

文章编号: 1000-0887(2004) 02-0141-09

# 鱼咀及丁坝对长江口航道 分流分沙的影响\*

周济福, 李家春

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

(本刊编委李家春来稿)

**摘要:** 利用水平二维水流、盐度、泥沙数学模型研究了长江口航道整治工程(一期)实施前后, 航道的分水分沙特点, 重点讨论了束水丁坝的长度、潜堤的方向对航道分流比、分沙比的影响。数值模拟结果表明, 双导堤工程减少了航道的分沙量, 这有利于维护航道的畅通, 但同时也使航道的分流比减小。航道分流分沙比的改变可通过调整各水工建筑物的布置或尺寸来实现。与束水丁坝长度的影响相比, 鱼咀工程潜堤方向的改变对航道分流分沙比的影响更大。

**关键词:** 长江口; 航道; 整治工程; 分水分沙; 数学模型

**中图分类号:** U653.1; TV888.2 **文献标识码:** A

## 引 言

因河口拦门沙的存在, 自然条件下的长江口航道水深不足 7 m, 严重影响着上海港的发展及其在国际航运中的地位。目前已动工兴建的长江口深水航道整治工程, 对于上海乃至整个长江流域的经济发展具有十分重要的意义。该工程的主要作用是利用双导堤截堵南北串沟, 稳定河势、增加归槽水, 并防止滩槽泥沙交换; 同时, 在导堤内布设丁坝, 以调整水流、束水攻沙、加深航道; 在南北槽分流口处, 布置分流鱼咀工程, 以防止过多的水量进入南槽, 导流入北槽; 此外分流口处还设潜堤, 以拦截底沙向北槽输移<sup>[1]</sup>。然而, 整治建筑物必然会影响到航道附近的流场; 丁坝在束水攻沙的同时, 也增加了对水流的阻力, 减小航道的过流能力, 丁坝的长度及与导堤的夹角等对航道水势、泥沙冲淤的影响, 是值得探讨的; 分流口潜堤的方向对南北槽分水分沙的效果如何, 也是工程部门十分关心的问题。

本文采用水流、盐度、泥沙运动的水平二维数学模型<sup>[2]</sup>, 详细考虑盐度的对流扩散输运过程对泥沙絮凝沉降的影响, 在此基础上研究航道整治一期工程前后航道的分流分沙情况, 通过改变丁坝的长度以及分流口潜堤的方向, 讨论了丁坝和潜堤对航道分流、分沙比的影响, 以期对长江口深水航道整治二、三期工程的设计和工程布置提供科学的参考依据。

\* 收稿日期: 2002\_11\_12; 修订日期: 2003\_10\_08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10002023); 国家自然科学基金重点基金资助项目(10332050); 水资源与水电工程科学重点实验室开放研究基金资助项目(2003B003)

作者简介: 周济福(1965—), 男, 湖北人, 副研究员, 博士(E-mail: zhoujf@imech.ac.cn);

李家春(联系人), Tel: 86\_10\_62554125; Fax: 86\_10\_62561284; E-mail: jdi@imech.ac.cn

# 1 长江口及航道整治工程(一期)概况

据大通站多年观测资料分析,长江年平均径流总量达 9 250 亿  $m^3$ 。每年 5 月至 10 月为洪季,11 月至次年 4 月为枯季。洪季 6 个月内的径流量占全年总径流量的 71% 左右。长江口属中等强度的潮汐河口,口外为正规半日潮,口内为非正规浅海半日潮。平均潮周期为 12 h 25 min。据中浚站多年统计,最大潮差 4.62 m,最小潮差 0.17 m,平均潮差 2.66 m,河口平均进潮量达 263 000  $m^3/s$ ,是年平均径流量的 9 倍<sup>[3]</sup>。

长江口河段悬移质泥沙中值粒径略小于 0.01 mm,属细颗粒泥沙范畴,床沙质中值粒径 0.1 mm 左右。年平均输沙总量达 4.86 亿 t,主要集中于每年的洪季。据大通站资料统计,洪季输沙量约占全年的 87.2%,枯季仅占 12.8%。长江口含沙量主要受径流洪枯季变化和潮流动力强弱控制。一般说来,洪季和大潮时大,枯季和小潮时小。据统计,洪季平均含沙量为 1.01  $kg/m^3$ ,枯季平均含沙量为 0.10  $kg/m^3$ 。

