

# 长江下游江心洲河段航道整治工程防洪评价

赵建锋,李国斌,尚倩倩

(南京水利科学研究院 河流海岸研究所,江苏 南京 210029)

**摘要:**通过建立平面二维水流数学模型,对长江下游江心洲河段航道整治工程建设前后河道水流运动变化进行了模拟计算。结果表明:工程建设前后,工程所在河段水位变化较小,工程附近河段水流流态及水流流速分布无明显变化,对长江行洪的影响较小。研究建立的二维水流数学模型可正确模拟工程河段水流运动特性,能在防洪影响评价中为工程前后河道水流、水位变化提供较为可靠的依据。

**关键词:**防洪评价;江心洲河段;数学模型;水位;流速

中图分类号:TV85 文献标志码:A

## 1 研究背景

防洪影响分析是河道内非防洪工程建设的一项重要技术问题。研究此类问题的技术手段主要有河工模型、数学模型和经验计算等方法。由于河工模型投资大、周期长等原因,其适用性受到一定限制。数学模型可精细地模拟河道内水流泥沙的运动规律,且具有投资少、周期短的特点,目前在此类问题研究中应用较为广泛<sup>[1]</sup>。

本文采用平面二维水流数学模型,对长江下游江心洲河段航道工程建设前后的河道水流流速、水位、流态的变化情况进行了模拟计算,并由此分析工程建设前后对长江行洪的影响,为该河段工程治理提供技术支持。

## 2 工程河段基本情况

### 2.1 河段概况

江心洲至乌江河段上起东、西梁山,下至下三山,全长约56 km,占马鞍山河段的全部及南京河段的部分。河段平面形态两头窄、中间宽,呈藕节状,江中自上而下有彭兴洲、江心洲、何家洲、小黄洲、新生洲、新济洲等,是典型复合分汊型河段。江心洲河段上起东、西梁山,下至人头矶,河段全长约24 km,为江心洲至

乌江河段的3个河段之一。江心洲河段平面形态两头窄、中间宽,呈顺直分汊状。江心洲左汊为主汊(即江心洲水道),外形顺直(除小黄洲头过渡段外)。左汊主航道从东梁山以下沿彭兴洲顺直而下,至江心洲过河标逐渐过渡至左岸的东埂,然后沿左岸至小黄洲洲头,经小黄洲头从何家洲与小黄洲间下泄过渡到小黄洲右汊,进入马鞍山水道。过渡段长约3 km,从左至右急剧转折,形成上下两个接近90°的急弯。

### 2.2 工程概况

为了进一步稳定江心洲水道航道条件,在现有较好的河势和优良的航道条件下,有关部门拟对江心洲水道实施航道整治工程(见图1),工程主要由4个部分组成。

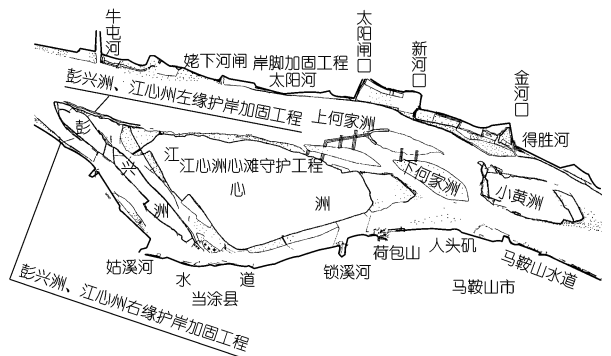


图1 江心洲水道航道整治工程布置

(1) 江心洲心滩工程。该工程由 4 项组成:① 在心滩滩头布置护滩带工程(即由 3 条护滩带组成,护滩带为混凝土块 D 型软体排加排上抛石组成,头部边缘抛防冲石防冲);② 江心洲心滩头部守护工程;③ 上何家洲与江心洲之间窄沟护底带(护底带由混凝土块 D 型软体排加排上抛石组成,排上中部加抛潜锁坝,坝顶宽 5 m,顶部高程 0 m(56 黄海高程));④ 江心洲心滩与下何家洲间布置 2 条护底带。

