

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.05.003

苑希民, 李长跃, 田福昌, 等. 多源洪水耦合模型在防洪保护区洪水分析中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 16-22. (YUAN Xi-min, LI Chang-yue, TIAN Fu-chang, et al. Application of multi-source flood coupling model to flood analysis of flood protection zone[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(5): 16-22.)

多源洪水耦合模型在防洪保护区洪水分析中的应用

苑希民¹, 李长跃¹, 田福昌², 王丽娜¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学 前沿技术研究院有限公司, 天津 301700)

摘要: 针对防洪保护区单一洪水风险分析的不足,以一、二维非恒定流基本控制方程为理论基础,采用有限体积法对网格进行离散求解,建立溃堤洪水和暴雨多源洪水耦合的数学模型。在一、二维模型的链接处选用堰流公式实现水槽与保护区水流的实时交互,借助干湿水深理论对模型进行优化,利用遥感影像解译处理保护区内复杂地形条件下糙率对洪水演进的影响,概化处理区域内道路和过水涵洞对洪水的阻水或导水作用,并利用历史实测洪水资料进行模型验证。将验证后的模型应用于淮河干流凤台段防洪保护区多源洪水运动耦合模拟,分析了单一洪水与多源洪水对防洪保护区的损失比较结果,说明该区域受暴雨内涝影响较为严重。

关键词: 防洪保护区; 多源洪水; 耦合模型; 干湿水深; 糙率分区

中图分类号: TV122; TV87 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2016)05-0016-07

防洪保护区是防洪减灾体系中的重要组成部分,往往是国家重点设施所在,是保护人民财产的重要屏障。一般来讲,河道溃堤洪水是防洪保护区主要的洪水来源,但对于某些防洪保护区来说,由于受外河洪水水位顶托影响,暴雨内涝积水无法外排,同样会对人民生命财产等造成严重威胁。因此,分析防洪保护区淹没风险时考虑河道溃堤洪水与暴雨内涝积水耦合模拟十分必要。

关于溃堤洪水在防洪保护区内的演进过程模拟技术,国内外学者进行了大量研究。D. Dushmanta 等^[1]运用 MIKE 21 模块对伊朗 Helleh 河溃堤洪水的传播进行了模拟。M. Zolghadr 等^[2]运用光滑粒子水动力模型模拟了开边界情况下实际洪水的浅水运动情况,该模型适用于模拟溃堤、溃坝及海啸引起洪水的淹没模拟分析,并将其成功应用到日本海啸引起的洪水在奥尻岛的演进模拟。R. Garcia 等^[3]建立有限差分法模型,较好地处理了非线性项的问题。刘树坤等^[4]用显格式差分法模拟了小清河分洪区洪水。李大鸣等^[5-7]用质量加权集中的有限元法计算了河道二维洪水演进过程,并将其运用到大清河蓄滞洪区五洼联合调度方案的实时模拟分析。王船海等^[8]将一、二维模型相结合,采用直角坐标下非均匀矩形网格的控制体积法模拟了流域洪水的扩散传播。苑希民等^[9]利用全二维水动力模型,对黄河内蒙段灌区堤防漫溃堤洪水进行了耦合模拟计算;对于干湿水深通量计算理论,A. Sleight 等^[10]在处理动边界时提出了限制水深的方法,把网格分为干、湿和半干3类,以单元水深来判断单元公共边界是否有流量和动量通过;陆桂华等^[11]运用 Copula 函数构建了蚌埠市暴雨与淮河上游洪水遭遇概率模型,分析了不同重现期暴雨和洪水组合遭遇概率的变化趋势。上述研究大多只考虑了河道单一洪水对研究区域的风险,对溃堤洪水与暴雨内涝多源洪水耦合研究较少。

本文以一、二维非恒定流方程为基本理论,将一维河道洪水、二维保护区洪水和保护区内暴雨耦合,根据淮干凤台段防洪保护区实际地形开展洪水风险模拟研究。利用干湿边界理论优化模型,根据遥感影像解译获得保护区内不同土地利用类型分布情况,并赋予相应糙率,采用加大糙率法解决区域内密集村庄对模型计算精度的影响,并概化处理区域内道路和过水涵洞对洪水的阻水或导水作用。

收稿日期: 2015-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51209158);高等学校学科创新引智计划资助项目(B14012)

