



过水面积的压缩效果 ②局部糙率修正,主要通过加糙来反映桥墩的阻水作用。因此,利用数学模拟的方法来解决桥梁阻水问题是可行的。

## 1 网河数学模型

### 1.1 模型的建立

西、北江三角洲网河的水流流态属于典型的网河明渠非恒定流动,较适合采用圣维南方程组建立数学模型来加以研究:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + B_T \frac{\partial z}{\partial t} = q_1 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial z}{\partial x} - \\ u^2 \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{n^2 |u| Q}{R^{3/4}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Q$ 为流量; $z$ 为水位; $R$ 为水力半径; $u$ 为流速; $q_1$ 为旁侧入流; $n$ 为糙率系数,可用谢才公式计算; $B_T$ 为主河道泻流宽度和仅起调蓄作用的附加宽度之和; $B$ 为过流河宽; $A$ 为过水断面面积; $g$ 为重力加速度; $x, t$ 为空间和时间坐标。

网河节点还应满足下列流量连接条件和动力连接条件<sup>[3]</sup>:

a. 流量连接条件即进出每一节点的流量与该节点内的实际水量的增减率相平衡:

$$\sum_{i=1}^m Q_i = \frac{dw}{dt} \quad (2)$$

式中: $Q$ 为节点过流量; $i$ 表示汇集于同一节点的各种河道断面的编号; $w$ 为节点蓄量。若节点为无蓄量的几何点,则 $w=0$ 。因此

$$\sum_{i=1}^m Q_i = 0 \quad (3)$$

b. 动力连接条件取为

$$z_k = z_{k+1} \quad (k = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (4)$$

式中: $m$ 为节点分支; $z$ 为各分支断面处的水位<sup>[4]</sup>。

方程(1)~(4)即构成一维网河数值计算的数学模型,通过合适的数值计算方法可以离散求解。

### 1.2 数值计算方法

网河数学模型的解法采用三级联解方法(将网河计算分为河段、汉点、微段三级进行计算),这种方法较直接解法所需求解的代数方程的阶数低得多。一般情况下,网河中的汉点数较断面数少得多,分级解法对应的矩阵消元计算次数也大为减少。因此,分级解法较一般的直接解法更为准确和快捷。

对西江、北江三角洲这样的大范围复杂天然网河,河道沿程的非均匀性很强,其断面间距离划分不可能等距,因此,采用稳定性好、计算速度快的隐格式来求解。采用如下四点线性偏心隐式差分格式:

$$\begin{cases} \frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\xi_i^{j+1} + \xi_{i+1}^{j+1} - \xi_i^j - \xi_{i+1}^j}{2\Delta t} \\ \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\theta(\xi_{i+1}^{j+1} - \xi_i^{j+1}) + (1-\theta)(\xi_{i+1}^j - \xi_i^j)}{\Delta x_i} \\ \xi = \frac{\theta}{2}(\xi_i^{j+1} + \xi_{i+1}^{j+1}) + \frac{1-\theta}{2}(\xi_i^j + \xi_{i+1}^j) = \xi_{i+1/2}^{j+\theta} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\xi$ 为变量,可以代表流量、水位、流速、河宽等; $\theta$ 为权重系数; $j$ 为时段序号。将差分格式代入连续方程和动力方程,经整理后得差分方程为

$$z_i - A_2 Q_i + z_{i+1} + A_2 Q_{i+1} = A_5 \quad (6)$$

$$-B_1 z_i + B_2 Q_i + B_3 z_{i+1} + B_4 Q_{i+1} = B_5 \quad (7)$$

其中 $A_2, A_5, B_1, B_2, B_3, B_4$ 及 $B_5$ 为离散系数。

方程(6)和(7)稍作变换,可得河道微段水位、流量的递推关系式:

$$z_{i+1} = A_{1i} z_i + A_{2i} Q_i + A_{3i} \quad (8)$$

$$Q_{i+1} = B_{1i} z_i + B_{2i} Q_i + B_{3i} \quad (9)$$

式中递推系数 $A_{1i}, A_{2i}, A_{3i}, B_{1i}, B_{2i}$ 及 $B_{3i}$ 可由式(6)和式(7)中 $A_2, A_5$ 和 $B_1 \sim B_5$ 求出。

