

韩江三角洲河网航道整治水动力数学模型

雷 燕¹, 唐洪武¹, 周宜林¹, 陈界仁¹, 刘 刚²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 ;

2. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要 对韩江三角洲河网区河道进行概化, 采用 Preissmann 有限差分格式和松弛迭代法建立韩江三角洲河网水动力数学模型, 并利用 2005 年的实测水文资料对韩江三角洲河网的水面线、分流比进行验证, 最后对 2 个整治工程方案的整治效果进行模拟计算和方案比选。结果表明 水位计算值与实测值误差一般小于 0.05 m, 分流比计算值与实测值误差小于 1% 在整治流量条件下, 各河道水位变化很小, 分流比增加值最大为 2.35% 在洪水条件下, 水位壅高值最大为 0.07 m, 分流比增加值最大为 2.06%。

关键词 韩江三角洲 河网 航道整治 水动力数学模型 松弛迭代法

中图分类号 :TV143

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2007)06-0053-04

Hydrodynamic numerical model for waterway regulation of river networks of Hanjiang River Delta//LEI Yan¹, TANG Hong-wu¹, ZHOU Yi-lin¹, CHEN Jie-ren¹, LIU Gang² (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 2. College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract : Based on the generalization of the river networks of Hanjiang River Delta, a hydrodynamic model for the river networks was developed for Hanjiang River Delta by using Preissmann finite difference scheme and relaxation iterative method. Then, the water level curves and flow division ratio of the river networks obtained by the model were verified with the measured data in 2005. The effects of different regulation schemes were simulated and the schemes were compared. The results show that the differences between the calculated and measured data of water levels are generally smaller than 0.05m, and that the relative errors of the calculated results of flow diversion ratio is less than 1% as compared with the measured data. It is also indicated that the change of water level of each channel is very small, and the maximum increment of flow diversion ratio is 2.35% at the regulated discharge after completion of the project, while under the condition of floods, the maximum increment of water level is 0.07 m, and the maximum increment of flow diversion ratio is 2.06% .

Key words : Hanjiang River Delta ; river network ; waterway regulation ; hydrodynamic numerical model ; relaxation iterative model

韩江三角洲地处粤东,是我国六大三角洲之一,也是我国的一个重要经济区。该地区河网纵横交错,共有五大入海口门,分水分沙关系及河床演变较复杂。近年来,随着该地区社会经济的快速发展,韩江三角洲河网航道现状已无法满足航运的要求,因此有必要进行航道整治,将航道等级由Ⅶ级提高到Ⅴ级。由于韩江三角洲河网复杂、入海口门多、要求模拟范围大,运用物理模型进行整体模拟困难较大,而用数学模型解决此类问题显示出了较强的优越性。为此,本文建立了韩江三角洲河网水动力数学模型,利用该模型对航道工程整治效果及其对河道行洪的影响进行分析研究。

通常,河网非恒定流水力计算问题有 4 种解法:

直接解法^[1-3]、分级解法^[4-7]、单元划分法^[8]和松弛迭代法^[9]。目前前 3 种解法存在两个方面的不足: ①对于大型河网,所形成的系数矩阵几乎是满秩的大型矩阵,存储量大,求解效率低,数值计算不稳定; ②在方案研究阶段需要增减河道时,节点重新编码繁琐,耗时多,容易出错。本文采用松弛迭代法和 Preissmann 有限差分格式建立的河网水动力数学模型具有以下特点: ①每条河道分别进行求解,因此河道汇流节点不需编码,河道断面不需整体编码,可灵活增减河道数目; ②每条河道用 Newton-Raphson 方法直接求解非线性方程组,收敛速度快、精度高; ③所形成的线性方程组系数矩阵均为五对角矩阵,存储空间小,算法简单,数值计算稳定。因此与其他

方法相比,该模型在求解大型复杂河网水流问题时具有较大的优越性。

1 河网水动力数学模型的建立

1.1 基本方程

河网水流运动基本方程采用圣维南方程组,它由连续方程和运动方程组成:

$$\frac{\partial(A+A_0)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\alpha Q^2}{A}\right) + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f\right) + L = 0 \quad (2)$$

