

多溃口河网耦合模型在防洪保护区 洪水分析中的应用

苑希民¹, 庞金龙¹, 田福昌², 李长跃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: 基于珠江三角洲流域堤防在大洪水情况下多处溃决的特点,以一维、二维非恒定流控制方程作为理论基础,建立珠江三角洲流域多溃口一二维耦合河网模型,在耦合位置采用堰流公式实现河网和保护区内水流的实时交互。模型采用堤防渐变展宽的溃决方式进行溃口参数设置,采用地形局部修正的方法处理保护区内道路和桥涵的导阻水作用,采用糙率分区和对村庄等密集区域局部加大糙率的方法进行地形的优化处理,采用“干湿判别”理论对动边界进行优化。将优化后的模型用于江新联围防洪保护区多溃口洪水耦合计算,对比分析了单一溃口洪水与多溃口洪水淹没结果,研究成果对珠江三角洲流域及其他类似区域的多溃口溃堤洪水风险评价具有重要参考价值。

关键词: 多溃口; 河网; 耦合模型; 渐变展宽; 糙率分区; 干湿判别

中图分类号:TV877

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0128-08

Application of multi-breach river network coupling model in flood analysis of flood control protection Zone

YUAN Ximin¹, PANG Jinlong¹, TIAN Fuchang², LI Changyue¹

(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 characteristics of multi-breach of bank in pearl river delta basin under great flood, this paper established a multi-breach one-dimensional and two-dimensional coupling mathematical model in the pearl river delta by taking one-dimensional and two-dimensional unsteady flow basic control equation as theory base. It used weir flow equation to realize the real-time interaction between the river network and the flood control protection zone in coupling position. This model took controlled dike burst way of changeable width to set up parameters, and used local terrain correction's method to deal with the effect of guiding and flowing of water of roads and water culvert in flood control protection zone. It carried out optimization treatment of terrain by setting roughness region and increasing local roughness, applied dry and wet judgment theory to optimize moving border. The verified model was applied to simulate the multi-breach flood occurred at Jiangxinlianwei flood protection zone. The paper analyzed the big difference between the submerge result of flood caused by single-breach flood and that by multi-breach flood. The result can provide important reference for the risk evaluation of multi-breach flood in the pearl river delta and other similar areas.

Key words: multi-breach; river network; coupling model; gradual change width; roughness partition; dry and wet judgment

收稿日期: 2015-10-11; 修回日期: 2015-11-12

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

作者简介: 苑希民(1968-), 男, 江苏徐州人, 博士(后), 教授, 博士生导师, 研究方向为防洪减灾及神经网络。

通讯作者: 庞金龙(1988-), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向为河流动力学及水利信息化。

在我国,每年均存在河道洪水破堤分流给河流沿线的广大人民群众造成巨大生命财产损失的情况,而随着我国经济的发展和江河流域人口密集度增大,洪灾损失更是呈逐年增加的趋势。为了扭转这种被动的局面,除了在洪水发生时采取紧急抢险救灾措施外,采用数值模拟方法进行危险堤防段溃堤洪水演进分析也是至关重要的。精确可靠的洪水模拟计算分析不仅是洪灾风险评估的需要,更是各级防汛部门提出防洪决策,指导受灾群众及时有序避洪转移的需要。

近年来,随着洪水数值模拟计算理论的成熟和计算机水平的发展,国内外学者对溃堤洪水耦合计算模型进行了大量的研究。例如, Lai Xijun 等^[1]基于一、二维水动力学方程提出一种新的水动力耦合分析模型(CHAM),并运用 CHAM 再现了长江 1998 年大洪水和 2006 年大洪水的溃堤过程; Dutta 等^[2]以空间地理数据库为基础,采用有限差分法的耦合模型成功地对湄公河下游洪泛区的漫溃堤过程进行了模拟;姜晓明等^[3]采用黎曼近似解的一维-二维耦合数学模型对溃堤洪水进行模拟;李云等^[4]利用嵌套的一二维洪水计算模型,对淮河临淮岗段多种工况下的洪水演进过程进行了模拟;苑希民等^[5]借鉴全二维气相色谱理论,建立了河道和灌区洪水漫溃堤联算全二维水动力模型,并将该模型应用于黄河宁蒙段河道与左右岸灌区的漫溃堤洪水演进模拟;刘海娇^[6]基于水动力学理论建立了河道与堤防渐溃耦合模型,实现了河道沿程水力参数随溃口同时变化的全耦合,并将此模型应用于永定河左堤的溃堤演进分析;刘丽玲^[7]将河道与堤坝下游区域视为一个整体,建立了一维河道与堤坝渐溃耦联的水力模型,揭示了逐渐溃堤过程中溃口处流场的变化情况,以及溃堤波的传播、绕射、反射及变形的复杂运动特征;付成威等^[8]运用改进的一二维实时动态耦合模型,模拟了淮河干流溃堤时,河道水位、流量以及谷堆圩保护区的洪水演进的情况。

