

韩江南北堤防洪保护区溃坝洪水演进数值模拟研究

王 扬^{1,2,3}, 黄本胜^{1,2,3}, 倪培桐^{1,2,3}, 陈丕翔^{1,2,3}, 董 志^{1,2,3}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510635; 3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510635)

摘 要: 洪水分析计算是洪水风险图编制的基础。基于一维、二维水力耦合模型,建立了韩江南北堤防洪保护区溃坝洪水演进数学模型,分析探讨了韩江南北堤瞬溃后溃口流量水位关系、主要地物特征点的水位和流速变化以及洪水演进过程。结果表明:溃口峰值流量出现在溃坝瞬间,随外江水位下降,溃口流量减小,至溃坝99 h后基本为0。湘桥区距溃口最近,受洪水破坏最严重,最大流速值超过1.3 m/s。云路镇、登岗镇和湘桥区由于地势较低,最大淹没水深普遍在2 m以上。

关键词: 防洪保护区; 溃坝洪水; 洪水演进; 溃口峰值流量; 数值模拟; 韩江南北堤防

中图分类号:TV122⁺.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)05-0175-05

Numerical modeling of dam-break flood in the Hanjiang River Flood Protection Area

WANG Yang^{1,2,3}, HUANG Bensheng^{1,2,3}, NI Peitong^{1,2,3}, CHEN Peixiang^{1,2,3}, DONG Zhi^{1,2,3}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamic Application Research, Guangzhou 510635, China;

3. State-Province Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510635, China;)

Abstract: The flood calculation is based on flood risk map. In this paper, a 1D and 2D coupling numerical model of the Hanjiang River Flood Protection Area is established to evaluate the relationship between flow rate and water level, the water level and velocity of the feature points, the dam-break flood routing process. The results showed that the dam-break peak flow appears the largest at the beginning of the dam-breaking, as the water level in the reservoir falls gradually, the flow discharge decreases linearly from the top to zero till the 99h after dam breaking. The dam-break flood has a greater destructive power against the area at Xiangqiao district where the maximum velocity can be faster than 1.3m/s. Yunlu town, Denggang town and Xiangqiao district where the maximum inundated depths can be deeper than 2m due to the lower terrain.

Key words: flood control protected area; dam-break flood; flood routing; dam-break peak flow; numerical simulation; Hanjiang River north-south embankment

1 研究背景

韩江南北堤防洪保护区洪水风险图编制项目为广东省2013年洪水风险图编制项目的重点任务之一,洪水分析模型是分析获取洪水演进及淹没信息的重要手段,为洪水风险图制作提供洪水特征等量化依据^[1-2]。

目前,洪水分析计算模型主要有一维水流模型、二维水流模型及在两者基础上耦合的数学模型。对于研究不同计算区域的洪水问题(如河道洪水及溃坝洪水),利用一、二维耦合模型可以充分发挥各自模型的优势,提高模型的计算效率和精度^[3]。近年来,一、二维耦合模型的研究有了较大的发展。国外方面,Lin等^[4]通过利用一维ISIS模型和二维DIV-

收稿日期:2018-01-05; 修回日期:2018-04-11

基金项目:广东省水利科技创新项目(2011-09); 广东省自然科学基金项目(2015A030313694)

作者简介:王 扬(1989-),男,安徽巢湖人,硕士,工程师,主要从事港口、海岸及近海工程方向研究。

AST模型对Greenwith港口漫堤洪水进行了模拟;Liang等^[5]采用动态链接库技术进行一、二维模型的耦合;Dushmanta等^[6]将有限差分法的耦合模型成功应用于湄公河的洪水模拟;Bohorquez等^[7]利用一维和二维水动力学模型对冰河溃坝洪水进行了重演;Fernández-Nieto等^[8]利用叠加原理对一维与二维进行了耦合计算。国内方面,李云等^[9]通过一维、二维洪水嵌套模型模拟了淮河临淮岗段溃坝洪水演进过程;黄金池等^[10]利用一、二维耦合模型研究了土石坝溃坝情况下的洪水演进情况;李大鸣等^[11-12]和范玉等^[13]采用具有旁侧出流的河网独立计算的一、二维嵌套衔接模式,建立了洪水演进数值仿真系统;苑希民等^[14-15]利用一、二维耦合数学模型,借助干湿水深理论对模型进行优化,实现了防洪保护区多源洪水运动的耦合模拟;刘海娇^[16]通过建立河道与溃坝洪水偶联的水力学模型,模拟了淮河流域谷堆圩保护区洪水演进过程。