式中: Q 为流量; h 为水位; A 为有效过水断面面积; A_0 为蓄水断面面积; x 为沿主流向的河道纵向距离; t 为时间; q 为单位长度河段均匀旁侧入汇流量(侧向入流为正,出流为负); g 为重力加速度; α 为动量校正系数; S_f 为河道的阻力坡降, $S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}}$; n 为糙率系数; R 为水力半径; L 为侧向流的动量,主要考虑两种形式:①侧向入流, $L = qv_x$, v_x 为侧向入流沿河道流向 x 的速度分量;②侧向出流, $L = -qQ/A_0$ 。

1.2 方程的离散及求解

基本方程采用 Preissmann 加权四点隐式有限差分格式进行离散,离散后得到的非线性方程组利用求解效率高的 Newton-Raphson 方法迭代求解。迭代法中线性方程组系数矩阵为五对角矩阵,采用有效压缩存储形式的 Gauss 列主元消元法求解,此方法具有存储单元少、舍入误差小且数值计算稳定的优点。

按先干流、支流,再网状河道的次序进行求解。将汇流点各支流的流量作为旁侧流处理,先给出其预估 q_{ie}^p ,根据 q_{ie}^p 和上下游边界条件对干流进行求解,然后求解支流,可求得支流入汇流量的计算值 q_{ie}^c 。按松弛算法的基本原理构造汇流断面处的流量的新的估计值 q_{ie}^n , $q_{ie}^n = \alpha q_{ie}^c + (1 - \alpha) q_{ie}^p$,其中 α 为松弛因子($0 < \alpha \leq 1$)。以每条支流流量新的估计值作为干流的侧向入流,再求解干流,又可得干流各断面新的水位,以交汇点处新的水位作为支流的边界条件再求解各支流,如此循环,直至满足收敛条件:

$$|q_{ie}^c - q_{ie}^p| < \epsilon \quad (3)$$

式中 ϵ 为事先给定的允许误差。

1.3 有关问题的处理

a. 边界条件的处理。韩江三角洲河网区桥、闸较多,将这些桥、闸等水头突变处作为内边界处理,此时圣维南方程组不适用,必须根据桥、闸的过流特征专门给出过流量。对闸的过流量,按照因次分析得到的公式进行计算,即

$$Q_i = mB \sqrt{2gH_0} e^\alpha \Delta H^{1.5-\alpha-\beta} \quad (4)$$

式中: Q_i 为闸的过流量; m 为闸门流量系数; B 为闸净宽; H_0 为堰上水头; e 为闸门开启高度,当 $e > H$ (H 为堰上水深)时,取 $e = H$; ΔH 为闸上下游水位差; α , β 为指数,取 $\alpha = \beta = 0.50$ 。

桥的过流量用式(5)计算:

$$Q_{br} = C \sqrt{2g} A_{br} \left(h_i - h_{i+1} + \frac{v_i^2}{2g} - \Delta h_f \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: Q_{br} 为桥的过流量; C 为流量系数; A_{br} 为桥孔下游端的过水断面面积; h_i 为桥孔上游断面水位高程; h_{i+1} 为桥孔下游断面水位高程; v_i 为断面速度, $v_i = Q_i/A_i$; Δh_f 为通过桥孔的局部水头损失。

外边界条件,即入流、出流边界,给定随时间变化的流量 $Q(t)$ 或水位 $Z(t)$ 过程。

b. 初始条件的设定。对于 Newton-Raphson 方法,迭代初始条件的选取特别重要,如果初始值选择不好,该方法可能不收敛。本文在模型计算中,首先选择计算初始时刻,按恒定流方法推算各断面的水位、流量,然后以该时刻进行非恒定流计算,待计算的全河网水位、流量变化区域稳定时,取其相应各断面的水位、流量作为计算的初始条件。

2 模型的验证

2.1 河网概化

韩江三角洲河网一维水流数学模型计算范围为:上游边界位置取在潮安水文站,下游边界位置取在梅溪船闸、下埔船闸、外砂河桥闸、莲阳桥闸和东里河桥闸这 5 座大型出海桥闸处。计算河网区范围约 1 035 km²,河道总长约 90 km。计算域内共设置断面 203 个,断面间距为 200 ~ 1 000 m。图 1 为韩江三角洲河网示意图。

