

恩县洼蓄滞洪区洪水演进数值模拟

刘蒙泰^{1,2,3}, 雷晓辉^{2,3}, 李智¹, 王浩^{1,2,3}

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 水利部水资源与水生生态工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 为研究恩县洼蓄滞洪区洪水演进过程,采用 EFDC 模型根据蓄滞洪区内不同地形条件对该区域进行二维数值模拟计算。在模拟时采取了两种不同方案进行对比模拟,通过对方案模拟结果比较分析,表明蓄滞洪区出流量大小对洪水演进影响很大,同时也表明 EFDC 模型模拟二维洪水演进效果较好,可为蓄滞洪区防洪减灾等提供技术支持和研究方法。

关键词: 蓄滞洪区; 防洪减灾; 洪水演进; EFDC 模型

中图分类号: TV122

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)06-0142-04

Numerical simulation of flood routing in marsh land flood detention basin of Enxian county

LIU Mengtai^{1,2,3}, LEI Xiaohui^{2,3}, LI Zhi¹, WANG Hao^{1,2,3}

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water

Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Engineering and Technology Research

Center for Water resources and Hydroecology of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to research the process of flood routing in the marsh land detention area of Enxian county, the paper used EFDC model to simulate the two-dimensional flood routing in accordance with different terrain conditions. Two different flood schemes were designed to compare and simulate. The result indicated that outflow in the detention area has great impact on flood routing. The simulation effect of two-dimensional flood routing by EFDC model is very well. The research can provide technical support and way for flood control and disaster reduction in flood detention basin.

Key words: flood detention basin; flood control and disaster reduction; flood routing; EFDC model

1 研究背景

洪水灾害是自然灾害中造成经济损失最严重的灾害之一,我国又是世界上遭受水灾最严重的国家之一,过去我国防洪技术侧重于工程措施,近些年人们渐渐开始重视非工程措施技术。防洪技术非工程措施主要是研究洪水演进规律,利用二维数值模型计算得出洪水在泛区的各种水力要素^[1]。国内外不少学者都对洪水演进数值模拟进行了研究,如 Liggett A 等利用显式有限差分法和矩形网格建立了最早的二维模型,曹志芳等^[2]提出了“水位平铺”的

假设避免了干河床问题中出现水流虚假流动的现象,王晓玲等^[3]模拟了复杂河网中分洪后水流在较大平面范围内的流动情况,张广涛等^[4]从洪泛区模拟的必要性等方面对洪水演进数值模拟进行了论述,王志力等^[5]利用非结构化有限体积法建立了二维浅水方程高精度、高分辨率模型。

本文选用了环境流体动力学模型(EFDC)来模拟蓄滞洪区洪水演进过程,模拟了漳卫河恩县洼蓄滞洪区里一场洪水的演进全过程,实现洪水演进过程动态仿真,展示洪水淹没范围等信息,为流域风险图绘制等提供了有力支持。

收稿日期:2014-07-06; 修回日期:2014-09-04

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201101026、201101024、201301001、20131102);国家科技支撑计划(2013BAB05B05);环保部公益基金项目(2013467042);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB036406)

作者简介:刘蒙泰(1988-),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为水力学数值模拟。

通讯作者:雷晓辉(1974-),男,陕西澄城人,博士,教授级高级工程师,研究方向为水文水资源。

2 EFDC 模型

2.1 模型简介

EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)模型最初是由威廉玛丽大学弗吉尼亚海洋科学研究所(Virginia Institute of Marine Science at the College of William and Mary)的 John Hamrick 等人开发的三维地表水水质数学模型,由 Fortran 语言编制而成,可实现河流、湖泊、水库、河口和海湾等水体的水动力学以及水质模拟^[6]。该模型已经成功用于美国和欧洲其他国家多个水体区域的研究,如北美的 Chesapeake 湾以及佛罗里达 Everglades 湿地,在国内已被应用于云南滇池水质模拟^[7],重庆两江汇流水动力模拟^[8]、内蒙古乌梁素海地区水体富营养化模拟^[9]等。此外,EFDC 模型源代码开放,易于进行二次开发,且模型具有多种输出格式,方便后期对计算结果分析以及绘制洪水风险图等图表,故本次模拟采用 EFDC 模型计算。