分析可知:大部分学者都是对简单河道进行漫溃堤洪水风险研究,而对于复杂河网条件下的多溃口同时发生的洪水风险研究却较少。

基于此,本文以一、二维非恒定流运动方程为理论基础,建立珠江三角洲流域河网和江新联围防洪保护区的一、二维耦合模型,采用 2005 年 6 月和 2008 年 10 月的洪潮实测数据对河网一维模型进行

率定和验证,然后利用率定和验证好的耦合模型对三角洲河网发生 200 年一遇洪水时,江新联围防洪保护区北街水闸下游溃口、清栏溃口和黄字围溃口同时溃决和单一溃决的洪水淹没风险进行对比分析研究。

1 多溃口河网耦合模型的建立

1.1 模型数值理论

1.1.1 一维水动力模型 河网一维水流数学模型的控制方程可运用圣维南方程组表述:

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

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

式中: Q 为总流量, m^3/s ; q 为侧向单位长度入流, m^2/s ; h 为水位, m ; R 为水力半径, m ; A 为过水面积, m^2 ; t 为时间, s ; C 为谢才系数, $\text{s}/\text{m}^{1/3}$; α 为动量修正系数,为无量纲常量。

1.1.2 二维水动力模型 防洪保护区二维水流数学模型的控制方程,可采用 N-S 方程的平面二维浅水方程来描述:

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \quad (4)$$

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

$$Z = H + B \quad (6)$$

$$u = M/H \quad (7)$$

$$v = N/H \quad (8)$$

式中: H 为水深, m ; B 为地面高程, m ; Z 为水位, m ; M 和 N 分别为 x 、 y 方向的单宽流量, m^2/s ; u 和 v 分别为 x 、 y 方向的流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; q 为源汇项, m^2/s ; n 为糙率系数,为无量纲常量。

1.1.3 一、二维耦合模型 河网一维模型和防洪保护区二维模型在耦合位置采用宽顶堰公式进行侧向连接,通过实时监测一二维模型的水位变化,计算耦合处的流量和动量的交换量。宽顶堰流公式表述如下:

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

(9)

式中： $h_1 = \max(Z_u, Z_d) - Z_b$ ； $h_2 = \min(Z_u, Z_d) - Z_b$ ， 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，m； g 为重力加速度， m/s^2 ； q 为溃口处单宽流量， m^2/s 。

1.2 模型优化处理

1.2.1 溃口设置 考虑最不利因素，溃口形状等效为矩形。溃决方式采用横向展宽和纵向冲刷的渐变溃决方式，溃堤时刻为水位达到堤防设计水位的时刻。溃口在任一时刻的宽度可按以下经验公式^[9]确定：

$$B_b^o = \begin{cases} B_b/2 & \tilde{t} = 0 \\ \frac{B_b}{2}(1 + \tilde{t}/T) & 0 < \tilde{t} \leq T \\ B_b & \tilde{t} > T \end{cases}$$

(10)

$$T = 1.527(B_b - 10)$$

(11)

式中： $\tilde{t}$ 为溃堤后历时； T 为溃堤持续时间，min； B_b^o 为任意时刻的溃口宽，m； B_b 为最终溃口宽，m。

1.2.2 导阻水建筑物设置 为充分考虑保护区内高于地面 0.5 m 以上的线状地物（内河堤防、公路、铁路路基等）对洪水演进的影响，采用 DEM 数据插值结合测量数据局部修正的方法对堤防、道路的阻水及导流作用进行概化处理。对于阻水建筑物沿程缺口及桥涵，宽度不足一个网格边长时，在模型中设置长、宽、高等参数；宽度大于一个网格边长时，通过地形修正来体现。

1.2.3 干湿边界处理^[10] 模型计算过程中，为了避免干湿水深交替造成的不稳定性，需采用“干湿判别”理论进行动边界处理。“干湿判别”理论首先需要设定一个干水深（ H_{dry} ）值和一个湿水深（ H_{wet} ）值，然后通过网格淹没水深（ H ）与这两个值进行比较，以此来判别网格的动量通量（ τ ）和质量通量（ j_m ）是否参与淹没计算。网格水深和通量计算对应关系如表 1 所示。

表 1 水深比较与动量计算关系

水深比较	通量计算
$H < H_{dry}$	$\tau = 0, j_m = 0$
$H_{dry} < H < H_{wet}$	$\tau = 0, j_m > 0$
$H > H_{wet}$	$T > 0, j_m > 0$