2.2 韩江三角洲河网水动力数学模型验证

采用 2005 年 5 月 4 日至 5 月 5 日同步实测的水文资料对所建立的韩江三角洲河网水动力数学模型进行验证。河网内布置了 13 个水尺和 9 个测流断面。上游边界条件以流量形式给出,下游边界为水位过程。河网糙率根据实测水位流量资料率定得到,不同的河道采用不同的糙率。各主要河道糙率率定值见表 1。

表 1 韩江三角洲河网主要河道糙率率定值

河道	糙率 n	河道	糙率 n
潮安—古美	0.015 ~ 0.017	新津河	0.032 ~ 0.036
东溪	0.025 ~ 0.040	北溪	0.025 ~ 0.035
西溪	0.015 ~ 0.045	南溪	0.025 ~ 0.030
梅溪	0.029 ~ 0.036	蓬洞河	0.030 ~ 0.033

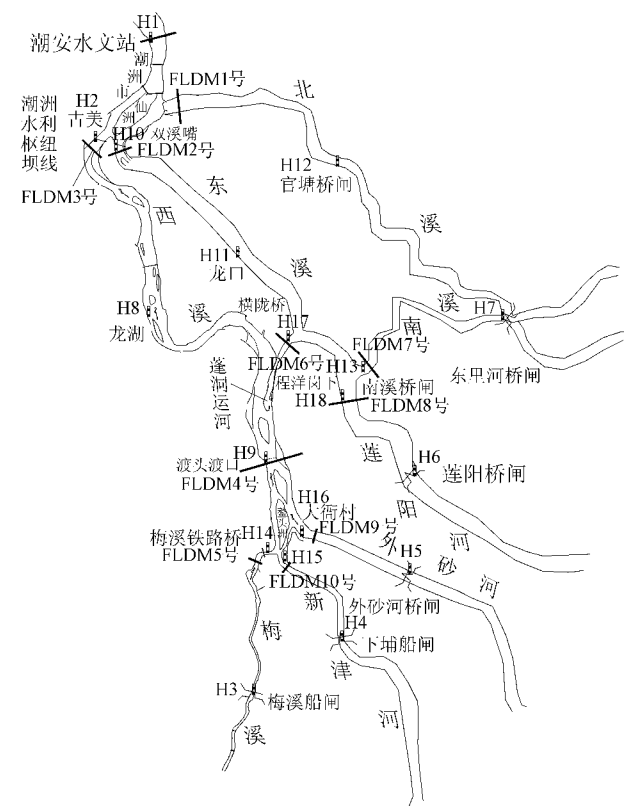


图1 韩江三角洲河网示意图

2.2.1 水位验证

水位验证断面为潮安、古美、龙湖、渡头渡口等13个水位站(H1, H2, H8~H18)。图2为部分水位站的水位过程验证图,由图2可知,各水位站计算水位过程与实测过程吻合较好,计算与实测过程的相位一致,水位偏差基本在5cm以内。

2.2.2 分流比验证

河网于仙洲、蕉洲、鳌头洲等处分汊,将各汊点分流比计算值与实测值进行比较。各汊流河段的分流比计算值与实测值非常接近,偏差均在1%以内(表2)。

表2 三角洲分流比验证			
洲名	河道	分流比/%	
		实测值	计算值
仙洲	东溪	5.00	5.20
	西溪	95.00	94.80
蕉洲	蓬洞河	7.50	7.40
	西溪	92.50	92.60
鳌头洲	外砂河	24.30	24.18
	新津河	37.80	37.89
	梅溪	37.90	37.93

验证结果表明,一维水流数学模型中各概化断面基本反映了河道实际情况,模型参数合理,所建立的河网水流数学模型精度较高,可以用来模拟韩江三角洲河网水流运动情况,可用于计算与分析航道整治工程后水位变化以及三角洲河网的分流比变化情况。

3 航道工程水流计算

运用已验证的河网水动力数学模型对设计的韩江三角洲河网整治工程方案进行模拟计算。韩江三角洲河网航道整治工程由西溪、蓬洞河、东里河3个整治河段组成,整治工程措施主要包括对航槽水深不足1.6m处进行疏浚,疏浚长度达1666m,蓬洞河拓宽及护岸保护,横陇桥、横陇新桥改建,南溪船闸改建^[10]。设计工程方案有2个,见表3,需要进行方案比较。模型模拟计算了工程前后水面线和分流比的变化。