(2) 江心洲心滩工程区对开左岸加固工程。抛石加固长度约 4 000 m。

(3) 彭兴洲、江心洲左缘护岸加固工程。加固长度约 4 427 km,宽约 100 m。

(4) 彭兴洲洲头右缘护岸工程。守护岸线长度约 1 270 m,采用平顺护岸方式。

### 3 模型建立与相关问题处理

#### 3.1 基本控制方程

正交曲线坐标系下,沿水深平均的平面二维水流运动方程组可表达为<sup>[2]</sup>

连续方程:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial(C_\eta Hu)}{\partial \xi} + \frac{\partial(C_\xi Hv)}{\partial \eta} \right] = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(Hu)}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi}(C_\eta H u u) + \frac{\partial}{\partial \eta}(C_\xi H v u) + \right. \\ & H v u \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - H v^2 \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \left. \right] = - \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} - \frac{g H}{C_\xi} \frac{\partial Z}{\partial \xi} + \\ & \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi}(C_\eta H \sigma_{\xi\xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta}(C_\xi H \sigma_{\eta\xi}) + \right. \\ & \left. H \sigma_{\xi\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - H \sigma_{\eta\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right] \quad (2) \\ & \frac{\partial(Hv)}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi}(C_\eta H u v) + \frac{\partial}{\partial \eta}(C_\xi H v v) + \right. \\ & H u v \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - H u^2 \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \left. \right] = - \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} - \frac{g H}{C_\eta} \frac{\partial Z}{\partial \eta} + \\ & \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi}(C_\eta H \sigma_{\xi\eta}) + \frac{\partial}{\partial \eta}(C_\xi H \sigma_{\eta\eta}) + \right. \\ & \left. H \sigma_{\eta\xi} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - H \sigma_{\xi\xi} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

式中,  $u$ 、 $v$  分别为  $\xi$ 、 $\eta$  方向流速分量;  $Z$  为水位;  $C$  为谢才系数;  $v_i$  为紊动粘性系数,  $v_i = C_u \frac{k^2}{\varepsilon}$ ,  $k$  为紊动动能;  $\xi$  为紊动动能耗散率,可应用  $k - \varepsilon$  紊流模型计算确定; 一般情况下,  $v_i = K u_* H$ ,  $H$  为水深;  $K = 0.5 \sim 1.0$ ,  $u_*$  为摩阻流速,或者取  $v_i$  为某一常数。

#### 3.2 基本方程的离散及求解

为便于应用同一种数值离散公式进行数值求解,可将水流运动方程组(1)~(3)写成统一的偏微分方程。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_\xi C_\eta H \Phi}{\partial t} + \frac{\partial(C_\eta H u \Phi)}{\partial \xi} + \frac{\partial(C_\xi H v \Phi)}{\partial \eta} = \\ & \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{C_\eta}{C_\xi} \Gamma H \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{C_\xi}{C_\eta} \Gamma H \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) + S \quad (4) \end{aligned}$$

式中,  $\Phi$  为通用变量;  $\Gamma$  为扩散系数;  $S$  为源项。在数值计算中,只需对式(4)编制一个通用程序,所有控制方程均可以用此程序求解。

微分方程的数值离散采用有限体积法,同时,为避免产生锯齿状流速场和压力场,流速分量  $u$ 、 $v$  在交错网格系统的各自控制体中求解,而水位  $Z$  在主控制体内求解。求解采用 Pantankar 压力校正法原理<sup>[3-4]</sup>。