通过建立一、二维耦合的溃坝洪水数值模型,模拟韩江南北堤溃堤洪水在保护区内演进的情况,分析探讨了韩江南北堤桩号1+720 m处堤防瞬溃后溃口流量水位关系、保护区内主要城镇特征点水深和流速变化以及保护区内洪水演进情况。

2 研究区概况

韩江南北堤从潮州市湘桥区的竹竿山脚起,顺干流南下,沿西溪右岸,经梅溪至汕头市金平区岐山的梅溪桥闸止,总长度42.9 km。韩江南北堤防洪保护区北为山丘,东临韩江南北堤,西靠揭阳市炮台海堤和地都海堤,北至汕头市的牛田洋海堤和梅溪河右岸堤防。韩江南北堤保护区内水系主要分为韩江水系和榕江水系。研究区域位置见图1。

3 数据与方法

3.1 一、二维耦合数值模型

一、二维耦合数值模型的计算区域包括韩江、榕江及韩江南北堤保护区。一维模型计算断面间距控制在500~1500 m以内,对于河宽较小的河段,断面间距适当缩小,使计算断面间距与河宽相匹配,河道形态变化显著的河段及建有工程(桥、闸、坝、堰等)的位置其断面适当加密。

保护区内的陆域采用平面二维模型概化。二维模型覆盖范围根据《广东省洪水风险图编制项目2013年度实施方案》以及韩江河道管理局编制的《韩江下游南北堤志》确定。模型采用不规则网格,

最大网格面积不超过0.1 km²,重要地区、地形变化较大部分的计算网格适当加密,网格尺寸控制在100~200 m。当二维模型范围高于地面的线状地物(包括公路、广梅汕铁路路基等)时,将其作为挡水或导流建筑物处理。当泛滥洪水达到其顶高程时,线状地物过流按堰流模式考虑。

对于一维模型与二维模型的耦合处理,水流以侧向堰流的形式从一维河道流向二维洪泛区,耦合连接是把河道的计算水位点与二维网格单元相连,一、二维连接仅考虑质量守恒,不保证动量守恒。一、二维耦合洪水数值模型最终覆盖的区域范围如图1所示。

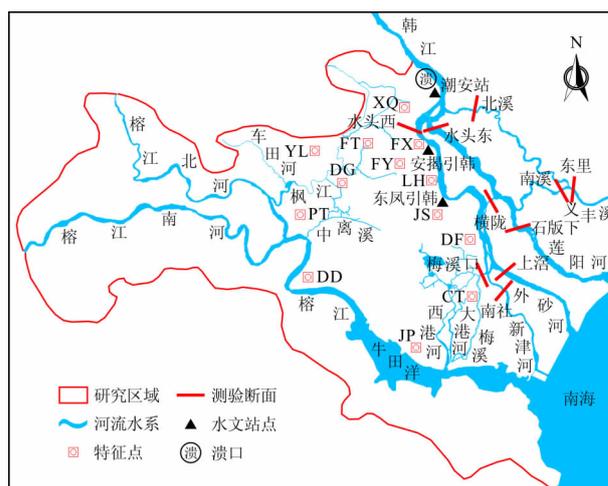


图1 研究区域及溃口、特征点、水文测站布置图

3.2 模型的率定和参数选取

根据现有的韩江三角洲下游河道洪水资料,采用“97.8”洪水潮安站、安揭引韩、东风引韩3个水文站点的水位过程及水头东、水头西、上濠、梅溪口、南社、石版下、东里7个断面的洪峰流量进行模型参数的率定。

表1为韩江三角洲各河道水文测验断面洪峰流量率定结果。由表1可见,除上濠(外沙河)、南社(新津河)、东里(北溪)3个测验断面的洪峰流量计算误差超过10%,韩江三角洲其余河道水文测验断面的洪峰流量计算误差均小于5%。利用“97.8”洪水资料率定得到的韩江三角洲的糙率大致在0.029~0.061之间。

