闸、堰、桥、涵等各类工程, 可设置为内边界节点, 通过给定相应的堰闸公式或其他过流关系, 嵌入河网算法中联解。

2 工程概况

1939 年发生 50 年一遇大洪水的永定河自梁各庄改道, 形成了现在的永定河泛区。泛区南侧建有永定河故道左堤、北遥堤、增产堤等, 其北侧边界由新北堤、护河堤、北运河左堤等构成, 内部包含北小垸、南小垸、北前卫垸、南前卫垸、北围垸和南围垸等多道小垸。泛区上起梁各庄, 下至屈家店, 总长度 73 km, 圈维面积 522 km²。泛区围堤内的各小垸, 将泛区分隔成 4 个区域共计 9 个部分。区域 1 至区域 4 的总面积分别为 35、187、240、138 km², 其中区域 2 又分为 66、44、77 km² 3 部分, 区域 4 分为面积为 25、113 km² 的两部分, 其他两部分面积为 29、93 km², 各部分所在位置见图 1。考虑泛区的分区运用, 各小垸上共计规划安排了 6 个固定分洪口门。包括北围垸上的茨平口门、北前卫垸上的西孟村口门、南前卫垸上的池口口门、南小垸上的南石口门和潘庄子口门、北小垸上的王码口门。图 2 为泛区地形图。



图 1 永定河蓄滞洪区洪水调度数学模型整体规划图

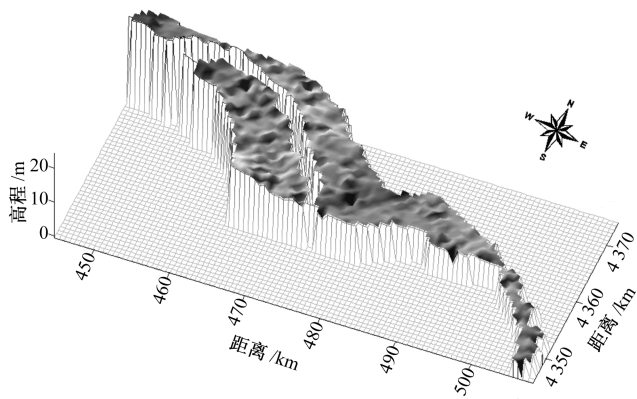


图2 永定河泛区三维地形表面图

3 洪水演进数学模型的验证

为了验证已经建立起来的数学模型的可靠性,采用 1956 年型洪水在永定河泛区的演进情况对模型进行验证。本次计算的人流断面为梁各庄上游 14.5 km 处断面,由于无法获取 1956 年地形图,泛区采用 2003 年地形图,官厅水库建成后进入泛区的泥沙相对减少,1956 年后没有大洪水,整个泛区地形变化不大,采用 2003 年地形模拟 1956 年洪水是可行的,在验证模型中设置 5 处分洪口门,各口门控制参数见表 2。

表 1 模型验证分洪口门控制参数 m

分洪口门	所在堤埝	调查决口位置	堤顶高程	扒口水位	底坎高程	决口高度	决口宽度
王码	北小埝	大北市	19.20	18.3	17.70	0.60	500
池口	南前卫埝	琥珀营、柳园	18.80	18.60	17.60	1.00	700
南石	南小埝	姜志营	17.50	17.30	16.50	0.80	500
西孟	北前卫埝	军芦村一带	16.70	16.50	15.90	0.60	500
茨平	北围埝		15.40	15.20	14.40	0.80	500

调查资料给出了泛区中 7 个位置处的水位值,见图 3 所示,为了与之进行比较,在计算结果中提取出这些点处的水位,比较结果见表 2。

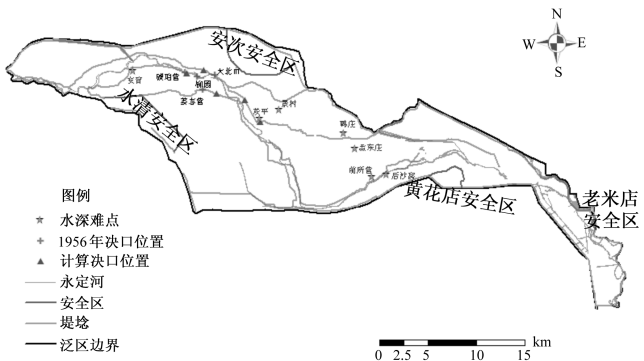


图3 永定河蓄滞洪区数学模型验证点位图

1956 年,屈家店枢纽中永定新河闸尚未建造,屈家店闸上水位流量关系与现状有所不同,相同水位下,当前的屈家店枢纽可出流流量大于 1956 年,因此,用现状下的水位流量关系进行计算,蓄滞洪区中的洪水自河道下泄较多,泛区内计算水位偏低,这与表 3 中情况基本相符。另外,“茨平”与“景村”属于