方程(8)和(9)可进一步整理成河道微段任一断面水位、流量和河道首末断面水位、流量的关系式:

$$z_{i+1} = E_{2i+1,1} z_1 + E_{2i+1,2} Q_1 + E_{2i+1,3} \quad (10)$$

$$Q_{i+1} = E_{2i+2,1} z_1 + E_{2i+2,2} Q_1 + E_{2i+2,3} \quad (11)$$

其中 $z_1, Q_1$ 为河道首断面的水位和流量。

设河道末断面号为 $M$ (即 $i=M$ ),则式(10)和式(11)变为

$$z_M = E_{2M+1,1} z_1 + E_{2M+1,2} Q_1 + E_{2M+1,3} \quad (12)$$

$$Q_M = E_{2M+2,1} z_1 + E_{2M+2,2} Q_1 + E_{2M+2,3} \quad (13)$$

式(12)和式(13)经迭代变换后,河道的首末断面的水位,也就是汉点(或节点)的水位,就可以转化成关于流量的表达式:

$$z_M = E'_{N,1} Q_1 + E'_{N,2} Q_M + E'_{N,3} \quad (14)$$

$$z_1 = E'_{N-1,1} Q_1 + E'_{N-1,2} Q_M + E'_{N-1,3} \quad (15)$$

从而实现网河的三级联解降阶的目的。

节点方程组包括边界点方程和节点连接方程,节点连接方程共有 $(2N_r - N_B)$ 个( $N_r$ 为网河河道总数, $N_B$ 为边界个数),边界点方程有 $N_B$ 个,则方程总数为 $2N_r$ 个。网河中各河道首末断面流量总数为 $2N_r$ 个,即方程数和未知数个数相等,可以求解。

节点方程采用高斯消元法求解,网河中所有的边界点方程和节点连接方程经过消元迭代后,最终可化成如下方程组:

$$\begin{cases} Q_1 + h_{12} Q_2 + \dots + h_{1N} Q_N = g_1 \\ Q_2 + h_{23} Q_3 + h_{24} Q_4 + \dots + h_{2N} Q_N = g_2 \\ \dots \\ Q_{N-1} + h_{N-1,N} Q_N = g_{N-1} \\ Q_N = g_N \end{cases} \quad (16)$$

这样得到  $Q_N = g_N$ , 再把  $Q_N$  值代入第  $N-1$  个方程后得

$$Q_{N-1} = g_{N-1} - h_{N-1,N}Q_N \quad (17)$$

如此依次回代, 直到计算出所有的  $Q_i$  为止。然后, 把计算出的  $Q_i$  回代入式(17)和式(10)即可算出所有的  $z_i$ , 至此, 即可完成一个时间步的计算, 得出整个网河各河道各断面上的水位、流量和流速。在时间序列上逐步推进, 即可求得整个计算时段内各时刻、各断面的水力要素值。

在合适的定解条件和计算参数条件下, 给定足够小的水位和流量迭代误差限, 仿此过程亦可求得恒定流条件下整个网河各河道、各断面上的水位、流量和流速值。

### 1.3 模型的率定和验证

整个网河各河段的糙率主要根据 1998 年 6 月的实测水文资料进行率定。对于防洪影响计算, 用“98.6”实测洪水资料进行率定并与 1998 年汛后实测地形匹配。表 1 给出了西、北江三角洲网河计算范围内主要站点的率定和验证结果。

表 1 西、北江三角洲网河主要站点的率定和验证结果

站名	实测值/m	计算值/m	差值/m
马 口	9.43	9.430	0.000
五顶岗闸	9.37	9.370	0.000
金洲水闸	9.02	9.020	0.000
上 泰 和	8.90	8.900	0.000
太平水位	7.78	7.785	0.005
河清水闸	7.19	7.189	-0.001
甘 竹	6.29	6.290	0.000
潮莲水闸	5.05	5.042	-0.008
江 门	4.87	4.889	0.019
石 咀	1.99	1.990	0.000
北街水闸	4.88	4.889	0.009
三 水	9.59	9.590	0.000
紫 洞	7.30	7.294	-0.006
澜 石	5.84	5.843	0.003
五 斗	3.08	3.085	0.005
沙 洛 围	2.38	2.389	0.009
三 多	6.90	6.894	-0.006
海口水闸	6.13	6.120	-0.010
黄马涌水闸	5.12	5.124	0.004
三 沙 口	1.84	1.848	0.008
冲鹤水闸	4.24	4.239	-0.001
安 利 闸	4.13	4.125	-0.005
南 沙	1.74	1.740	0.000
大 虎	1.71	1.710	0.000

潭洲水道洪季各断面的糙率值大致介于 0.029 ~ 0.039 之间, 枯季各断面的糙率值大致介于 0.022 ~ 0.036 之间, 平洲水道洪季各断面的糙率值大致介于 0.030 ~ 0.033 之间, 枯季各断面的糙率值大致介于 0.022 ~ 0.027 之间, 吉利涌洪季各断面的糙率值大致介于 0.029 ~ 0.030 之间, 枯季各断面的糙率值大致介于 0.024 ~ 0.026 之间。数学模型中选取的糙率值反