防洪保护区的糙率则根据不同的下垫面类型进行选取,保护区内糙率大致在0.012~0.08之间。图2为韩江三角洲发生“97.8”洪水时各水文测站实测与计算的水位过程对比,结果表明,计算水位与实际洪水最大水位误差在0.01 m以内。

表 1 韩江三角洲各河道水文测验断面洪峰流量率定结果(“97.8”洪水)

站位或断面	所在河流	流量 $Q / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$		计算误差	
		实测	计算	绝对误差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	误差百 分比/%
潮安站	韩江干流	9950	9950	0	0.0
水头西	西 溪	5504	5692	188.2	3.4
水头东	东 溪	4153	4054	-99.4	-2.4
上 滘	外沙河	3258	2833	-425.0	-13.0
梅溪口	梅 溪	888	866	-22.5	-2.5
南 社	新津河	1549	1747	198.2	12.8
石版下	莲阳河	3254	3315	60.9	1.9
东 里	北 溪	1001	1160	159.2	14.9

3.3 溃口设置方案

通过实地调研,结合当地防汛指挥部门及有关地方专家意见,本次溃口设置于韩江南北堤桩号 1

+720 处(见图 1)。溃口溃决方式按瞬溃处理,溃口最终底高程为背河侧地面高程。计算的水文条件采用韩江发生 200 一遇的洪水遭遇外海多年平均天文潮。溃口的宽度初步采用《洪水风险图编制技术细则》中经验公式计算:

$$B_b = 1.9(\log_{10} B)^{4.8} + 20 \quad (1)$$

式中: B_b 为溃口宽,m; B 为河宽,m。

溃口宽度计算方案组合及计算结果见表 2。

4 结果与讨论

4.1 溃口流量水位过程分析

图 3 为溃口流量与水位变化过程线。由图 3 可见,韩江南北堤桩号 1+720 m 处堤防在外江洪峰水位对应时刻($t = 120$ h 时刻)溃决,溃堤峰值流量为 $10\ 190 \text{ m}^3/\text{s}$,溃堤时外江水位为 17.82 m,随着外江水位降低,溃口进入保护区的流量逐渐减小,在 $t = 219$ h 时刻,外江水位基本与溃口处保护区内水位相等,此时溃口由外江进入保护区内的水量基本为 0。

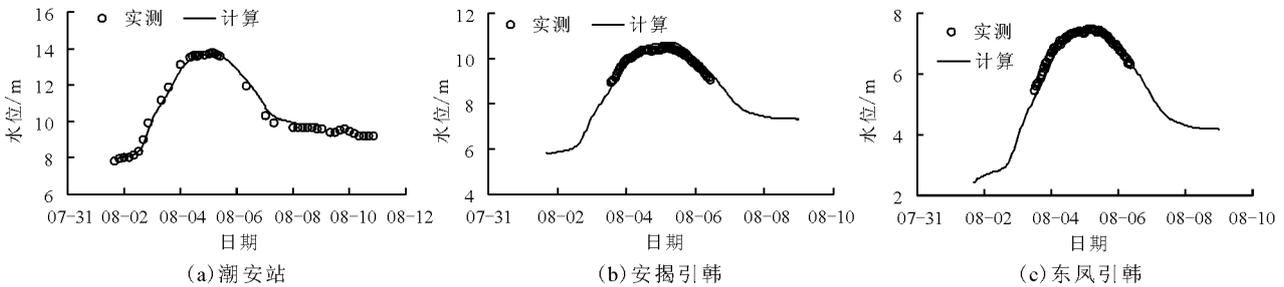


图 2 各站点实测水位与计算水位比较(“97.8”洪水)

表 2 韩江南北堤溃口宽度计算方案组合及计算结果

韩江潮安站		赤坎站/	东桥园站/	保护区内	妈屿站日最	溃口方案	
洪峰流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	相应设计频率	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	暴雨/mm	高潮位/m	溃堤桩号/m	溃口宽度/m
19500	200 年一遇	548	1450	145.0	1.25	1+720	300