方案	整治工程措施			航道标准
	西溪	蓬洞河	东里河	
方案Ⅰ	疏浚挖槽	拓宽40m, 挖深1.6m	疏浚挖槽	V级
方案Ⅱ	疏浚挖槽	拓宽60m, 挖深2.5m	疏浚挖槽	通航300t级船舶

3.1 韩江三角洲河网整治工程前后分流比变化

工程建设后蓬洞河的分流比有所增大,各种水

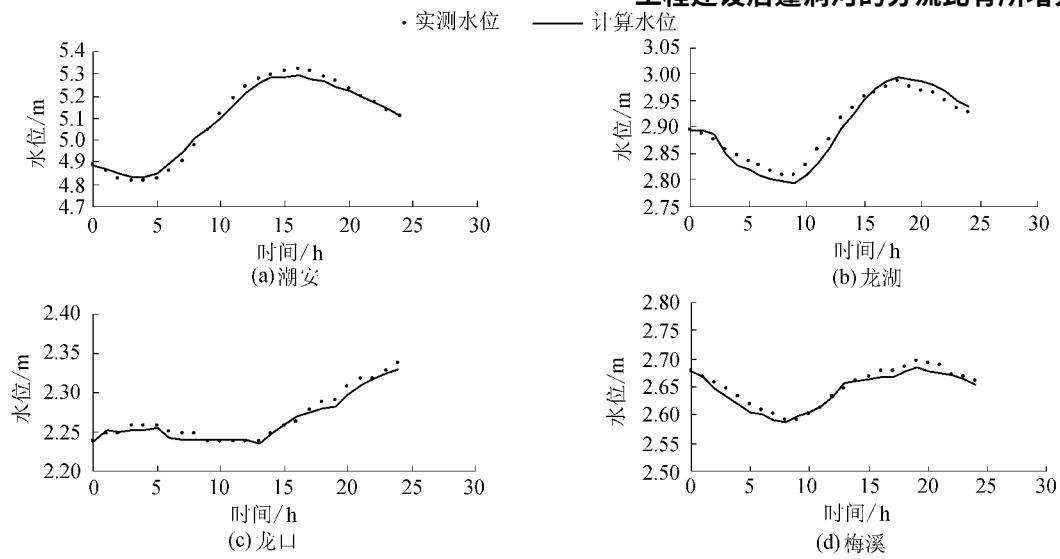


图2 实测水位与计算值比较

表 4 各种水文条件下工程前后蓬洞河分流比

%

方案	设计流量 (225 m³/s)	整治流量 (724 m³/s)	$P = 10\%$ (11 800 m³/s)	$P = 5\%$ (13 400 m³/s)	$P = 2\%$ (16 000 m³/s)	$P = 1\%$ (17 800 m³/s)
工程建设前	12.30	6.27	5.88	5.33	5.07	4.50
方案Ⅰ	14.12	7.05	6.64	5.97	5.64	5.00
方案Ⅱ	16.26	8.62	7.94	7.00	6.54	5.69

文条件下方案Ⅱ的分流比增加均比方案Ⅰ的大,见表4。在设计流量条件下,方案Ⅰ和方案Ⅱ分流比增加值分别为1.82%和3.96%;在整治流量条件下,方案Ⅰ和方案Ⅱ分流比增加值分别为0.78%和2.35%。在洪水条件下,方案Ⅰ和方案Ⅱ分流比增加值最大分别为0.76%和2.06%。

蓬洞河分流比增大主要是由蓬洞河拓宽挖深造成的。在各种水文条件下,两方案在工程建设后东溪、西溪、新津河、外砂河、梅溪的分流比变化均较小,变化的绝对值均小于0.3%。可见整治工程实施后,基本对韩江三角洲河网其他主要汉点的分流比没有影响。