2.2 动力学方程

由于盐度、物质浓度变化小,且密度的变化仅对重力项影响较大,所以在动量方程中,除重力项外,其余各项密度视为常数,同时考虑到蓄滞洪区比较宽浅,水体重力加速度远大于垂向加速度,所以在动量方程中假定为静水压强。基于以上假设,EFDC 模型动力学控制方程如下:

动量方程:

$$\begin{aligned} \partial_t(mHu) + \partial_x(m_yHu) + \partial_y(m_xHvu) + \\ \partial_z(mwu) - (mf + v\partial_xm_y - u\partial_y m_x)Hv \\ = -m_yH\partial_x(g\zeta + p) - m_y(\partial_xh - z\partial_xH)\partial_zp + \\ \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_zu) + Q_u \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \partial_t(mHv) + \partial_x(m_yHuv) + \partial_y(m_xHvv) + \\ \partial_z(mwv) - (mf + v\partial_xm_y - u\partial_y m_x)Hu \\ = -m_xH\partial_y(g\zeta + p) - m_x(\partial_yh - z\partial_yH)\partial_zp + \\ \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_zv) + Q_v \end{aligned} \quad (2)$$

$$\partial_t(m\zeta) = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb \quad (3)$$

连续方程:

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_yHu) + \partial_y(m_xHv) + \partial_z(mw) = 0 \quad (4)$$

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_yH\int_0^1 u dz) + \partial_y(m_xH\int_0^1 v dz) = 0 \quad (5)$$

状态方程:

$$\rho = \rho(P, S_a, T) \quad (6)$$

盐度、温度输移方程:

$$\partial_t(mHS_a) + \partial_x(m_yHuS_a) + \partial_y(m_xHvS_a) +$$

$$\partial_z(mwS_a) = \partial_z(mH^{-1}K_v\partial_zS_a) + Q_s \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \partial_t(mHT) + \partial_x(m_yHuT) + \partial_y(m_xHvT) + \partial_z(mwT) \\ = \partial_z(mH^{-1}K_v\partial_zT) + Q_T \end{aligned} \quad (8)$$

式中: m_x 和 m_y 分别是度量张量对角元素的平方根; m 是度量张量行列式的平方根, $m = m_xm_y$; u, v, w 分别是边界拟合正交曲线坐标 x, y, z 方向上的速度分量; H 为总水深; p 是压力; A_v 为垂向紊动粘滞系数; f 是 Coriolis 系数; K_v 是垂向紊动扩散系数; ρ 是混合密度; ρ_0 是参考密度; S_a 是盐度; Q_u 和 Q_v 是动量在 x, y 方向上的源汇项; Q_s 和 Q_T 是盐度和温度的源汇项; T 为水体温度。联立公式(1) ~ (8), 可求得 u, v, w, p, ρ, S_a, T 和 ζ 等变量。

3 洪水演进模型构建

3.1 研究区域概况

恩县洼蓄滞洪区是卫运河下游右岸的一个蝶式自然洼地^[10],也是漳卫南运河系最下游的一个滞洪区,位于山东省西北部的武城县境内,北临卫运河右堤,东以陈公堤为界,南靠六六河和平武公路,西接自然高地。恩县洼涉及武城县 6 个乡镇,157 个自然村,13.5 万人,耕地 35.0 万亩,固定资产 25.0 亿元,总产值 18.2 万元。1989 年以后,陆续修建了 0.02 万 m^2 的避水台、0.44 万 m^2 的避水房、92.8 km 的撤退路线。