1.2.4 糙率设置 为了反映保护区下垫面对洪水演进的影响，采用真实地形法对保护区内的村庄、道路、耕地、河流等地设置不同的糙率。由于搜集到的地形数据往往不能完全准确地代表真实地形，为了保证模型计算精度，对于村庄等密集度较大的地区采用局部加大糙率的方式进行优化。

2 模型实例研究

2.1 研究区域概况

江新联围防洪保护区位于珠江三角洲河网中西北江西部，江新联围大堤是其主要的防洪防潮屏障，堤防防洪标准为 50 年一遇，防潮标准为 100 年一遇。联围东部是西江干流、西海水道、石板沙水道；南部有劳劳溪、虎坑水道；西部是潭江下游及崖门水道；北部是丘陵山地。围内河道交错，主要河流有江门水道、睦洲水道、天沙河、礼乐河、九子沙河、新前水道和新妇河。围内地势西北高、东南低，西北部是丘陵山区，东南部是冲击平原区，绝大部分地区高程在 0 ~ 1 m（珠基，下同）之间，小部分低洼地面在 0 ~ 0.6 m 之间，城乡地面高程一般在 0 ~ 2.5 m 之间。区域内主要道路有广珠铁路、中江高速（G94）、江珠高速（S47）、272 省道、270 省道、271 省道、364 省道等。保护区共包括江门市江海区、新会区和蓬江区 3 个地区，地区经济发达，人口密集，堤防一旦溃决，必然会造成巨大的生命财产损失。江新联围区域概况如图 1 所示。

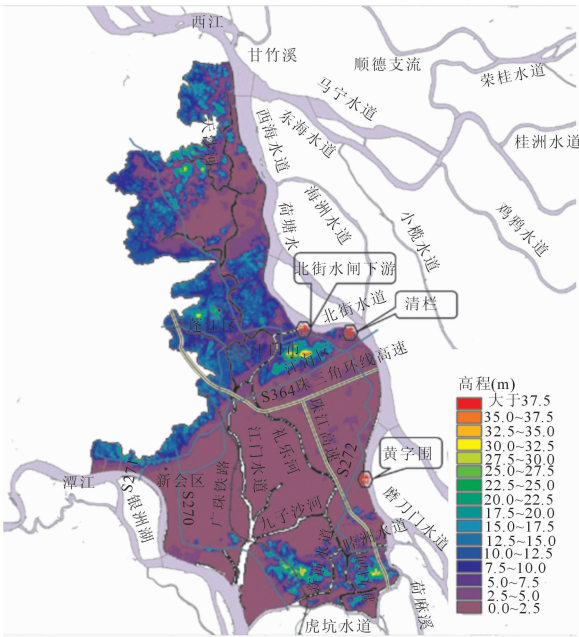


图 1 江新联围区域概况及溃口位置图

2.2 模型构建

2.2.1 河网一维水动力模型构建 河网一维水动力模型上游边界为西江高要站、北江石角站、潭江石咀站、流溪河老鸦岗站,其中高要站和石角站为流量边界,石咀站和老鸦岗站为水位边界。下游边界为崖门水道官冲站、虎跳门水道西炮台站、鸡啼门水道黄金站、磨刀门水道灯笼山站、横门水道横门站、洪奇门水道万顷沙西站、蕉门水道蕉门站、虎门水道三沙口站,下游边界均采用水位边界。模型共包括 43 条外河和 7 条内河的 398 个实测大断面。河网断面及水文水位站位置如图 2 所示。由于三角洲河网流态复杂,模型计算采用热启动的方法启算,计算步长设定为 60 s。

2.2.2 河网一维水动力模型率定和验证 采用 2005 年 6 月的大洪水实测数据进行模型率定,采用 2008 年 10 月潮水实测数据验证已率定模型。查阅相关文献,确定河道综合糙率的取值范围为 0.02 ~ 0.038。率定和验证的站点包括马口站、三水站、石角站、北街站、大敖站、甘竹站、高要站等 24 个水文水位站。部分典型站点的率定和验证结果如图 3 和图 4 所示。从图 3 可以看出,率定和验证的洪水过