#### 3.3 初始条件、边界条件及动边界技术

计算初始流速为零,初始水位可由推求一维水面线给出一个固定值。计算进口给出流量与出口给出水位,岸边界的法向流速为零,切向流速满足其法向导数为零的条件,为便于计算中自动判别水岸边界,采用干湿判断技巧。当网格水深小于某一定数时,认为此网格露出水面,可令动量方程的源项为一大数,同时为使计算进行下去,在露出单元水深点给定微小水深(0.05 m),当网格水深大于某一定数时,则认为此网格将淹没在水中,并纳入正常的运算。

#### 3.4 计算参数的选取

二维水流数学模型计算参数包括糙率系数、紊动粘性系数、计算时间步长等,糙率系数综合反映了天然河流计算河段的阻力。验证计算成果表明,该河段的糙率系数为 0.017 6~0.027 5 之间。水流紊动粘性系数根据零方程紊流模型确定,  $v_i = k u_* H$ , 其中  $u_*$  为摩阻流速,  $H$  为水深,  $k$  为常数,取 1.0。本文采用全隐式计算,用非恒定流多个时间步逼近模拟恒定流的方法,计算时间步长取 5 s。

### 4 数学模型验证及工程方案计算

#### 4.1 计算河段及网格划分

根据研究内容和任务要求,同时为了较好地满足水流运动相似,数学模型计算范围上迄芜湖长江大桥上 4 km 处,下至南京长江三桥以下 0.6 km 处,模拟河段全长约 80 km,包括裕溪口水道、西华水道、江心洲水道、太平府水道、马鞍山水道、乌江水道和凡家矶水道。基于 2012 年 2 月实测的河床地形构建数学模型,分别进行验证计算和工程方案计算。平面二维数模采

用河势贴体正交曲线网格形式,利用不等距网格,纵向(水流方向)网格间距约10~80 m,横向(垂直水流方向)网格间距为3~20 m,纵向布置945条网格线,横向布置121条网格线,网格线基本保持正交,并在工程区域将计算网格适当加密,使网格能够反映工程后地形变化。

## 4.2 模型验证

分别采用2012年2月12~13日枯水期及5月5~6日中水期2次水文测验资料进行验证计算,测量时段平均河道流量分别为15 900 m<sup>3</sup>/s和35 320 m<sup>3</sup>/s。计算时上游进口边界由实测流量控制,下游出口边界由实测水位控制。验证成果表明,水位、流速计算值与实测值基本一致,水位误差大部分在5 cm以内,流速误差在0.15 m/s之内,符合《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》(JTJ232-98)的要求。

## 4.3 方案计算

### 4.3.1 工程概化

江心洲水道航道整治工程主要采用的是透水框架护底带和护滩带、甬沟锁坝等工程措施,为了使数学模型能够反映工程对河道水流的影响,一方面在网格划分时尽可能反映工程局部情况;另一方面则采用概化的处理方法来反映工程对河道的影响。工程概化的原则是使计算偏于安全,主要有局部地形修改法和局部糙率修正法<sup>[1]</sup>。

(1) 地形修正。当建筑物尺寸大于或与网格尺寸相当时,可直接根据建筑物高度来修改相应网格节点的河底高程。当建筑物尺寸相对网格尺寸较小时,假定整治建筑物的阻水面积与河底高程增加值所产生的阻水面积相等,根据换算得到的河底高程增加值来修正工程局部附近网格节点的河底高程。

(2) 局部糙率修正。增大工程附近的二维计算网格节点糙率,以反映整治工程建设后,对河道的阻水影响。航道整治工程中使用了四面透水框架,目的是减流促淤。尺寸远小于计算尺寸,采用局部糙率修正对工程的阻力进行概化。具体处理方法如下。

将四面体透水框架看作是拦污栅形势的阻水建筑物,四面体透水框架的阻水效果主要是通过增加其所在网格点的局部阻力来实现,局部阻力系数通过式(5)计算<sup>[5]</sup>:

$$\xi = \beta(t/b)^{4/3} \sin\theta \quad (5)$$

式中, $\beta$ 为断面形状系数; $t$ 为阻水面积; $b$ 为过水面积; $\theta$ 为四面体杆件与河床的倾角。在实际计算中,将局部阻力系数转化为糙率的形式, $n_{四面体} = h^{1/6} \sqrt{\xi/8g}$ ,以便使用。工程后四面体所在网格节点的综合系数可通