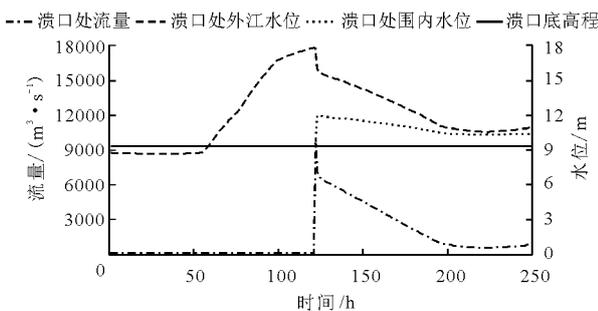


图 3 溃口流量与水位变化过程线

4.2 淹没水深和流速分析

为探讨洪水演进过程中对保护区内各城镇和居

民区的影响规律,选取了洪水演进过程中影响较大的城镇特征点来分析淹没水深和洪水流速的变化。保护区内主要城镇特征点位置见图 1,特征点的水深和流速变化过程见图 4~5。

由图 4 可知,堤防溃决后,洪水历时 5 h 到达离溃口较近的湘桥区等城镇,金石镇、炮台镇、地都镇、彩塘镇距溃口较远,洪水历时 20 h 以上才能抵达,其中金平区洪水前锋到达时间最长,为 58 h。云路镇、登岗镇和湘桥区由于地势较低,最大淹没水深普遍在 2 m 以上,并且在洪水消退后,仍有 0.9 m 左右的积水。

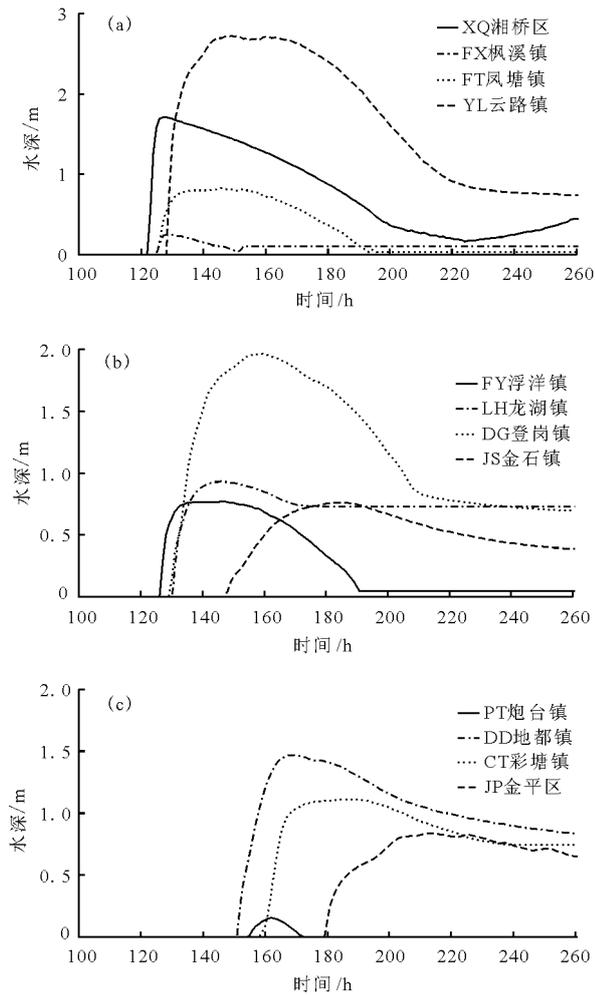


图4 保护区内各特征点水深变化图

由图5可知,堤防溃决后,湘桥区、枫溪镇、风塘镇等距溃口较近的城镇流速较大,最大流速均超过 1.0 m/s ,其中湘桥区距溃口最近,受洪水破坏最为严重,最大流速值超过 1.3 m/s 。距溃口较远的其他城镇的最大流速均小于 0.5 m/s ,受洪水的破坏作用较小。

4.3 洪水演进过程分析

韩江南北堤桩号 $1+720\text{ m}$ 处溃堤后(溃口宽度为 300 m) $6、12、24、48、72、96\text{ h}$ 的洪水演进情况见图6。

溃堤后 6 h ,洪水前锋西南侧到达登岗围,东南侧已经到达浮洋镇。此时枫溪镇最大淹没水深超过 3.0 m ,保护区内淹没面积 91.06 km^2 。溃堤后 12 h ,洪水前锋沿西南方向抵达榕江,南侧洪水顺地势而下到达中离溪,东南侧洪水沿广梅汕铁路东侧南下到达龙湖镇。其中枫溪镇、风塘镇最大淹没水深超过 2.5 m ,保护区内淹没面积 148.92 km^2 。溃堤后 24 h ,洪水前锋西南侧已经到达炮台镇,东南侧沿广