程线实测值和计算值基本吻合,峰值、峰现时间接近,水位误差小于 20 cm,流量误差小于峰值流量的 5%,模型精度较高。

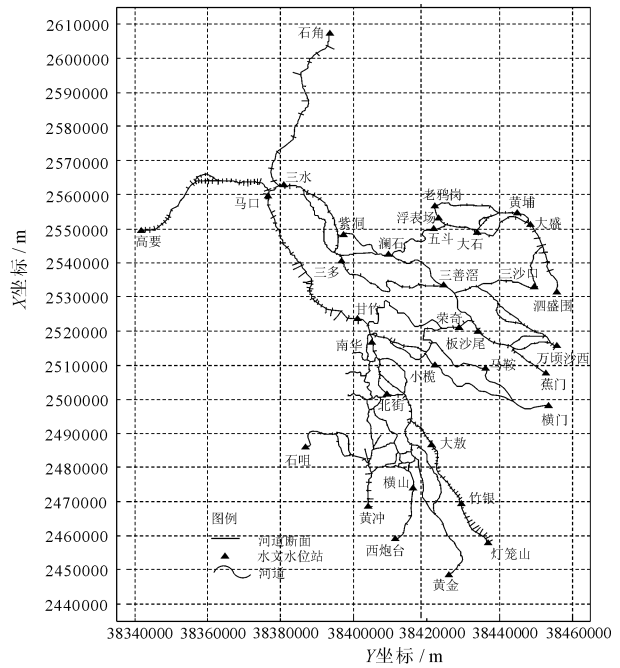


图 2 河网断面及水文水位站位置示意图

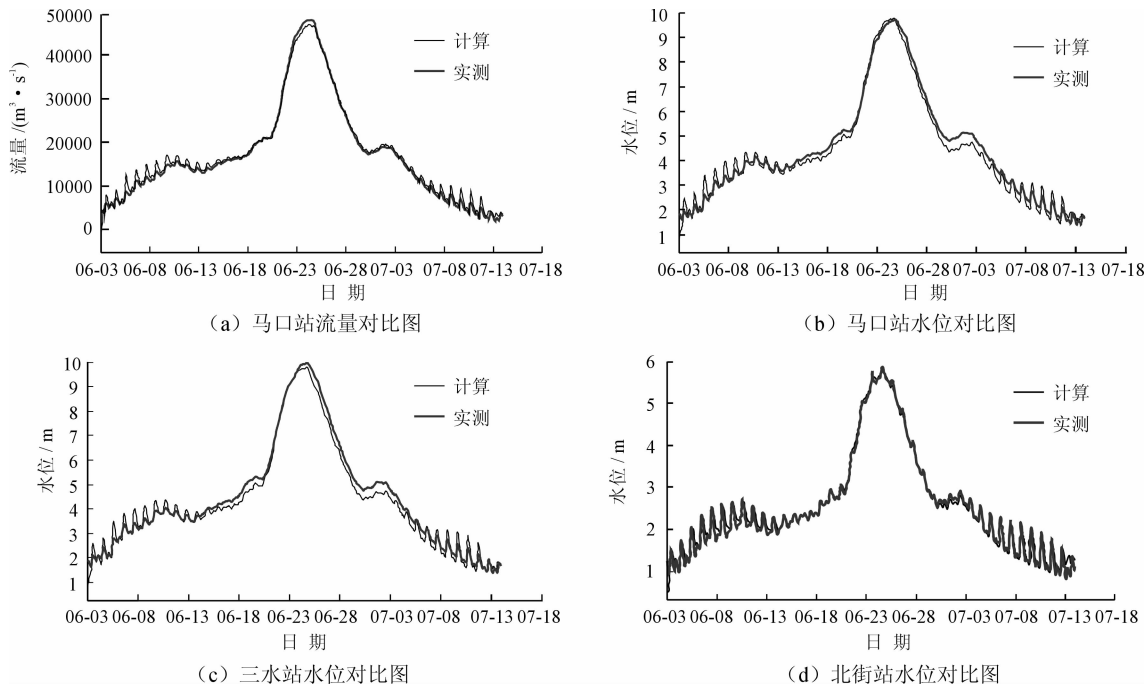


图 3 2005 年 6 月部分典型水文水位站率定结果对比图

2.2.3 保护区二维水动力模型构建 采用非结构化三角形网格进行保护区网格剖分,重要地区、河道、堤防、道路及其他地形变化剧烈的区域,网格适当加密,计算区共剖分网格 9.6 万个。网格插值采

用的高程点由 1: 1 万 DEM 提取,根据地物复杂程度提取不同密集度的高程散点:村庄散点间距 20m,铁路、公路、河流、堤防散点间距 5m。计算区共提取高程散点 400.9 万个。