作者简介: 苑希民(1968—),男,江苏徐州人,教授,博士,主要从事防洪减灾及水利信息化研究。E-mail: yxm@tju.edu.cn

1 模型的建立

1.1 模型基本理论

1.1.1 一维水动力模型 河道一维水流运动基本方程为圣维南方程组:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(aQ^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0 \tag{2}$$

式中: Q 为流量; q 为侧向入流; A 为过水面积; h 为水位; R 为水力半径; C 为谢才系数($s/m^{1/3}$); a 为动量修正系数。

模型采用有限差分法进行离散,差分格式采用6点中心 Abbott-Ionescu 格式,示意图见图1和图2。

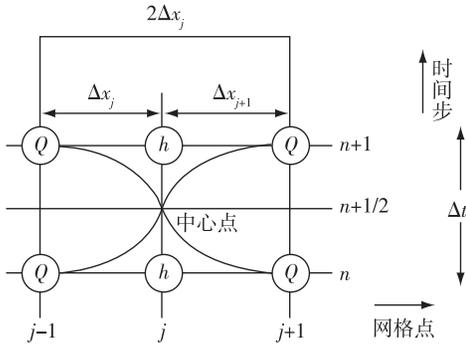


图1 以 h 点为中心点的6点隐式差分格式
Fig.1 6-point implicit difference scheme taking point h as center point

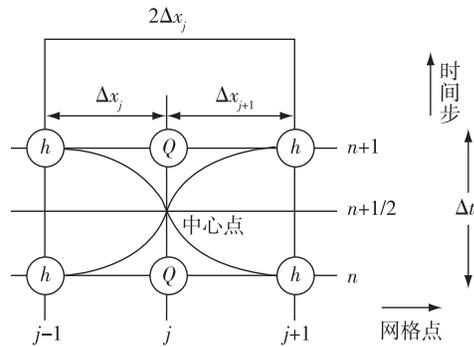


图2 动量方程的6点中心 Abbott-Ionescu 差分
Fig.2 6-point Abbott-Ionescu implicit difference in momentum equation

1.1.2 二维水动力模型 对于溃堤洪水和暴雨在保护区内的演进过程,可采用 N-S 方程的平面二维浅水方程来描述,控制方程形式如下:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \tag{3}$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}; \mathbf{E} = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{gh^2}{2} \\ huv \end{bmatrix}; \mathbf{G} = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{gh^2}{2} \end{bmatrix}; \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(s_{0x} + s_{1x} - s_{fx}) \\ gh(s_{0y} + s_{1y} - s_{fy}) \end{bmatrix}; \mathbf{F} = [\mathbf{E}, \mathbf{G}];$$

$$s_{0x} = -\frac{\partial Z}{\partial x}; s_{0y} = -\frac{\partial Z}{\partial y}; s_{1x} = -\frac{h\partial\rho}{2\rho_0\partial y}; s_{1y} = -\frac{h\partial\rho}{2\rho_0\partial x}; s_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}; s_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}.$$

式中: h 为水深; t 为时间变量; u, v 分别为 x 和 y 方向流速; S_{0x} 和 S_{0y} 分别为 x, y 方向坡底源项; S_{fx} 和 S_{fy} 分别为 x, y 方向摩阻项; g 为重力加速度; Z 为底高程; n 为曼宁系数。

对方程第 i 个单元进行积分,并运用 Gauss 原理重写可得

$$\int_{A_i} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma_i} (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) ds = \int_{A_i} \mathbf{S} d\Omega \tag{4}$$

式中: A_i 为 Ω_i 单元的计算面积; Γ_i 为 Ω_i 单元的边界; \mathbf{n} 为边界的外法线方向单位向量; ds 为沿着边界的积分变量。

对上式采用单点求积法来计算面积的积分,该求积点位于单元的质点,同时利用中心格式对边界条件进

行积分,则有

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{1}{A} \sum_{j=1}^{NS} F \cdot N \Delta \Gamma_{ij} = S_i \quad (5)$$

式中: U_i 和 S_i 分别为第 i 个单元的 U 和 S 的平均值,并位于单元的中心; NS 为单元界数; F 为第 j 条边的数值通量; Γ_{ij} 为 i 单元第 j 条边的长度。