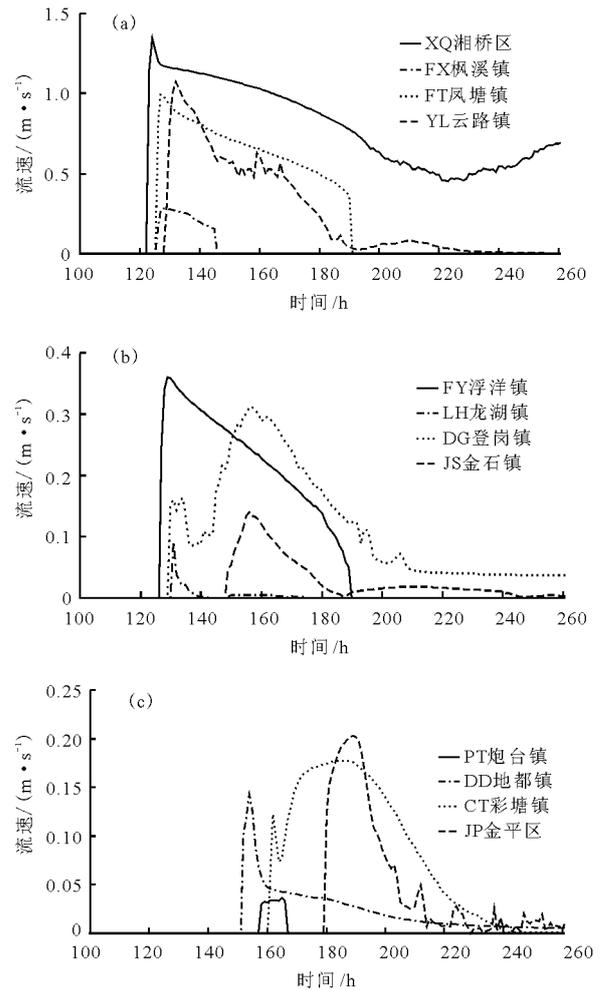


图5 保护区内各特征点流速变化图

梅汕铁路到达彩塘镇附近。此时枫溪镇、风塘镇及浮洋镇最大淹没水深超过 2.5 m ,保护区内淹没面积 208.5 km^2 。

溃决后 48 h ,西南侧洪水沿榕江北堤南下,前锋漫过地都镇向牛田洋海堤推进,东南侧洪水前锋到达大港河及外砂镇。此时枫溪镇、风塘镇、浮洋镇的最大淹没水深超过 2.0 m ,保护区内淹没面积 238.79 km^2 。

溃决后 72 h ,洪水沿榕江北堤南下淹没金平区,东南侧洪水淹没外砂镇大港河与南北堤汕头段区域,凤凰镇、登岗镇及浮洋镇部分涝水随枫江、中离溪等河道逐渐排入榕江。此时保护区内洪水淹没范围达到最大,主要涝区的淹没水深均超过 1.5 m ,保护区内淹没面积为 250.65 km^2 。

溃决后 96 h ,保护区内涝水随枫江、中离溪、大港河等主要连通榕江的河流排入外江,此时保护区内除了风塘镇等地势低洼的涝区外,大部分陆域的淹没水深不超过 1.0 m 。