过 $n_{工程后} = \sqrt{n_{工程前}^2 + n_{四面体}^2}$ 计算,得到四面体透水框架所在河道糙率在0.030~0.040之间。以往工程实践表明,以上的概化能较好地反映四面体透水框架对河道水位、流场的影响。

### 4.3.2 计算条件

鉴于该计算河段出口上游199.3 km有大通水位站,下游16.7 km有南京下关水位站,其间无大的支流入流,均可用大通流量作为入流量。且此两站多年内均有较为稳定的水位流量关系。为此,对多年平均洪峰流量由距离内插得到数学模型出口水位,对于防洪设计流量,根据长江防洪要求,马鞍山防洪设计水位为10.024 m,下关为8.663 m,插值得到数模出口水位为9.134 m。

### 4.3.3 计算成果分析

图2给出了在设计洪水92 600 m<sup>3</sup>/s时,航道整治工程实施前后工程区流速和水位等值线变化图(图中正值表明流速或水位增加,负值表示流速或水位降低)。

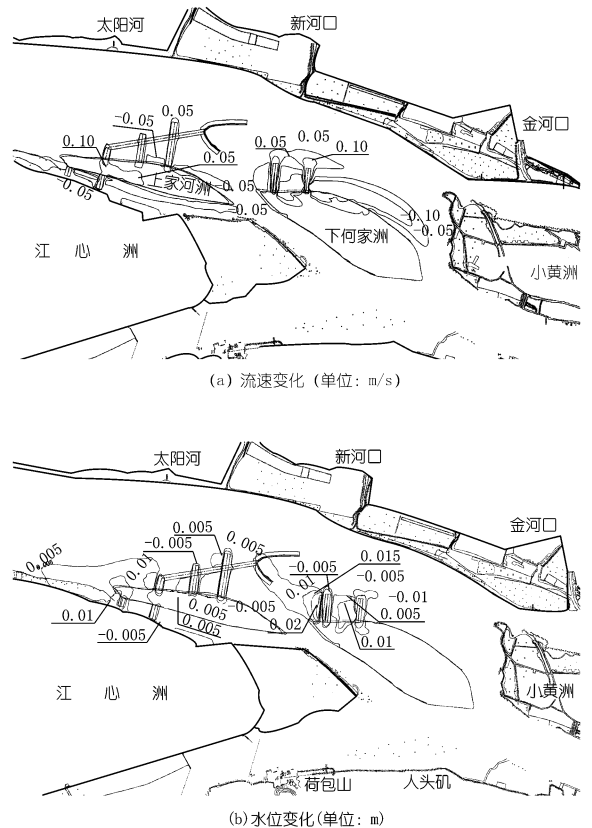


图2 工程前后河道流速、水位变化等值线

由图2可以看出:

(1) 心滩工程左侧河道流速增大,太阳河至金河口左岸近岸流速增幅为0.01~0.02 m/s。右岸受工

(3) 河道上的入河排污口实施监督管理,查处未按程序新建、改建、扩建的入河排污口。

(4) 加强对重点水功能区的水质和水量监测,每年向环保部门通报相关入河排污口设置的意见书。

(5) 严格限制污水管网到达地区设置单独的入河排污口;污水管网未到达地区,要根据水功能区纳污能力,确定污染物排放总量,严格实施总量控制。

(6) 加大对已有入河排污口的整治,逐步对饮用水水源保护区、重要水生态敏感区域等范围内的已设入河排污口进行清理。

### 4.3 加快水功能区纳污能力核定的进程

水功能区纳污能力的核定对科学合理地使用水资源是十分重要的。应该加强水功能区管理技术层面基础工作的系统研究,推进全市地表水纳污能力核定的进程,实行河流纳污总量控制,核定水功能区纳污能力,提出各流域水系、行政区域相应水功能区的限制排污总量意见。根据排污总量控制意见,细化分解排污企业的排污口污染物允许排放量,并加强检测和考核。加强水功能区限制排污总量和水功能区最小流量(水位)的监督管理,强化企业退水水质管理和监督检查制度,确保水功能区水质目标的顺利实现。