长江口自北向南有北支、北港、北槽和南槽 4 条入海通道,近年来主航道为南港北槽。尽管长期以来一直采用人工疏浚维持,但由于自然条件下形成的拦门沙的存在,长江口航道最小水深仍不足 7.0 m,远不能满足现代航运的要求。此外,年复一年的人工疏浚不仅耗时费力,而且不能从根本上改善航运条件。为了避免重复性的劳动,航运部门提出实施双导堤工程对长江口航道进行整治,工程拟分三期完成,一期工程已竣工。一期工程整治建筑物包括(图 1):

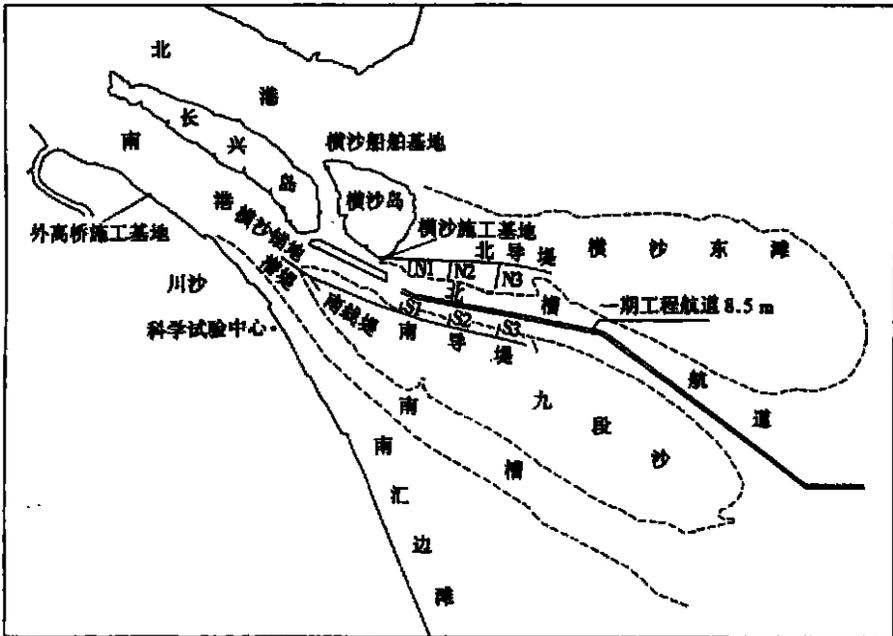


图 1 一期工程南北导堤、丁坝布置图

分流口鱼咀工程: 位于九段沙头部江亚南沙心滩顶部浅水地区,是总体治理工程中的一项关键工程,其主要作用是控制落潮流进入南北槽的分流比,阻止过多的水量进入南槽,导流入北槽,以加强北槽内的水流动力。鱼咀堤顶高程+ 2.0 m(吴淞零点,下同)。

潜堤工程: 潜堤是分流口工程的组成部分,主要功能是稳定北侧的深泓线,阻挡其南靠,

从而稳定进口航道的河势,拦截底沙向北槽输移以及辅助鱼咀工程进一步稳定分流比。潜堤的堤顶高程由堤根处的+ 2.0 m 过渡到堤头处- 2.0 m。

双导堤(坝)工程:南北导堤分别布置在北槽两边的横沙东滩、江亚南沙和九段沙滩面上,截堵串沟、稳定河势、增加归槽水、防止滩槽泥沙交换。双导堤内设若干丁坝,以调整水流、束水攻沙、冲深航槽。双导堤顶高程+ 2.0 m,丁坝顶高程由堤根处的 1.5 m 过渡到堤头处 0.0 m 左右。

## 2 数学模型

### 2.1 基本控制方程

水流运动采用 N-S 方程沿深度积分平均后的浅水方程

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = fv - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho H} \tau_{bx} + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{xx}) + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{xy}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -fu - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho H} \tau_{by} + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{yx}) + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{yy}), \quad (3)$$