1.1.3 一、二维耦合模型 一、二维模型在连接断面处采用宽顶堰公式进行耦合,一维模型为二维模型提供入流流量,作为二维模型的溃口入流条件,二维模型则返回溃口外侧计算水位作为一维模型下一时段运算的起始条件。本文采用的宽顶堰流公式^[1]如下:

$$q = \begin{cases} 0.35h_1\sqrt{2gh_1} & (h_2/h_1 \leq 2/3, \text{自由出流}) \\ 0.35h_2\sqrt{2g(h_1 - h_2)} & (2/3 < h_2/h_1 \leq 1, \text{淹没堰流}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $h_1 = \max(Z_u, Z_d) - Z_b$; $h_2 = \min(Z_u, Z_d) - Z_b$; q 为溃口单宽流量; Z_u, Z_d 分别为溃口处河槽内外水位; Z_b 为溃口处堤顶高程。

1.2 模型优化

1.2.1 干湿边界 为了避免模型中干湿交替区出现不稳定,本模型采用干湿边界理论,即设定干水深和湿水深,基于网格淹没水深参数来判断该网格单元是否处于淹没状态。通过以干湿水深为基础的通量计算理论来提高模型计算效率及稳定性。水深与网格计算对应关系如图3。

1.2.2 线性构筑物概化 线性构筑物主要指保护区内铁路、高速公路等地物,由于其宽度较窄,一般在几米到十几米之间,实际地形插值很难反映其实际阻水或导水作用,故从提高模型运算效率且反映其对于水流运动的影响效果角度考虑,将线状地物概化为堤坝,通过堰流公式描述水流漫溢过程。对于过水桥(涵)穿过的地方,按其过水宽度分段处理,线状地物概化如图4。

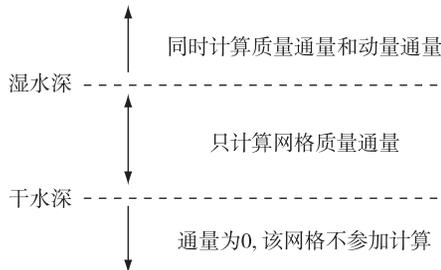


图3 网格水深与网格通量计算对应关系
Fig. 3 Correspondence between depth and flux

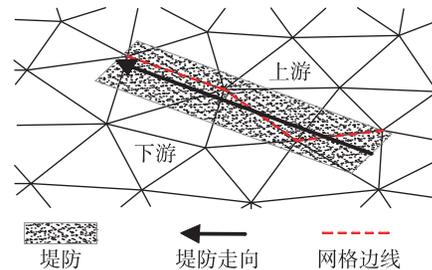


图4 堤防概化
Fig. 4 Generalized embankment diagram

2 实例研究

2.1 研究区域概况

以淮河干流凤台段防洪保护区为研究对象。该区域位于安徽省北部地区,介于阜阳、蚌埠和淮南三市之间,淮北大堤为其主要防洪屏障,区域内地形呈西高东低、北高南低走势,属淮河中下游平原区。局部区域地形比较复杂,有山丘、岗地、湖洼、采煤塌陷区、矿区等,研究区域淮河干流主要控制站包括鲁台子水文站、凤台(峡山口)水位站和淮南水位站。区域内主要线状地物包括S308(淮界路)、S203(淮六路)、S225(怀南路)、淮阜铁路。保护区内洪灾和涝灾往往互相影响,汛期受淮河水位顶托影响,区域内暴雨积水难以外排,常常形成“关门淹”。

2.2 模型构建

2.2.1 河道一维水动力模型构建 研究区域内淮河干流河段为鲁台子水文站至淮南水位站控制断面,对其建立一维水动力模型,上游入流边界条件为鲁台子水文站流量过程,下游出流边界条件为淮南站水位-流量关

系(见图 5), 模型验证条件选用峡山口水位站实测水位过程。

2.2.2 保护区二维水动力模型构建 采用非结构化三角形网格剖分数值模拟区域, 局部地形变化大处进行网格局部加密处理, 道路、堤防等线性构筑物在模型中赋予网格节点, 使三角形网格沿线性构筑物自动拟合形成, 网格最大剖分面积不大于 0.05 km², 共剖分网格 5.1 万个, 节点 14.6 万个。利用 Kriging 法将高程数据赋予每个计算网格, 修改网格属性。模型考虑线状地物主要包括 S308(淮界路)、S203(淮六路)、S225(怀南路)、淮阜铁路, 沿线过水桥涵 8 个。基于干湿动边界处理技术, 设定每个网格干水深为 0.005 m, 湿水深为 0.01 m, 溃口处初始水深为 0.02 m, 其余区域初始无积水。