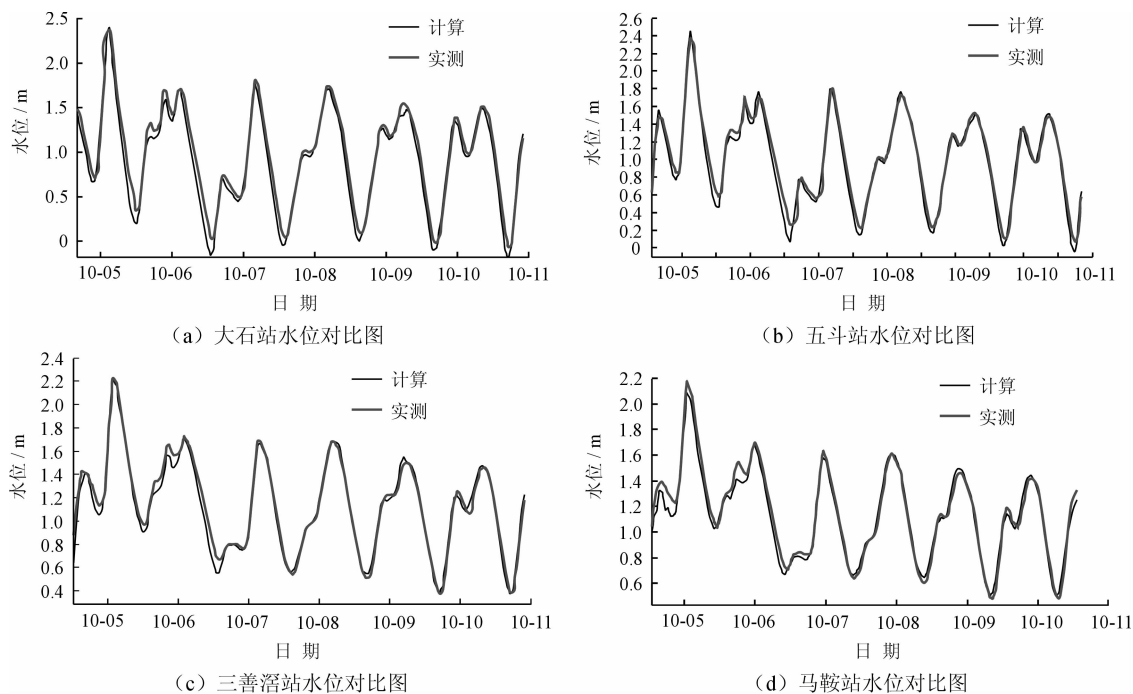


图4 2008年10月部分典型水位站验证结果对比图

对于保护区内江门水道、睦洲水道、天沙河、礼乐河、九子沙河、新前水道和新妇河等内河堤防和广珠铁路、中江高速(G94)、江珠高速(S47)、272省道、270省道、271省道、364省道等高于地面0.5 m的线状地物,为了充分考虑其对洪水演进的影响,采用DEM数据插值结合测量数据局部修正的方法进行概化。模型中共考虑小于一个网格边长的桥涵或缺口21个,大于一个网格边长的桥涵或缺口12个。对于保护区内的村庄、道路、耕地、河流等地物设定不同的糙率,以反映保护区下垫面对洪水演进的影响,不同区域糙率取值如表2所示。基于网格“干湿判别”理论,每个网格干水深设定为0.005 m,湿水深设定为0.01 m,保护区初始无积水。

表2 防洪保护区糙率取值表

序号	下垫面类型	糙率	序号	下垫面类型	糙率
1	堤、路、埝	0.045	6	条田、台田	0.065
2	果林	0.065	7	河床、渠床	0.035
3	房屋	0.100	8	谷场	0.030
4	鱼池、水池	0.035	9	草地	0.040
5	水田	0.040	10	菜地	0.035

2.2.4 一二维耦合模型构建 堤防发生溃决后,河道洪水由溃口涌入防洪保护区,引起河道水位下降。为准确描述河网与保护区之间的相互影响,在溃口处采用侧向连接的形式实现河网与保护区的一二维

耦合,耦合模型局部如图5所示。

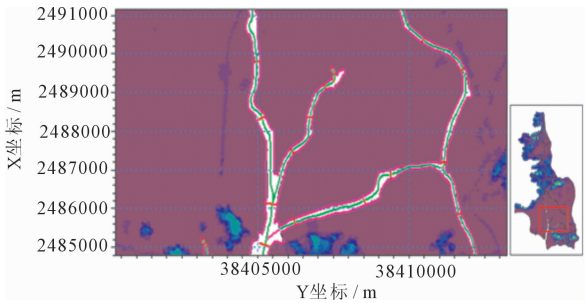


图5 一、二维耦合模型局部图

2.3 实例应用方案

2.3.1 方案设定 珠江三角洲河网发生200年一遇大洪水时,江新联围堤防溃决,溃口位置为北街水闸下游、清栏和黄字围,如图2所示,共设定3个溃口同时溃决和单一溃决4种计算方案。溃决方式为考虑横向冲刷和纵向展宽的渐变溃决,初始溃口宽度100 m,最终溃口宽度200 m,溃口展宽过程参见公式(10)和公式(11)。一维河网模型的上边界条件是高要站、石角站200年一遇设计洪水流量过程,老鸦岗站、石咀站200年一遇设计洪水水位过程,下边界条件为官冲站、西炮台站、黄金站、灯笼山站、横门站、万顷沙西站、蕉门站、三沙口站等八大口门的年最高潮位均值,模型计算时间为10 d。