表 2 调查水位与计算水位比较

验证位置	调查值/ m	计算值/ m	差值/ m	相对误差/ %
安育	22.40	22.18	-0.22	-0.96
前所营	11.20	11.06	-0.14	-1.26
后沙窝	11.20	11.34	0.14	1.25
孟东庄	11.40	11.09	-0.31	-2.75
韩庄	12.70	12.80	0.10	0.81
景村	15.60	15.07	-0.53	-3.40
茨平	17.00	15.59	-1.41	-8.29

同一分洪区域,相距仅 2 km,两个验证点之间没有堤埝阻水,但调查水位相差 1.4 m,调查结果可信度不高。据 1950 年洪水调查报告显示,当年洪峰流量与 1956 年相差仅 50 m³/s,而“茨平”调查水位为 15.80 m,与验证模型计算结果较为接近。综上所述,可认为 1956 年“茨平”验证点的调查水位精度不足,模型计算结果与实际值偏差应在 0.2 m 左右。

表 3 为调查的决口时间与计算决口时间的比较,由洪水调查报告可知,洪水 4 日零时进入泛区后,“大北市”首先决口,随后“琥珀营”与“柳园”决口,在洪水进入泛区后的第 8 h“姜志营”村东北角决口。从表中可以看出模型计算结果与调查结果的决口顺序一致,决口时间相接近。以上表明该模型具有较高的可信度,可以用于预测、模拟不同来水情况下永定河蓄滞洪区内洪水的演进情况。

表 3 调查决口时间与计算决口时间比较

分洪口门	调查决口位置	调查启用日期 (1956 年 8 月)	计算启用时刻 (时:分)
王码口门	大北市	4 日凌晨	05:35
池口口门	琥珀营与柳园	—	05:46
南石口门	姜志营	4 日 8 时	10:18

注:计算启用时刻列,表示从洪水进入泛区开始算起的时刻。如 05:35 表示洪水进入泛区后第 5:35 时王码口门扒口。

4 洪水演进模拟计算

4.1 分洪口门启用时间

根据 1997 年制定的《永定河卢沟桥以下中小洪水调度方案》,和 2004 年国务院批复的现行《永定河洪水调度方案》,方案中依旧采纳中小洪水调度方案确定的茨坪、西孟、池口、南石、潘庄子、王码、寺堡辛庄 7 处分洪口门,经模拟计算得到了各洪水流量下的分洪口门启用时间,如表 4 所示。

表 4 各分洪口门在不同来流情况下的启用时刻 h

方案组	合/(m ³ ·s ⁻¹)	茨平	西孟	池口	南石	潘庄子	王码	寺堡辛庄
500	355.230	—	—	—	—	—	—	—
800	121.716	354.708	354.711	—	—	—	—	—
1 000	120.097	349.697	349.700	349.702	—	—	349.891	—
1 500	41.341	347.997	348.000	348.002	351.222	—	348.144	—