### 4.4 将水功能区管理贯穿于其他相关管理中

水利部门应该把取水许可、工程防洪评价、排污口审批、河道占用管理等工作与水功能区管理有机地结合起来,以便提高水功能区管理效率与效果。在取水许可中,限制不合理取水,控制不符合功能区要求的用水行为;在工程防洪评价的审核中,要注意工程对防洪影响的同时,注意工程对水功能区的影响;在排污口的审批中,要严格把握好排污口位置、排污量、排污物质的审查,加强排污口审批的后续管理;在河道占用管理中,要合理把握占用行为是否会改变河道断面,防止占用行为对水功能区带来不利影响。

### 4.5 建立联合治污机制

在我国现行的行政管理体制下,要实现水功能区的有效管理,仅靠水利部门很难完成。建立水行政主管部门和其他有关部门参加的联合管理、治污机制,是保证实现水功能区管理目标的必要条件。应实施污染物总量综合控制,即以水体为保护目标,以水体纳污能力为基础,以污染源为控制对象,实施入河污染物总量控制和排放总量控制相结合的总量控制制度。

(编辑:常汉生)

(上接第75页)

程作用,江心洲中下部左缘流速减小,减幅为 0.01 ~ 0.04 m/s。太阳河上游段流速基本不变。护滩带与上何家洲护底带之间流速增幅为 0.01 ~ 0.08 m/s。总体而言,工程的实施对河道近岸流速影响较小,增幅在 0.10 m/s 以内。

(2) 江心洲水道左岸和县江堤水位略有上升,最大值为 0.004 m;江心洲水道右岸彭家洲洲堤、江心洲洲堤水位略有上升,最大值为 0.005 m。上何家洲窄沟护底带上游及护底带之间江心洲洲堤水位有所上升,最大值为 0.011 m,护底带下游江心洲洲堤水位略有降低,最大下降 0.003 m。下何家洲与心滩间窄沟护底带上游及护底带之间的下何家洲洲堤水位上升最大值为 0.015 m。总体而言,工程实施对堤防两岸的水位影响很小(0.015 m 以内),对长江行洪的影响也很小,不会降低大堤的防洪标准。

(3) 该工程以守护心滩、稳定洲滩为主,基本不改变洪水时主流方向,且对河段各分汊道分流比影响均在 0.16% 以内。因而航道整治工程不会改变江 - 乌河段原有的河势,对下游河道影响也很小。

## 5 结论

本文采用河道平面二维水流数学模型对江心洲水道航道整治工程前后水流运动进行了数值模拟计算。数学模型验证表明:流速、分流比等的计算值与实测值较为一致,模型能较好地反映了江 - 乌河段的水流运动规律,因此将该模型用于计算分析该水道是可行的。从计算结果来看,江心洲河段航道整治工程方案的实施对洪水位和流速场影响较小,对下游河道影响甚微,对防洪大堤安全影响亦很小。研究建立的二维水流数学模型可以准确模拟工程河段水流运动,能为防洪评价提供较为可靠的依据,具有实用价值。

### 参考文献:

- [1] 张为,何俊,袁晶. 二维水流数学模型在马家咀航道整治工程防洪评价中的应用[J]. 中国水运,2010,(12).
- [2] 于日曼. 正交曲线坐标系下复杂边界二维水流数值模拟研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- [3] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [4] Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow[M]. Washington, D. C.: Hemisphere Pub. Co., 1980.
- [5] 徐正凡. 水力学[M]. 北京:高等教育出版社,1993.

(编辑:李慧)