其中:  $\zeta$  为水面高程,  $H$  为水深,  $u$ 、 $v$  为东西和南北向流速,  $g$  为重力加速度,  $\rho$  为水的密度,  $f = 2\Omega \sin \varphi$  为柯氏力系数,  $\Omega$  为地球自转角速度,  $\varphi$  为所在地地理纬度。  $\tau_{bx}$  和  $\tau_{by}$  分别为底部切应力  $\tau_b$  的  $x$ 、 $y$  分量,  $\tau_{bx} = \rho g u \sqrt{u^2 + v^2} / C^2$ ,  $\tau_{by} = \rho g v \sqrt{u^2 + v^2} / C^2$ ,  $C = (1/n)H^{1/6}$  为 Chezy 系数,  $n$  为糙率。

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\rho v_t \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{yy} = 2\rho v_t \frac{\partial v}{\partial y}, \\ \tau_{xy} &= \rho v_t \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \tau_{yx} = \rho v_t \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

为水平切应力,  $v_t$  为湍流粘性系数。

长江口泥沙颗粒很细,悬移质中径约为 0.01 mm,属粉沙质细颗粒泥沙,在盐水环境中极易絮凝形成絮团。整治工程位于长江口盐淡水的混合区,水体的盐度随着径流和潮流的强弱不断变化。为了准确描述该地区的泥沙沉降运动,必须考虑盐度的对流扩散输运过程,其控制方程为:

$$\frac{\partial(Hs)}{\partial t} + \frac{\partial(Hus)}{\partial x} + \frac{\partial(Hvs)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( HD_{sx} \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( HD_{sy} \frac{\partial s}{\partial y} \right), \quad (4)$$

其中:  $s$  为含盐度,  $D_{sx}$ 、 $D_{sy}$  为盐度水平扩散系数。

悬移质泥沙运动由方程

$$\frac{\partial(Hc)}{\partial t} + \frac{\partial(Huc)}{\partial x} + \frac{\partial(Hvc)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( HD_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( HD_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + S \quad (5)$$

所控制。其中,  $c$  为悬沙浓度,  $D_x$ 、 $D_y$  为泥沙水平扩散系数,  $S$  为源项,与悬沙、底沙的交换机理密切相关,可用泥沙的上扬通量和沉降通量之差来表达,即

$$S = E_n \rho_s - \omega C_b, \quad (6)$$

这里,  $\rho_s$  为泥沙密度,  $\omega$  为悬沙的絮凝沉速,本模型中采用文献[4]的结果,计入盐度和含沙量对沉速的影响。  $E_n$  为上扬通量函数,表示单位时间内从单位面积床面上扬的泥沙体积通量,这里采用曹志先基于湍流猝发的上扬通量表达式<sup>[5]</sup>,

$$E_n = PC_{0b} \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho_g}} d \left( \frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right) \frac{\tau}{\rho_s - \rho} \quad (7)$$

式中,  $C_{0b}$  为床面泥沙的体积含沙量,  $P$  为一与湍流猝发平均面积比和平均周期有关的参量, 取值范围 370 ~ 480,  $d$  为床面泥沙的中值粒径,  $\tau$  为沙粒切应力, 可由阻力的水力半径分割法确定.  $\tau_c$  为泥沙的临界起动切应力, 可用下式计算<sup>[6]</sup>:

$$\tau_c = \frac{1}{77.5} \left[ 3.2(\rho_s - \rho)gd + \left( \frac{y_b}{y_{b0}} \right)^{10} \frac{k}{d} \right], \quad (8)$$

式中,  $y_{b0} = 1.6 \text{ g/cm}^3$  为床面泥沙达到密实后的容重,  $k = 2.9 \times 10^{-4} \text{ g/cm}$  为一常数,  $y_b$  为床面泥沙的容重.