恩县洼蓄滞洪区周边地面平均高程 25.5 m,中部洼底地面最低高程 20.8 m,设计滞洪水位 24.8 m,蓄水量 7 亿 m^3 ,淹没面积 325 km^2 (县城防洪围堤修复后,淹没面积为 301 km^2)。该蓄滞洪区进洪设施位于西郑庄,形式为进洪闸,设计进洪流量为 1 200 m^3/s ;退洪设施位于牛角峪,形式为退水闸、低水涵洞,设计退洪流量 378 m^3/s 。恩县洼蓄滞洪区对削减卫运河洪峰,保障津浦铁路正常运行和下游广大地区人民生命财产的安全起到重要作用,运用机遇相当于 50 a 一遇。

3.2 建模参数选取

由于恩县洼蓄滞洪区边界比较平整,本次模拟选用规格为 200m × 200 m 的矩形网格,网格总数为 106 × 140,去除蓄滞洪区边界以外的无效网格,共生成有效网格 7 900 个,又考虑到该蓄滞洪区在未启用时不蓄洪,初始状态所有网格的水深和流速均设为 0。模型边界点根据实际情况设定,西郑庄分洪闸处为入流边界,网格坐标为(96,53),牛角峪退水闸处为出流边界,网格坐标为(65,128)。

为了研究出流量大小对蓄滞洪区洪水演进情况

的影响,本研究采取 2 种方案对比模拟。方案 1 取西郑庄上游临清水文站 1963 年 8 月的一场洪水流量减去卫运河行洪流量作为入流流量,洪水历时 160 h,流量过程线如图 1 所示,出流边界为零过程;方案 2 入流边界与方案 1 相同,出流边界牛角峪退水闸处出流量在 90 h 后取 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 。为保证模型计算稳定,计算时间步长选为 10 s ,本次共模拟 57 600 步。

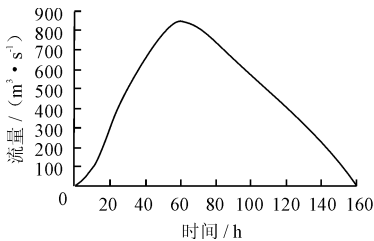


图 1 洪水流量过程线

在动边界设置时,本文根据恩县洼实际情况,取“干网格阈值”Hdry 与“湿网格阈值”HWET,在模

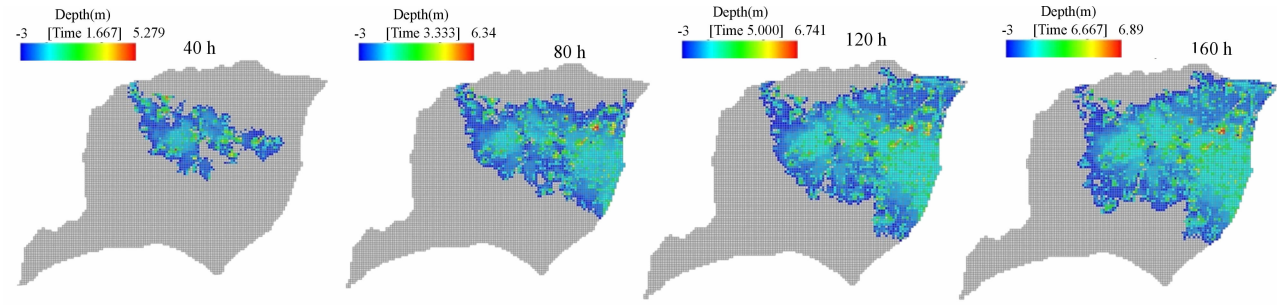


图 2 方案 1 下不同时刻水深分布图

蓄滞洪区蓄水量过程线如图 3 所示,开始阶段蓄水量增加较缓慢,60 h 左右随着蓄滞洪区入流峰值到来,蓄水量增加较快,120 h 以后蓄水量呈缓慢增加趋势,模拟时段结束时刻蓄滞洪区总蓄水量达 2.74 亿 m^3 ,没有超过恩县洼蓄滞洪区的最大蓄水量 7 亿 m^3 。