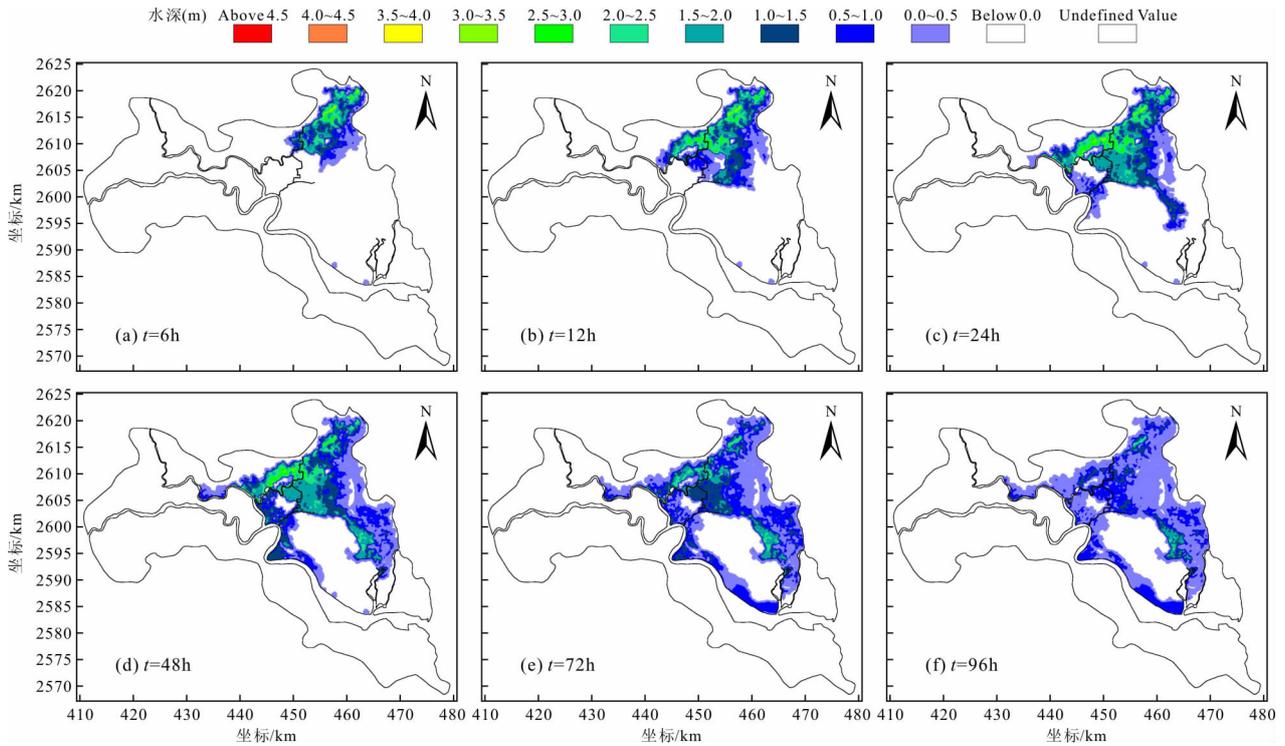


图 6 保护区内 96 h 内的洪水演进情况

5 结 论

本文基于一、二维水力学耦合模型,建立了韩江南北堤防洪保护区溃坝洪水演进数学模型,分析了韩江南北堤瞬溃后溃口流量水位关系、主要城镇特征点的水深和流速变化及洪水演进过程。

(1)堤防瞬溃后,溃口峰值流量出现在溃坝瞬间,随外江水位下降,溃口流量减小,至溃坝 99 h 后基本为 0。

(2)韩江南北堤桩号 1 + 720 m 处堤防溃决后,湘桥区距溃口最近,受洪水破坏最严重,最大流速值超过 1.3 m/s。云路镇、登岗镇和湘桥区由于地势较低,最大淹没水深普遍在 2 m 以上,建议当地防汛部门在溃堤后加强上述地区的排涝及避险转移工作。广梅汕铁路由于路基较高,一定程度上阻碍了洪水演进,造成铁路附近村庄壅水较高,建议防汛部分做好排水导流工作。

参考文献:

[1] 万群志. 洪水风险理论与方法研究[D]. 南京:河海大学,2003.
 [2] 林毅. 河道滞洪区洪水演进数值模拟与风险评估的研究[D]. 天津:天津大学,2007.
 [3] 张大伟. 堤坝溃决水流数学模型及其应用研究[D]. 北京:清华大学,2008.