映的是各河道在设计水文条件下的综合水流阻力。因此, 对于兴建佛山市中心组团规划桥梁群对区间河道断面平均水位、流量和流速的影响而言, 计算结果是有足够的数值精度的, 得到的结果是可信的。

### 1.4 计算中有关问题的处理

桥梁阻水的原因是建于河道过流断面内的桥台、桥墩及其基础减小了桥位断面的过流面积, 桥梁墩台阻挡、阻滞了水流。为表述清晰, 本文提出“面积阻水比”的概念来统一描述单座桥梁的阻水程度。

考虑佛山市已建桥梁的面积阻水比  $R$  大多介于 3% ~ 9% 之间, 为计算出中心组团规划桥梁群不同程度的面积阻水比对区间河道的影响, 本文对规划桥梁群统一设计了 4 种面积阻水比: 3%, 5%, 7%, 9%, 分别表示桥梁阻水程度相对小、较小、一般和较大。规划桥梁群面积阻水比介于 3% ~ 9% 之间时, 可以通过内插推算其阻水影响情况, 得到桥梁不同阻水程度对河道影响的一般规律。

## 2 计算结果和分析

### 2.1 洪水影响计算结果和分析

由上述数值计算的方法和过程, 即可计算出各个设计水文组合以及不同面积阻水比条件下, 整个西江、北江三角洲网河计算范围内各断面工程前、后的水位、流量和流速。比较不同条件下规划桥梁群兴建前、后的计算结果, 即可得出相应规划桥梁群对区间河道和附近相邻河道断面平均水位、流量和流速影响的具体数值。

分析不同频率洪水以及不同面积阻水比计算条件下的计算结果, 兴建规划桥梁群后, 对于整个西江、北江三角洲网河区而言, 水位、流速和流量变化的最大值均出现在规划桥群所在的潭洲水道、平洲水道和吉利涌河道范围内, 相邻河道或距离更远的水道在工程实施后水位、流速和流量的变化值均小于区间河道的相应变化值。

由计算结果可见, 不同频率洪水和规划桥梁群不同面积阻水比条件下水位、流速和流量变化值出现的位置: ①水位壅高最大值一般出现在潭洲水道潭洲 7 断面; ②水位跌落最大值一般出现在平洲水道平洲 24 断面; ③流速增大最大值一般出现在平洲水道平洲 24 断面附近; ④流速减小最大值一般出现在潭洲水道潭洲 43 断面; ⑤流量减小最大值出现在潭洲水道潭洲 53 ~ 71 断面河段。

表 2 统计了兴建规划桥梁群后, 不同频率洪水以及规划桥梁群不同面积阻水比条件下, 潭洲水道、平洲水道和吉利涌区间河道范围内所有断面水位、流速和流量变化的最大值。

表 2 中心组团区间河道不同工况下水位、流速和流量变化最大值

面积阻水 比 R/%	水位壅高最大值/m				水位跌落最大值/m				流速增大最大值/(m·s <sup>-1</sup> )				流速减小最大值/(m·s <sup>-1</sup> )				流量减小最大值/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )			
	P=1%	P=2%	P=5%	P=50%	P=1%	P=2%	P=5%	P=50%	P=1%	P=2%	P=5%	P=50%	P=1%	P=2%	P=5%	P=50%	P=1%	P=2%	P=5%	P=50%
3	0.035	0.035	0.033	0.023	-0.026	-0.025	-0.023	-0.013	0.052	0.050	0.048	0.037	-0.060	-0.061	-0.057	-0.045	-56.867	-54.210	-49.438	-28.409
5	0.039	0.039	0.037	0.026	-0.035	-0.033	-0.031	-0.018	0.089	0.086	0.082	0.062	-0.066	-0.067	-0.062	-0.049	-64.148	-61.170	-55.870	-32.187
7	0.044	0.044	0.041	0.029	-0.046	-0.043	-0.040	-0.023	0.131	0.125	0.120	0.088	-0.074	-0.075	-0.070	-0.055	-72.406	-68.958	-63.097	-36.437
9	0.049	0.048	0.045	0.032	-0.060	-0.056	-0.052	-0.03	0.192	0.184	0.176	0.126	-0.081	-0.082	-0.076	-0.060	-80.066	-76.158	-69.732	-40.371