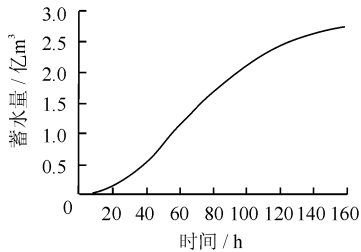


图 3 方案 1 研究区蓄水量过程线

由于恩县洼蓄滞洪区洪水资料极度匮乏,故查阅相关文献[11],将实测数据与模型计算结果对比可知,1963 年实测水位是 24.7 m ,计算水位是 25.4

型计算时当网格水深小于 Hdry 时,认为此网格为干网格,计算动力该网格速度为 0,计算连续性方程时水位基本保持不变;当网格水深大于 Hdry 小于 HWET 时,认为该网格为半干半湿网格,对于此网格只计算连续性方程,不计算动量方程;当水深大于 HWET 时,认为该网格为湿网格,计算时对该网格既计算连续性方程又计算动量方程。

4 结果分析

4.1 方案 1 分析

方案 1 不同时刻水深分布图如图 2 所示,比色板上数字代表水深值,从图中可以看出,洪水演进方向为从西郑庄分洪闸流向牛角峪退水闸,开始阶段淹没范围随着时间的推移逐渐扩大,淹没水深也逐渐增加,80 h 时部分洪水已经到达东部较低洼地区,洪水随着时间的推移在蓄滞洪区东部开始滞留,随后水深逐渐增加,水体开始向东北、东南地势较低的方向流去,模拟时段结束时刻 160 h 时最大水深达 6.89 m 。

m,误差为 2.83% ,在误差允许范围内,认为模型构建合理,可用于模拟蓄滞洪区洪水演进过程。

4.2 不同方案对比

方案 2 与方案 1 不同之处在于方案 2 在 90 h 以后设置了一个流量为 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 的出流边界。方案 2 不同时刻水深分布图如图 4 所示,40 h 和 80 h 时水深分布情况与方案 1 相同,120 h 和 160 h 时淹没面积比方案 1 有显著缩小,120 h 时最大水深为 6.486 m ,由于出流的影响,160 h 时最大水深降低为 6.317 m ,且相比方案 1 中 120 h 时的最大水深 6.741 m 小,160 h 时的最大水深 6.89 m ,方案 2 最大水深平均下降了 6.05% 。

为了更好地说明不同方案下水深的变化,本研究取蓄滞洪区内 3 个水位特征点进行分析,特征点网格坐标分别为 A (92, 55), B (73, 89), C (51, 121),大致位于研究区的西北部,中部,东部位置。