[4] LIN B, WICKS J M, FALCONER R A, et al. Integrating 1D and 2D hydrodynamic models for flood simulation[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management, 2006, 159(1):19-25.
 [5] LIANG Dongfang, ROGER S F, LIN B L. Linking one- and two-dimensional models for free surface flows[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management, 2007, 160(3):145-151.
 [6] 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(9):1223-1237.
 [7] BOHORQUEZ P, DARBY S E. The use of one- and two-dimensional hydraulic modelling to construct a glacial outburst flood in a steep Alpine valley[J]. Journal of Hydrology, 2008, 361:240-261.
 [8] FERNÁNDEZ - NIETO E D, MARIN J, MONNIER J. Coupling superposed 1D and 2D shallow-water models: Source terms in finite volume schemes[J]. Computers & Fluids, 2010, 39(6):1070-1082.
 [9] 李 云,范子武,吴时强,等. 大型蓄洪区洪水演进数值模拟与三维可视化技术[J]. 水利学报,2005,36(10):1158-1164.
 [10] 黄金池,何晓燕. 溃坝洪水的统一二维数学模型[J]. 水利学报,2006,37(2):222-226.
 [11] 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洼淀联合调度中的应用[J]. 中国工程科学,2010,12(3):82-89. (下转第 185 页)

(3)根据实际工程的实测资料序列,采用随机风险率计算方法定量地分析大坝后续服役期内的防洪风险率,评估大坝继续使用期内的防洪能力。同时,本文的风险分析方法亦可为其他水利工程防洪风险评估提供参考。

参考文献:

- [1] 姜树海,范子武,吴时强. 洪灾风险评估和防洪安全决策[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [2] 田杏丽,黄强,王义民,等. 我国水库洪水资源化研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(5):36-39.
- [3] 毛德华,谢石,刘晓群,等. 洪灾风险分析的国内外研究现状及展望(Ⅲ)——研究展望[J]. 自然灾害学报,2012,21(5):8-15.
- [4] BERGA L. Dam safety[M]. Rotterdam: A A Balkema Publishers, 1998.
- [5] KWON H H, MOON Y I. Improvement of overtopping risk evaluations using probabilistic concept for existing dams[J]. Stochastic environmental research and risk assessment, 2006,20(4): 223-237.
- [6] 梅亚东,谈广鸣. 大坝防洪安全的风险分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2002,35(6):11-15.
- [7] 姜树海,范子武. 时变效应对大坝防洪风险率的影响研究[J]. 水利学报,2006,37(4):425-430.
- [8] 徐镇凯,王锋,魏博文,等. 多因素协同作用下混凝土坝性能退化机理研究进展[J]. 水利水电科技进展,2016,36(4):80-88.
- [9] 苑希民,田俊玲,庞金龙,等. 基于 FAHP 防洪保护区洪水风险分析的溃口选择研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):135-141.
- [10] 邹铁方,赵力萱. 事故再现不确定分析蒙特卡洛法的样本容量选取方法[J]. 中国安全科学学报,2013,23(5):22-26.
- [11] 段炼,袁寿其,胡林峰,等. 蒙特卡洛法在共轨系统可靠性分析中的应用[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2016,37(2):155-161.
- [12] 郭凤鸣. 一种生成大周期伪随机数的新算法——改进的混合同余法[J]. 地球科学,1992(6):733-738.
- [13] 李益,蔡新,徐锦才,等. 考虑时变效应的土石坝安全风险综合评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(6):655-659.
- [14] 范子武,姜树海,李运辉. 影响大坝防洪安全随机因子的时变特性及其量化方法[J]. 岩土工程学报,2008,30(11):1632-1636.
- [15] 李桂青,李秋胜. 工程结构时变可靠度理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [16] 卢安平,赵林,郭增伟,等. 基于 Monte Carlo 法的极值分布类型及其参数估计方法比较[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(2):88-95.
- [17] 袁子厚,何英明,吴桂英,等. 对数正态分布随机变量在设计基准期内的最大值分布[J]. 中国农村水利水电,2001(11):34-37.
- [18] 夏云云,文尚胜,方方. 基于 Kolmogorov-Smirnov 检验的 LED 可靠性评估[J]. 光子学报,2016,45(9):26-31.
- [12] 李大鸣,王志超,李杨杨,等. 驾驭式洪水演进模型在蓄滞洪区联合防洪中的研究与应用[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(10):1084-1092.
- [13] 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.
- [14] 苑希民,田福昌,王丽娜. 漫溃堤洪水联算全二维水动力模型及应用[J]. 水科学进展,2015,26(1):83-90.
- [15] 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.
- [16] 刘海娇. 基于一维、二维水力学耦合计算模型的洪水风险分析研究[D]. 天津:天津大学,2012.

(上接第179页)