2.3.2 计算结果与分析 在模型中,输入河网一维水动力模型200年一遇洪水的上下游边界条件,并

设定耦合模型启算的其他参数,进行三角洲河网和江新联围防洪保护区之间的一二维耦合模型计算。北街水闸下游溃口、清栏溃口和黄字围溃口同时溃决的洪水演进过程如图 6 所示,各个溃口单一溃决和同时溃决的最大淹没水深图如图 7 ~ 图 10 所示。

计算结果对比分析:根据图 6 分析可知,洪水演进过程中主要受 S272、S364、江珠高速、珠三角环线

高速、礼乐河堤防、睦洲水道堤防等阻水和道路中间高架桥、过水涵洞等过水效果影响,形成最终淹没范围。淹没范围包括濠头街和外海街道的绝大部分区域和濠北街道、礼乐街道、睦洲镇的少部分区域,不同水深等级下受影响的各项社会经济指标如表 3 所示。从洪水演进过程中可以看出,洪水演进 10 d 的淹没水深小于演进 5 d 时的淹没水深。这是因为洪

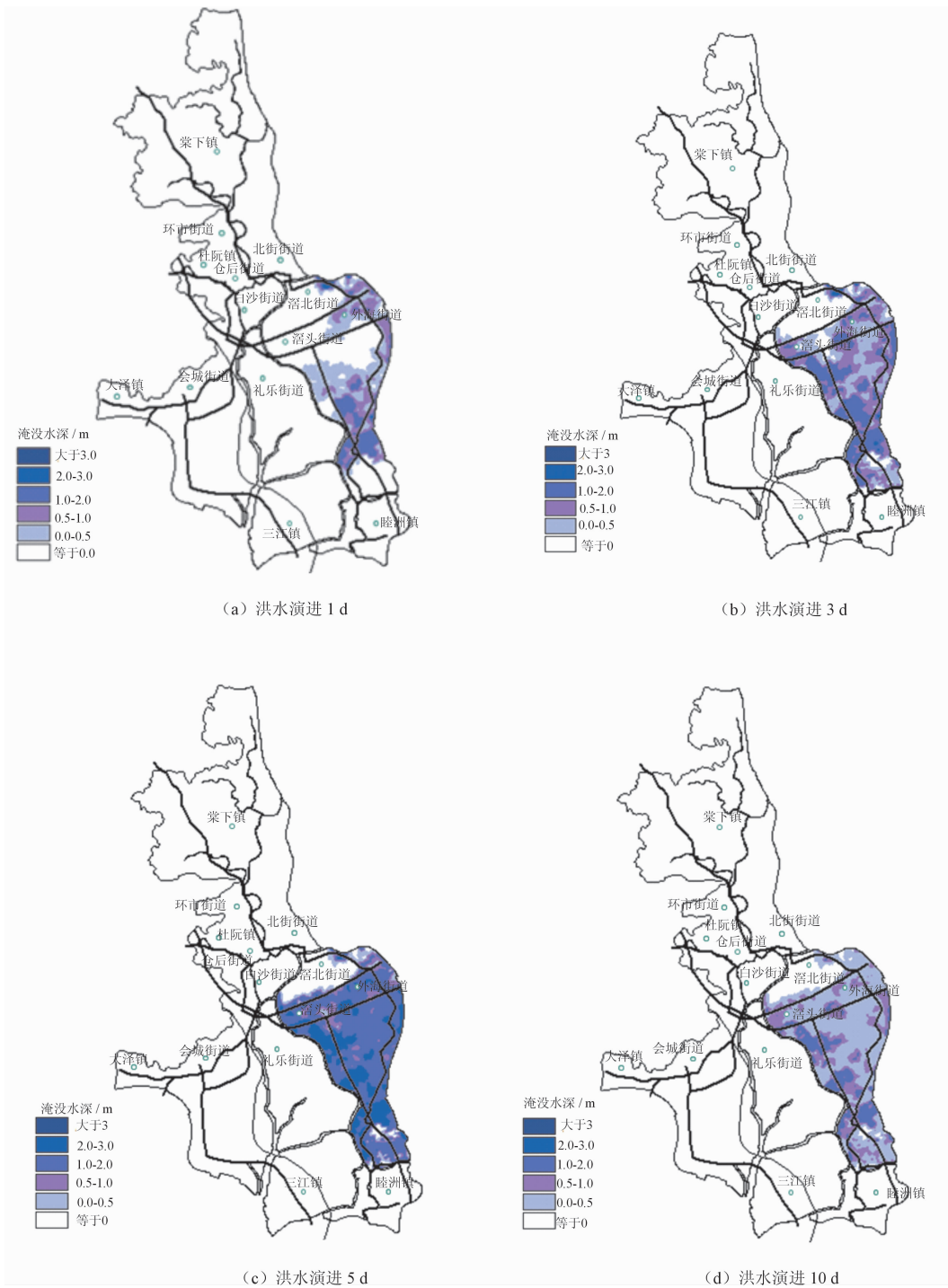


图 6 北街水闸下游溃口、清栏溃口、黄字围溃口同时溃决演进过程

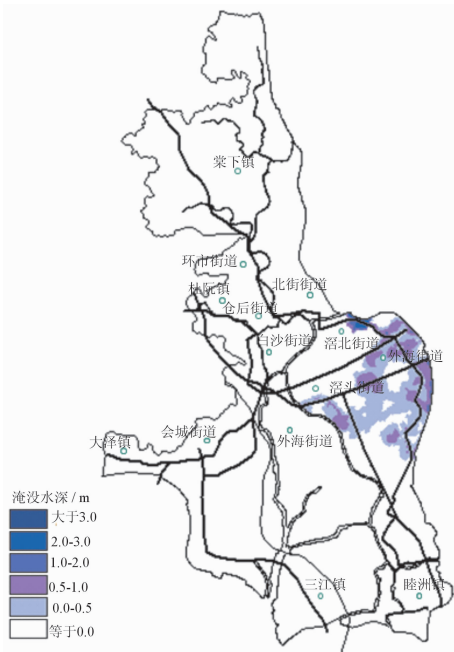


图7 北街水闸下游溃口最大淹没水深图

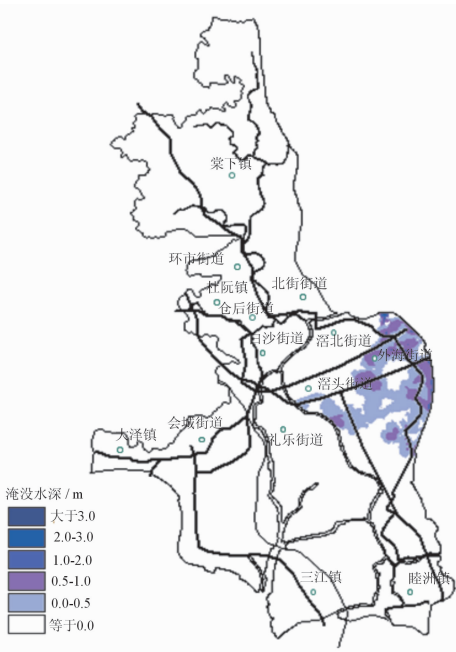


图8 清栏溃口最大淹没水深图

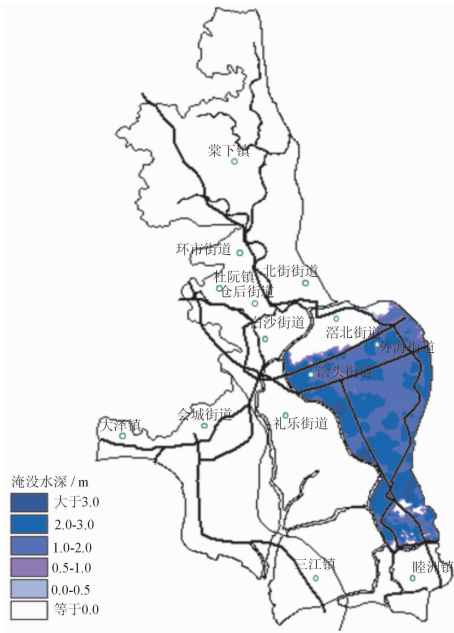


图9 黄字围溃口最大淹没水深图

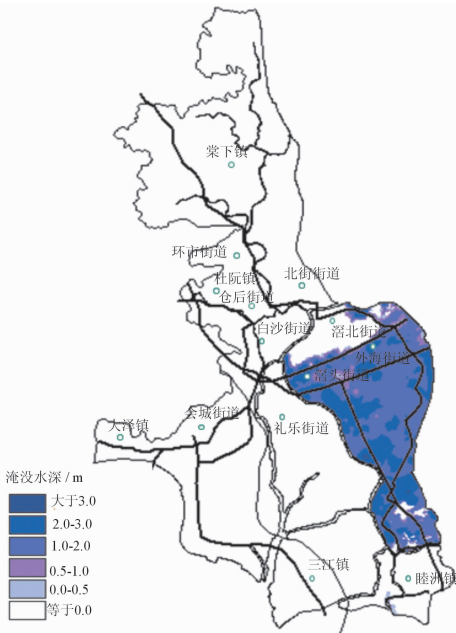


图10 三溃口联溃最大淹没水深图

水演进 5 d 后,河道水位下降,保护区内水位高于堤外河道水位,部分洪水从保护区退至河道,这正体现了耦合模型一、二维水量实时交互的特点。

对比图 7~图 10 可以看出,黄字围溃口、北街水闸下游溃口和清栏溃口同时溃决时,洪水主要来源为黄字围溃口的溃堤洪水,北街水闸下游溃口和清栏溃口的溃堤洪量相对较小。各溃口单一溃决和

同时溃决条件下,不同淹没水深等级对应的淹没面积统计如表 4 所示。虽然北街水闸下游溃口和清栏溃口进洪量相对较小,但是从洪水演进过程的角度考虑,3 个溃口同时溃决更能反映珠江三角洲流域溃堤洪水的特点,也更为该地区的防洪决策提供重要的技术支撑。