2.2.3 多源洪水耦合模型 基于河道一维模型与防洪保护区二维耦合模型, 叠加区域内分区降雨过程。采用淮河流域设计暴雨成果表, 结合研究区域排涝分区情况, 通过综合径流系数法求得设计净雨过程, 作为二维区域降雨源项输入模型, 实现河道一维洪水、保护区二维洪水及区域降雨的多源洪水耦合计算。

2.3 模型率定

研究区域典型洪水包括 1991 年、2003 年和 2007 年 3 场洪水, 淮干凤台段防洪保护区历史上并未发生溃堤分流情况。采用峡山口水位站 2007 年实测洪水过程率定研究区域河道一维模型(率定结果见图 6(a)), 并采用 1991 年和 2003 年洪水过程验证所率定一维模型(验证结果见图 6(b)和(c))。综合分析图 6 可知, 实测值与模拟值最大水位误差为 0.14 m, 说明河道主槽糙率(0.027)和滩地糙率(0.036)设置基本合理, 可应用于该河段一维洪水演进过程模拟计算。利用卫星遥感影像解译获取防洪保护区不同土地利用类型分布情况并赋予相应糙率, 不同土地类型糙率取值为村庄 0.07, 空地 0.035, 河道 0.03, 水田 0.05。

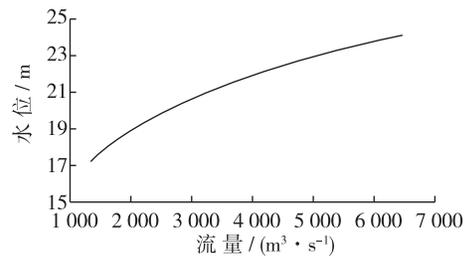


图 5 水位-流量关系

Fig. 5 Relationship between water level and discharge

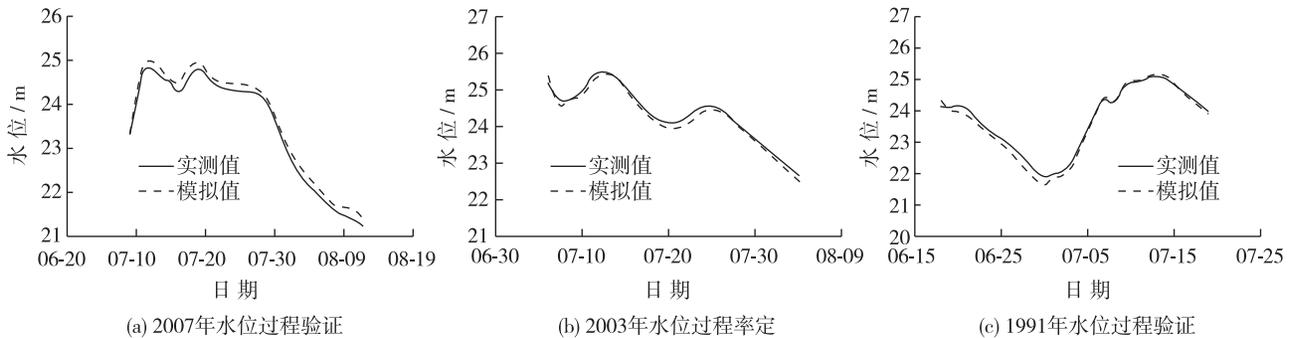


图 6 水位过程验证

Fig. 6 Water level verification

2.4 实例应用方案

2.4.1 应用方案设定 通过淮河干流凤台段河道洪水与保护区降雨频率遭遇相关性分析, 考虑可能遭遇的最大风险, 基于所建多源洪水耦合模型, 设定计算方案: 研究区域淮河干流 100 年一遇洪水与保护区 20 年一遇暴雨同时发生, 由于城北湖附近堤防较为薄弱, 且历史上发生过漫溢, 故溃口位置选为城北湖处, 溃口瞬间溃决, 宽度 200 m(溃口位置如图 7 所示)。鲁台子水文站 100 年一遇设计洪水过程见图 8, 研究区域 20 年一遇设计降雨过程如图 9 所示, 模拟计算时间为 30 d。