注:表中变化值皆为工程后减工程前,正数表示工程后增加,负数表示减小(下同)。

表 3 佛山市内水道不同工况下流量变化统计

断面名称	潮 别	工程前 流量/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	工程后流量/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>				工程后流量变化率/%			
			R=3%	R=5%	R=7%	R=9%	R=3%	R=5%	R=7%	R=9%
紫 洞	涨潮量	1203.6	1198.0	1194.5	1191.4	1188.9	-0.47	-0.76	-1.01	-1.22
	落潮量	1040.3	1036.2	1033.7	1031.5	1029.7	-0.39	-0.63	-0.85	-1.02
澜 石	涨潮量	1746.4	1740.9	1737.6	1734.7	1732.3	-0.31	-0.51	-0.67	-0.81
	落潮量	1622.7	1618.1	1615.2	1612.9	1610.7	-0.29	-0.46	-0.61	-0.74
弼 教	涨潮量	3027.1	3018.1	3014.1	3010.6	3008.0	-0.30	-0.43	-0.54	-0.63
	落潮量	2770.7	2762.9	2759.3	2756.3	2754.1	-0.28	-0.41	-0.52	-0.60
五 斗	涨潮量	2732.8	2725.1	2721.1	2717.6	2715.0	-0.28	-0.43	-0.56	-0.65
	落潮量	2519.0	2512.3	2508.6	2505.6	2503.3	-0.27	-0.41	-0.53	-0.62
吉 利	涨潮量	608.0	606.1	605.6	605.1	605.1	-0.31	-0.40	-0.47	-0.47
	落潮量	578.4	576.5	575.9	575.4	575.4	-0.32	-0.43	-0.52	-0.52

分析各条件下洪水影响计算的结果可见,洪季表现出区间河道过流量及分流比减小,桥位上游水位壅高并上溯,桥位所在河段流速增大、水位跌落,桥梁阻水向上游叠加,相邻河道过流量增大。上游来流量越大,区间河道及相邻河道的水位、流速和流量的变化值越大,阻水现象越明显。

### 2.2 枯水影响计算结果和分析

枯水水文组合条件下,网河上游马口、三水取30d最枯径流量保证率为97%时的流量进行计算。通过比较不同面积阻水比条件下,兴建规划桥梁群前、后典型断面水位、流量的变化情况,分析规划桥梁群对取水、水环境可能产生的影响。

表3统计了5个区间河道典型断面在枯水大潮条件下,兴建规划桥梁群前、后断面的涨、落潮水量及其变化值,以及涨、落潮水量的变化率。

分析区间河道5个典型断面在枯水大潮条件下,兴建规划桥梁群前、后过流量和水位的变化情况可见,规划桥梁群的面积阻水比不同时,各断面涨、落潮量的变化值也不同。即规划桥梁群的面积阻水比越大时,对区间河道和相邻河道涨、落潮量的影响越大,枯水大潮条件下,即使规划桥梁群面积阻水比较大,水位和流速的变化值也很小。因此可以认为,规划桥梁群兴建后,应不会对河道取水和冲污流量造成较严重程度的不利影响。

### 3 结论和建议

一维网河数学模型建立在较为成熟的数值计算方法、较新的地形测量和水文测验资料的基础上,并对模型进行了充分的率定和验证。计算结果表明,

兴建佛山市中心组团规划桥梁群后,潭洲水道、平洲水道和吉利涌等区间河道和顺德水道等相邻河道确实会形成桥梁阻水现象和桥梁群阻水的叠加效应,在一定程度上改变区间河道和相邻河道洪季和枯季的水位、流速、流量和过流水量,影响这些河道的行洪、取水和水环境现状。但这种影响的程度基本上还是可以接受的。各种设计组合工况下的计算结果也表明,总体而言,当规划桥梁群的阻水程度一般或更小时,应不会对区间河道和相邻河道的行洪、取水和冲污流量造成较严重程度的不利影响。

减小新建桥梁阻水影响的主要措施在于桥梁设计阶段应充分考虑桥台和桥墩的设计方案。在保证桥梁安全和满足通航等要求的情况下,应能够顺畅宣泄包括设计洪水在内的各级洪水的水流和泥沙,建桥后引起的桥前壅水、网河分流比变化和河床变形,在洪水期不应增大附近河段的防洪压力,不能危及两岸堤防安全,枯水期不应影响河道取水和冲污。设计中应尽量采用大跨度桥型,减少行洪断面中的桥墩数目,改善墩头形状,合理设计,减少不必要的工程浪费。

#### 参考文献:

- [1]张细兵,余新明,金琨.桥墩壅水对河道水位流场影响二维数值模拟[J].人民长江,2003(4):103-109.
- [2]张红武,马继业.河流桥渡设计[M].北京:中国建材工业出版社,2002:17-22.
- [3]黄金池.黄河下游河床演变平面二维数学模型[D].北京:中国水利水电科学研究院,2001.
- [4]谢鉴衡.河流模拟[M].北京:水利电力出版社,2003:6-14.

(收稿日期:2005-08-24 编辑:熊水斌)