方案 1 与方案 2 的特征点水位对比如图 5、图 6、图 7 所示。

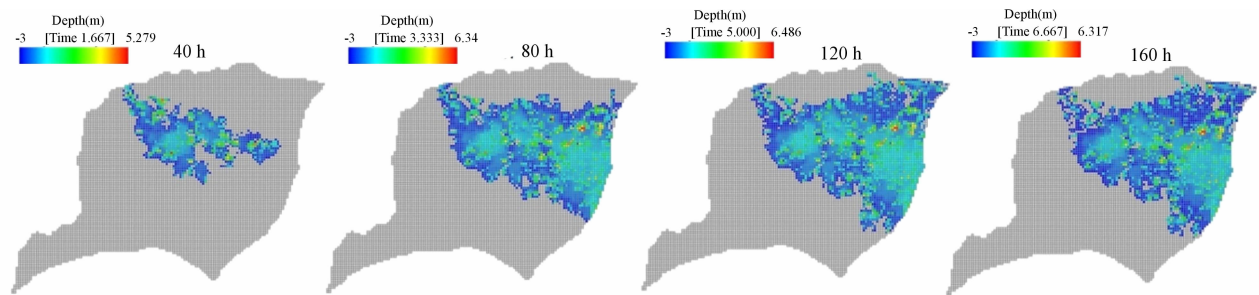


图 4 方案 2 下不同时刻水深分布图

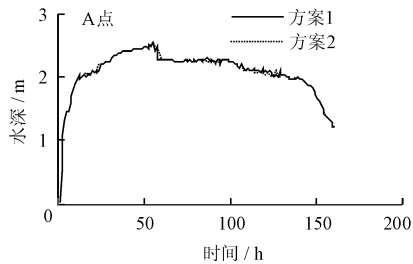


图 5 A 点方案 1 与方案 2 水深过程线对比图

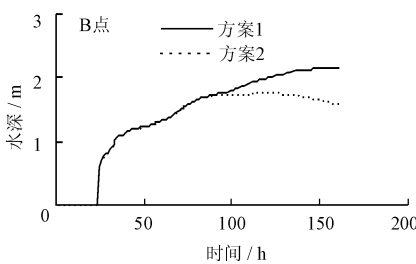


图 6 B 点方案 1 与方案 2 水深过程线对比图

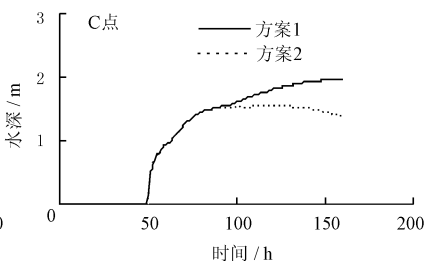


图 7 C 点方案 1 与方案 2 水深过程线对比图

实线是方案 1 情况下各特征点的水深过程线,虚线是方案 2 情况下各特征点的水深过程线。A 点处于入流边界附近,从开始时刻 A 点就有洪水到达,又由于离入流边界处很近,A 点水位过程跟入流量有很大关系,方案 1 与方案 2 下 A 点水深过程基本一致;B 点处于研究区域中部偏北位置,洪水在开始时刻并未到达 B 点,在 25 h 左右洪水开始到达 B 点,在 90 h 之前方案 1 与方案 2 在 B 点水深情况基本一致,方案 2 由于 90 h 后开始有水体流出研究区域,导致 B 点水深有明显降低;C 点位于研究区域的东部,地势相对较低,50 h 左右洪水才开始到达 C 点,此时 A 点、B 点已有洪水停滞,所以同一时刻 C 点水深较 A 点、B 点略低,方案 2 中 C 点在 90 h 后也由于出流的影响导致水深降低,水深变化整体趋势与 B 点类似。

5 结 语

本文通过运用 EFDC 模型模拟恩县洼蓄滞洪区洪水演进过程,计算得到了泛区淹没水深、蓄水量等信息,并设定不同方案对比分析,说明出流流量对蓄滞洪区洪水演进有一定的影响,也说明 EFDC 模型具有较好的稳定性和通用性,但仍需进行深层次的研究,才能更好地为流域防洪减灾提供决策依据。

参考文献:

[1] 唐兵,雷晓辉,张 峰,等. 大名泛区洪水演进数值模拟[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(4):61-65.

[2] 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):74-79.

[3] 王晓玲,李明超,周潮洪,等. 复杂河网中洪水演进二维数值仿真及其应用[J]. 天津大学学报,2005,38(5):416-421.

[4] 张广涛,白燕英. 二维洪水演进数值模拟研究[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(3):267-270.

[5] 王志力,耿艳芳,金 生. 二维洪水演进数值模拟[J]. 计算力学学报,2007,24(4):533-538.

[6] 刘夏明,李俊清,豆小敏,等. EFDC 模型在河口水环境模拟中的应用及进展[J]. 环境科学与技术,2011,34(6G):136-140+360.

[7] 陈异晖. 基于 EFDC 模型的滇池水质模拟[J]. 云南环境科学,2005,24(4):28-30+46.

[8] 陈景秋,赵万星,季振刚. 重庆两江汇流水动力模型[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2005,20(Z1):829-835.

[9] 李 兴. 内蒙古乌梁素海水质动态数值模拟研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.

[10] 钱秀红,李占华,邵 欣,等. 恩县洼滞洪区安全建设与管理模式探讨[J]. 地下水,2008,30(3):95-97.

[11] 李大鸣,管宽宽,李玲玲,等. 蓄滞洪区洪水演进数学模型研究及应用[J]. 水利水运工程学报,2011(3):27-35.