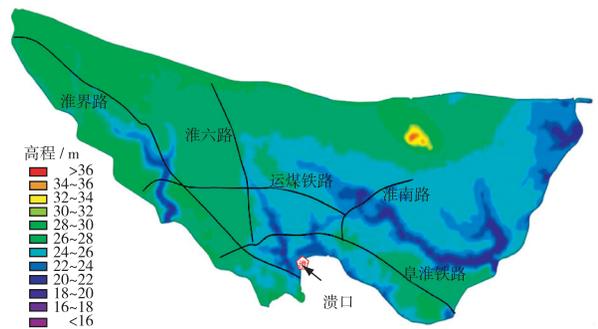


图 7 线状地物和溃口位置

Fig. 7 Linear objects and levee breach

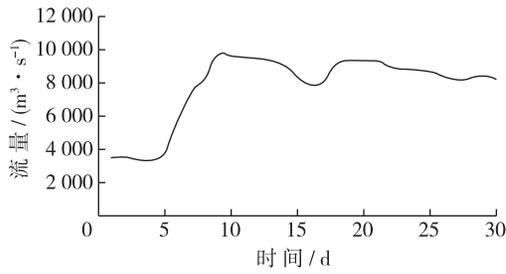


图8 100年一遇设计洪水过程
Fig. 8 100 years of design flood

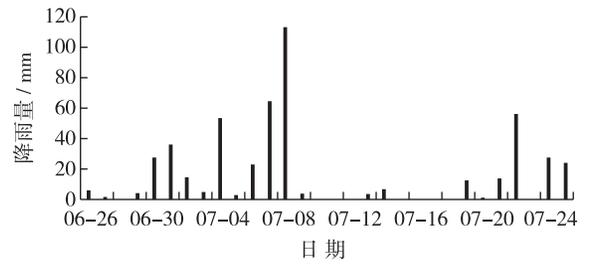


图9 20年一遇设计降雨过程
Fig. 9 20 years of design rainfall

2.4.2 计算结果及分析 根据建立多源洪水耦合模型,输入河道一维模型上游入流边界、下游出流边界及溃口侧堰分流构筑物参数,耦合计算溃口分流洪水及保护区降雨在二维平面防洪保护区内的演进情况,不同时段积水计算结果如图10所示。同等条件下,溃堤分流洪水与暴雨内涝两个单一洪源分析计算结果分别如图11所示。