表 3 不同水深受洪水影响的社会经济指标统计表

水深等级/ m	淹没农田积/ hm ²	淹没房屋 面积/万 m ²	受影响公路 长度/km	受影响铁路 长度/km	受影响人口 总数/万人	受影响 GDP/ 万元
<1	38.25	77.92	10.87	0.20	0.72	46445.00
1~2	223.20	514.75	32.90	4.75	6.89	431190.30
2~3	914.09	391.37	17.76	4.45	5.67	290414.20
>3	199.27	18.46	1.72	0	0.39	15622.19
合计	1374.81	1002.50	63.25	9.40	13.67	783671.70

表 4 不同水深等级对应淹没面积统计表					km ²
水深 等级/m	黄子围 溃口	北街水闸 下游溃口	清栏 溃口	三溃口 同时溃决	
<1	3.52	26.15	25.14	4.02	
1~2	35.57	1.59	1.13	36.13	
2~3	33.48	0.39	0.06	33.85	
>3	3.55	0.12	0	3.68	

3 结 论

本文基于一二维非恒定流水动力学理论,建立了珠江三角洲流域一二维耦合河网模型。从模型本身和应用价值方面作出如下结论:

(1)本模型考虑了三角洲流域多条河流相互影响和分叉河道的分流比等复杂因素,利用两场洪潮实测数据对河网一维模型进行率定和验证,效果良好。同时,模型采用了溃口渐变展宽、导阻水建筑物处局部地形修正、干湿边界处理、糙率分区和糙率局部加大等优化措施,保证了模型计算的精度和合理性。

(2)利用本模型成功模拟了江新联围防洪保护区在遭遇 200 年一遇大洪水时多溃口同时溃决洪水演进过程,并对不同水深等级下的影响损失进行统计,这对当地防汛部门做出正确的防洪决策,规划合理的避洪转移路线以及评估洪灾损失都具有重要的指导意义。

(3)珠江三角洲流域联围众多,只需改变耦合位置便可实现一维河网和任何堤围的耦合连接,然后对此堤围溃堤洪水进行数值模拟。本河网模型的建立,对于整个珠江三角洲流域溃堤洪水风险研究具有重要的实用价值。

参考文献:

[1] Lai Xijun, Jiang Jiahu, Liang Qiuhua, et al. Large-scale hydrodynamic modeling of the middle Yangtze River Basin with complex river-lake interactions [J]. Journal of Hydrology, 2013, 492: 228-243.

[2] Dutta D, Alam J, Umeda K, 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.

[3] 姜晓明,李丹勋,王兴奎. 基于黎曼近似解的溃堤洪水一维-二维耦合数学模型[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 214-221.

[4] 李云,范子武,吴时强,等. 大型行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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 刘丽玲. 河道与渐溃堤坝耦合的水力数值模拟的研究[D]. 南京:河海大学, 2004.

[8] 付成威,苑希民,杨划敏. 实时动态耦合模型及其在洪水风险图中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2013, (5): 32-38.

[9] 全国重点地区洪水风险图编制项目组. 洪水风险图编制技术细则(试行)附录[R]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013.

[10] Sleigh PA, Gaskell PH, Berzins M, et al. An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries[J]. Computers & Fluids, 1998, 27(97): 479-508.