4.2 泛区洪水演进

图 4 给出了流量标准为 1000 m³ /s 时永定河泛区不同时刻洪水演进情况。

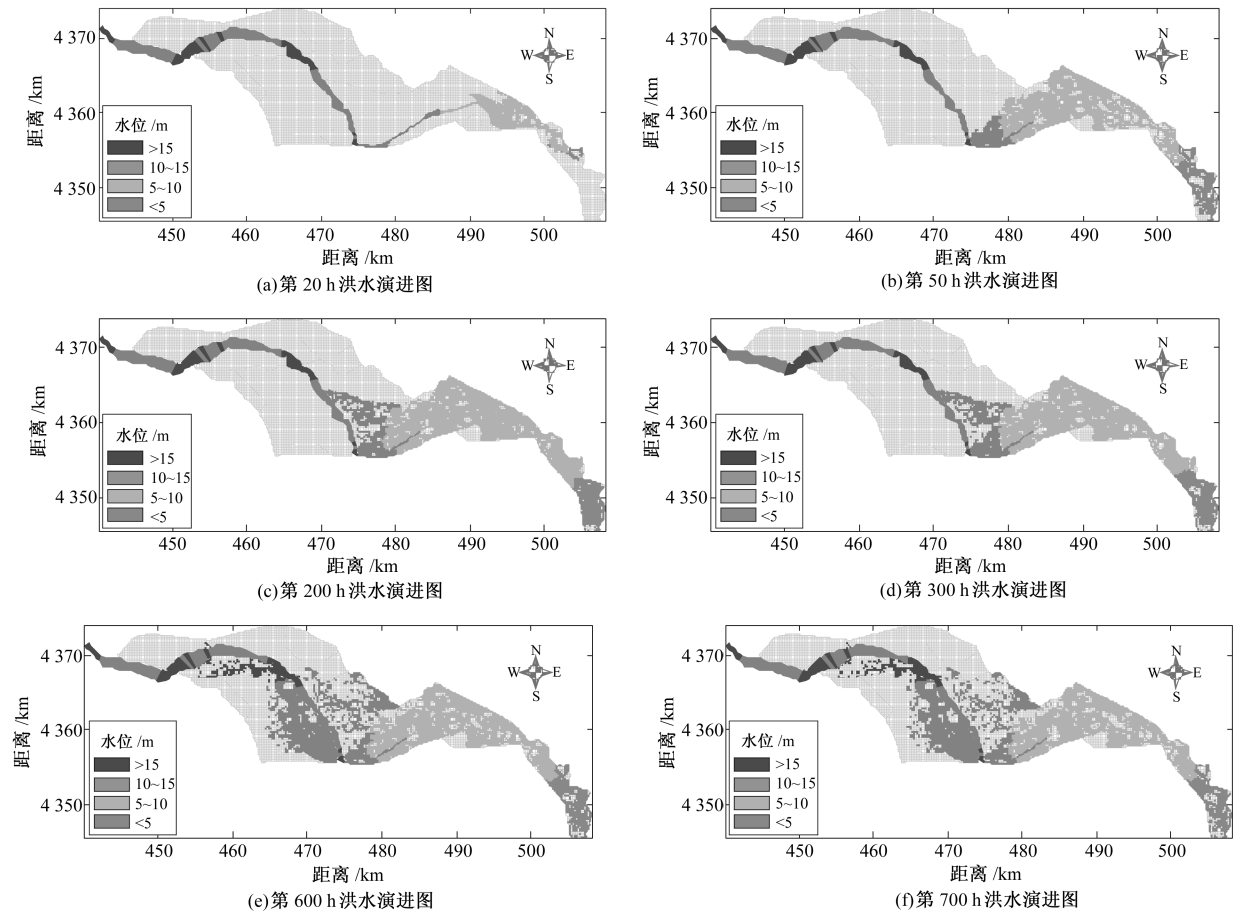


图 4 永定河泛区典型时刻洪水演进

5 结 语

本文通过建立的一二维衔接洪水演进数学模型,对永定河泛区的洪水演进进行模拟,模型对代表位置和泛区的淹没历时进行验证,验证结果较好,说明模型具有较高的可信度,能够用于永定河泛区洪水调度的模拟计算,通过模型对不同来流情况下的淹没范围、水深和历时的模拟,得到了具体的泛区水情信息,对泛区的洪水调度具有指导意义。

参考文献:

[1] YANG Fang-li, ZHANG Xiao-feng, TAN Guang-ming. One-and

two-dimensional coupled hydrodynamics model for dam break flow [J]. Journal of Hydrodynamics . Ser. B, 2007, 19(6):769—775 .
[2] 王智勇,陈永灿,朱德军,等.一维—二维耦合的河湖系统整体水动力模型[J].水科学进展,2011,22(4):516—522 .
[3] 曹志芳,李义天.蓄滞洪区平面二维干河床洪水演进数值模拟[J].应用基础与工程科学学报,2001,9(1) .
[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 .
[5] 范子武,姜树海.蓄、滞洪区的洪水演进数值模拟与风险分析[J].水利水运科学研究,2000,(2):1—6 .
[6] 范 玉.河道、滞洪区一二维洪水演进数学模型的研究与应用[D].天津:天津大学,2005 .

(上接第 38 页)

[9] B Bois, P Pieri, C Van Leeuwen, et al. Saur. Using remotely sensed solar radiation data for reference evapotranspiration estimation at a daily time step[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148:619—630 .
[10] Deliang Chen, Ge Gao, Chong-Yu Xu, et al. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China[J].

Climate Research, 2005, 28:123—132 .
[11] Bekele Temesgen, Simon Eching, M. ASCE, et al. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131:73—84 .
[12] Wei Tian. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 20:411—419 .