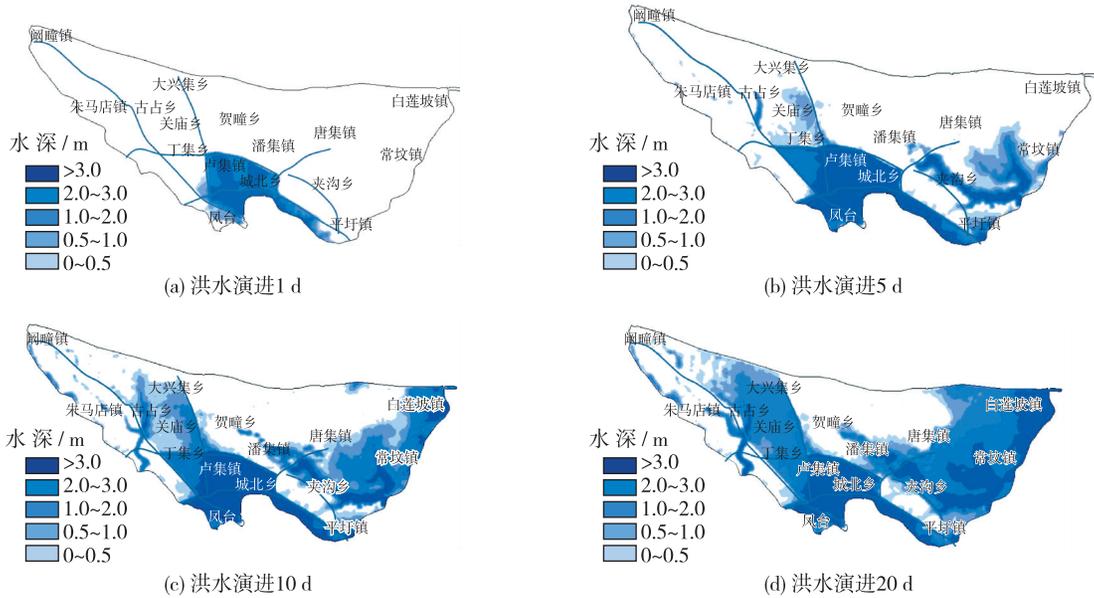


图10 溃口分流洪水叠加暴雨不同时段积水分布

Fig. 10 Distribution of water in different periods of multi-source flood

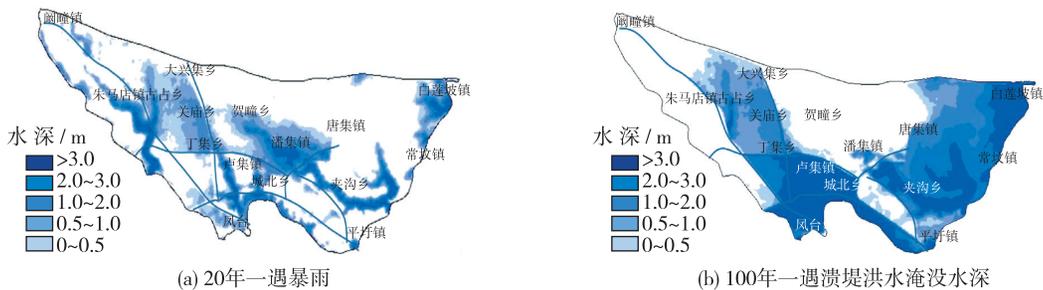


图11 单一洪源暴雨积水分布及洪水淹没水深

Fig. 11 Distribution of storm rainfall and flood

根据图 10 分析可知,受淮阜铁路等阻水及架河铁路桥等桥涵过水效果影响,形成最终淹没稳定范围,受洪涝影响区域包括城北乡、丁集乡等乡镇,不同淹没水深等级对应影响区域统计见表 1。综合分析图 11,统计多源洪水及单一洪源积水计算结果,不同淹没水深等级对应的淹没面积统计(见表 1)表明,研究区域受内涝水影响较大,符合区域防洪排涝现状,多源洪水耦合模型计算结果更能充分体现受洪涝灾害综合影响区域,为该区域洪涝风险分析及洪涝风险评价提供技术支撑。

表 1 不同淹没水深等级对应影响区域和淹没面积统计

Tab. 1 Statistics of submerged area in different region

km²

淹没水深	影响区域	单一暴雨	单一溃堤	多源洪水	淹没水深	影响区域	单一暴雨	单一溃堤	多源洪水
		内涝积水	分流洪水	耦合			内涝积水	分流洪水	耦合
<1 m	唐集镇、大兴集乡	369.41	201.17	281.64	2~3 m	常坟镇	59.81	147.85	193.27
1~2 m	丁集乡	125.22	177.48	204.99	>3 m	城北乡	62.77	222.75	257.62

3 结 语

对淮河中游风台段防洪保护区建立一、二维和暴雨多源洪水耦合模型,利用干湿边界理论避免了降雨造成模型失稳波动的影响。将道路等线性阻水构筑物概化成堰处理,同时按实际宽度考虑过水桥涵影响,利用实测洪水资料率定并验证所建模型精度及可靠性,通过比较单一洪源与多源洪水模拟计算结果,说明了该区域受暴雨内涝影响较为严重,同时基于多源洪水耦合模型计算了区域内受洪涝综合影响区域,该模型更适用于分析研究类似区域的洪涝风险。

参 考 文 献:

- [1] DUSHMANTA D, JAHANGIR A, KAZUO U, et al. A two-dimensional hydrodynamic model for flood inundation simulation: a case study in the lower Mekong River basin[J]. *Hydrological Progresses*, 2007, 21: 1223-1237.
- [2] ZOLGHADR M, REZA HASHEMI M, ZIA HOSSEINIPOUR E. Modeling of flood wave propagation through levee breach using MIKE21, a case study in Helleh River, Iran[C]// *World Environmental and Water Resources Congress*, 2010: 2683-2693.
- [3] GARCIA R, KAHAWITA R A. Numerical solution of the St Venant equations with the MacCormack finite difference scheme[J]. *Int J Numer Methods Fluids*, 1986(6): 507-527.
- [4] 刘树坤, 李小佩, 李士功, 等. 小清河分洪区洪水演进的数值模拟[J]. *水科学进展*, 1991, 2(3): 188-192. (LIU Shu-kun, LI Xiao-pei, LI Shi-gong, et al. Numerical simulation of flood routing in the Xiaoqinghe River flood plain[J]. *Advances in Water Science*, 1991, 2(3): 188-192. (in Chinese))
- [5] 李大鸣, 陈虹, 李世森. 河道洪水演进的二维水流数学模型[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 1998, 31(4): 439-446. (LI Da-ming, CHEN Hong, LI Shi-shen. A 2-D numerical model of propelling flood in the river[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 1998, 31(4): 439-446. (in Chinese))
- [6] 范玉, 陈建, 李大鸣. 一、二维洪水演进数学模型在蓄滞洪区的应用[J]. *华北水利水电学院学报*, 2009, 30(4): 12-15. (FAN Yu, CHEN Jian, LI Da-ming. Application of flood wave advance numerical modeling of one dimension and two dimensions in flood detention area[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2009, 30(4): 12-15. (in Chinese))
- [7] 李大鸣, 林毅, 周志华. 蓄滞洪区洪水演进一、二维数值仿真及其在注淀联合调度中的应用[J]. *中国工程科学*, 2010, 12(3): 82-89. (LI Da-ming, LIN Yi, ZHOU Zhi-hua. Research on 1D and 2D numerical simulation of flood routing and its application of combined-regulation in detention basin[J]. *Chinese Engineering Science*, 2010, 12(3): 82-89. (in Chinese))
- [8] 王船海, 李光炽. 流域洪水模拟[J]. *水利学报*, 1996(3): 44-50. (WANG Chuan-hai, LI Guang-zhi. The model of basin flood[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996(3): 44-50. (in Chinese))
- [9] 苑希民, 田福昌, 王丽娜. 漫溃堤联算全二维水动力模型及应用[J]. *水科学进展*, 2015, 26(1): 83-90. (YUAN Xi-min, TIAN Fu-chang, WANG Li-na. Comprehensive two-dimensional associate hydrodynamic models for overflow and levee-breach

- flood and its application[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(1): 83-90. (in Chinese))
- [10] SLEIGH P A, GASKELL P H. An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries[J]. *Computers & Fluids*, 1998, 27: 479-508.
- [11] 陆桂华, 张亚洲, 肖恒, 等. 气候变化背景下蚌埠市暴雨与淮河上游洪水遭遇概率分析[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(1): 31-37. (LU Gui-hua, ZHANG Ya-zhou, XIAO Heng, et al. Coincidence probability of urban rainstorm in Bengbu and flood in the upper reaches of Huaihe River under climate change[J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2015, 11(1): 31-37. (in Chinese))

Application of multi-source flood coupling model to flood analysis of flood protection zone

YUAN Xi-min¹, LI Chang-yue¹, TIAN Fu-chang², WANG Li-na¹

(1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China*; 2. *Frontier Technology Research Institute, Tianjin University, Tianjin 301700, China*)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the single flood risk analysis in the flood protection zone, in this paper the one-dimensional and two-dimensional unsteady flow basic control equations are taken as a theoretical base for analysis of flood risk. In order to solve the discrete grid problem, the finite volume method (FVM) is used for solving discrete grids. A multi-source coupling mathematical model for levee-breach flood and rainstorm has been established at the same time. The 1D and 2D models are jointed through a weir flow equation to calculate the real-time interaction between the river and the flood protection zone. It is optimized by dry depth and wet depth theories for the sake of making faster and better results. And this model has also utilized a remote sensing image interpretation method to deal with the complicated roughness having important impacts on the flood routing. And a generalized method is used to deal with the roads and water culverts which prevent or guide the flowing of water in the flood protection zone. This model is tested by historically measured flood data, which are the basic requirements in actual engineering simulation, and then the verified model is applied to simulate the multi-source flood occurring in the flood protection zone at Fengtai reach. Analysis of the big difference between the serious damages caused by a single flood and a multi-source flood is carried out. The research findings are of great significance in analyzing the multi-source flood and simulating flood motion coupling. And researchers can use the analysis results to make risk evaluation of the flood in the research area and also in some similar flood control protection areas.

Key words: flood protection zone; multi-source flood; coupling model; dry depth and wet depth; roughness partition