3.2 韩江三角洲河网整治工程前后水面线的变化

用已验证的模型计算工程建设后水面线的变化。计算结果表明,两方案在设计流量和整治流量条件下,各河道水位变化很小,见表5。在4种洪水条件($P = 10\%$, $P = 5\%$, $P = 2\%$, $P = 1\%$)下,工程建设后西溪水位略有下降,东里河水位有所增加,而蓬洞河在进口附近处水位略有下降,河段后部水位增加(图3)。方案Ⅰ蓬洞河和东里河的最大水位壅高分别为4 cm和2 cm,方案Ⅱ蓬洞河和东里河的最大水位壅高分别为7 cm和5 cm,表明工程建设对行洪无明显影响。据分析,水位变化的主要原因是整治工程后,从西溪流入蓬洞河的流量增加,使得西溪下游流量减少,而且整治后的西溪水流更加顺畅,解决了工程建设前航道内堵塞壅水的现象,因此西溪

水位略有下降。蓬洞河在西溪入口处河面较宽,拓宽挖深后过水断面进一步增大,因此引起水位略有下降,远离入口处河宽较窄,从而导致了壅水现象的发生。蓬洞河下游水位增加引起东里河水位增加。

比较两个方案的水位壅高和分流比变化可知,方案Ⅰ的分流比变化和水位壅高都比方案Ⅱ小,因此方案Ⅰ优于方案Ⅱ。

表 5 工程建设前后河道沿程水位变化最大值 m						
方案	设计流量(225 m³/s)			整治流量(724 m³/s)		
	西溪	蓬洞河	东里河	西溪	蓬洞河	东里河
方案Ⅰ	-0.003	0.001	0.001	-0.009	0.002	0.007
方案Ⅱ	-0.001	0.002	0.001	-0.006	0.003	0.003

4 结 语

本文采用 Preissmann 有限差分格式和松弛迭代法建立了韩江三角洲河网水动力数学模型,模型计算中考虑了桥、闸对河网水流的影响。利用实测水文资料对模型进行验证,结果表明计算值和实测值吻合较好。应用该模型计算了航道整治工程后的水位、分流比变化情况,结果显示整治方案切实可行。

参考文献：

[1] 李岳生. 河网不恒定流隐式方程组稀疏矩阵法[J]. 中山大学学报·自然科学版, 1977 (3) :27-37.

[2] NGUYEN Q K, KAWANO H. Simultaneous solution for flood routing in channel networks [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121 (10) :744-750.

[3] 黄惠明, 施春香. 一维河网水流数学模型数值计算方面的探讨[J]. 吉林水利, 2005 (9) :38-41.

[4] 施勇, 胡四一. 感潮河网区水沙运动的数值模拟[J]. 水科学进展, 2001, 12 (4) :431-438.

[5] 诸裕良, 严以新, 贾良文, 等. 一维河网非恒定流及悬沙数学模型的节点控制法[J]. 水动力学研究与进展, 2001, 16 (4) :503-510.

[6] 李毓湘, 逢勇. 珠江三角洲地区河网水动力学模型研究[J]. 水动力学研究与进展, 2001, 16 (2) :143-155.

[7] 李义天. 河网非恒定流隐式方程组的汉点分组解法[J]. 水利学报, 1997 (3) :49-57.

[8] 韩龙喜, 张书农, 金忠青. 复杂河网非恒定流计算模型——单元划分法[J]. 水利学报, 1994 (2) :52-56.

[9] 徐小明, 何建京, 汪德. 求解大型河网非恒定流的非线性方法[J]. 水动力学研究与进展, 2001, 16 (1) :18-24.

[10] 河海大学泥沙实验室. 韩江水道航道整治工程数学模型研究[R]. 南京: 河海大学, 2005.

(收稿日期 2007-09-03 编辑 骆超)

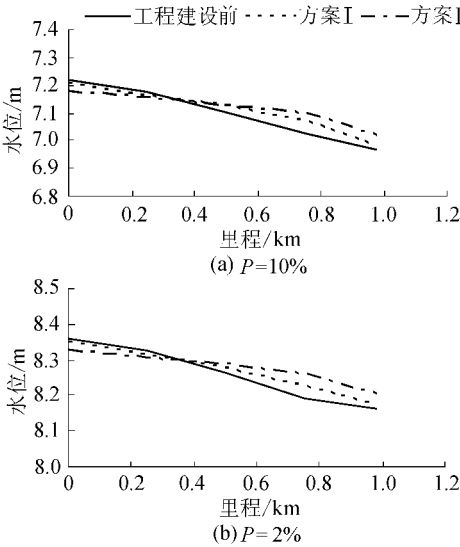


图 3 蓬洞河在工程前后的水位变化