式(6)中,  $C_b$  为底部参考含沙量, 由含沙量沿水深的指数分布, 可导出  $C_b$  和平均含沙量的关系:

$$C_b = K \left[ \frac{\omega(H-a)}{\varepsilon} \left( 1 - e^{-(\omega/\varepsilon)(H-a)} \right) - 1 \right] c,$$

$K = 1.08$  为修正系数,  $\varepsilon = (1/6) K_u^* H$  为悬沙垂向扩散系数,  $K = 0.4$  为卡门常数,  $a$  为参考高度, 取为底沙中值粒径.

从泥沙质量守恒原理出发, 可以导出河床变形方程:

$$y_{s0} \frac{\partial \eta_b}{\partial t} + S = 0, \quad (9)$$

其中:  $y_{s0}$  为床沙干容重,  $\eta_b$  为河底高程.

## 2.2 计算域及网格剖分

本研究所取计算域为东经  $121^\circ 35' 30'' \sim 122^\circ 27' 30''$ , 北纬  $31^\circ 0' 30'' \sim 31^\circ 25' 45''$ , 长 82.343 3 km, 宽 46.794 5 km. 此区域可以控制长江口整治工程双导堤及其航道的水流、泥沙运动情况. 剖分计算域所采用的网格步长按经纬度划分, 换算成长度为:  $\Delta x = 395.88 \text{ m}$ ,  $\Delta y = 463.31 \text{ m}$ . 为进一步提高局部分辨率, 在双导堤区域将网格加密, 加密的网格步长为:  $\Delta x' = 0.5\Delta x = 197.94 \text{ m}$ ,  $\Delta y' = 0.4\Delta y = 185.32 \text{ m}$ . 计算的时间步长, 对于水流  $\Delta t = 60 \text{ s}$ , 对盐度和含沙量  $\Delta t = 120 \text{ s}$ . 因短时间内, 底床的变形不大, 对流场的影响不明显, 河床变形计算的时间步长为  $\Delta t = 240 \text{ s}$ . 变量的布置采用交错网格, 潮位  $\zeta$ 、水深  $H$ 、盐度  $s$  以及含沙量  $c$  位于网格单元中心, 流速  $u$ 、 $v$  分别位于网格单元左右和上下边界.

## 2.3 边界条件、初始条件

在东、南、北开边界上给定潮位、盐度及含沙量过程. 在西入口边界给定流速、盐度和含沙量过程. 在闭边界上令潮位的法向梯度为零, 流速为零, 闭边界上无泥沙、盐度通量, 即含沙量、盐度法向梯度为零.

由于计算初始时刻域内的流场、潮位和盐度分布未知, 我们从零流场和平均潮位开始计算. 一小时后实测点处的流速、潮位和盐度已和实测基本一致, 此时作为实际计算的开始时刻. 初始含沙量由实测数据插值得到.

## 2.4 数值方法

目前二维计算中, 广泛采用 ADI 法求解. 本文采用改进的分步全隐式格式, 对水流运动的控制方程进行离散. 对流项采用稳定性好的一阶迎风格式, 扩散项采用中心差分格式. 盐度和含沙量的对流扩散方程可独立采用 ADI 法求解, 底变形方程采用显式差分格式计算.

### 2.5 模型验证

根据长江口深水航道(一期)工程可行性研究报告<sup>[1]</sup>,本模型采用如下参数:  $\rho_s = 2\ 650\ \text{kg/m}^3$ ;  $\rho = 1\ 000\ \text{kg/m}^3$ ;  $d = 0.01\ \text{mm}$ ;  $\gamma_{s0} = 1\ 000\ \text{kg/m}^3$ 。根据长江口流场计算的经验,糙率一般介于0.01 ~ 0.02之间,并且随着涨落潮流而变化。本文中,涨潮时  $n = 0.015$ ,落潮时  $n = 0.013$ ;湍流粘性系数取为<sup>[7]</sup>  $\nu_t = 150\ \text{m}^2/\text{s}$ 。泥沙和盐度的水平扩散系数与摩阻流速相联系:

$$D_x = D_{sx} = \beta u^* x H, \quad D_y = D_{sy} = \beta u^* y H,$$

其中  $u^* x = \sqrt{\tau_{bx}/\rho}, \quad u^* y = \sqrt{\tau_{by}/\rho}, \quad \beta = 200$

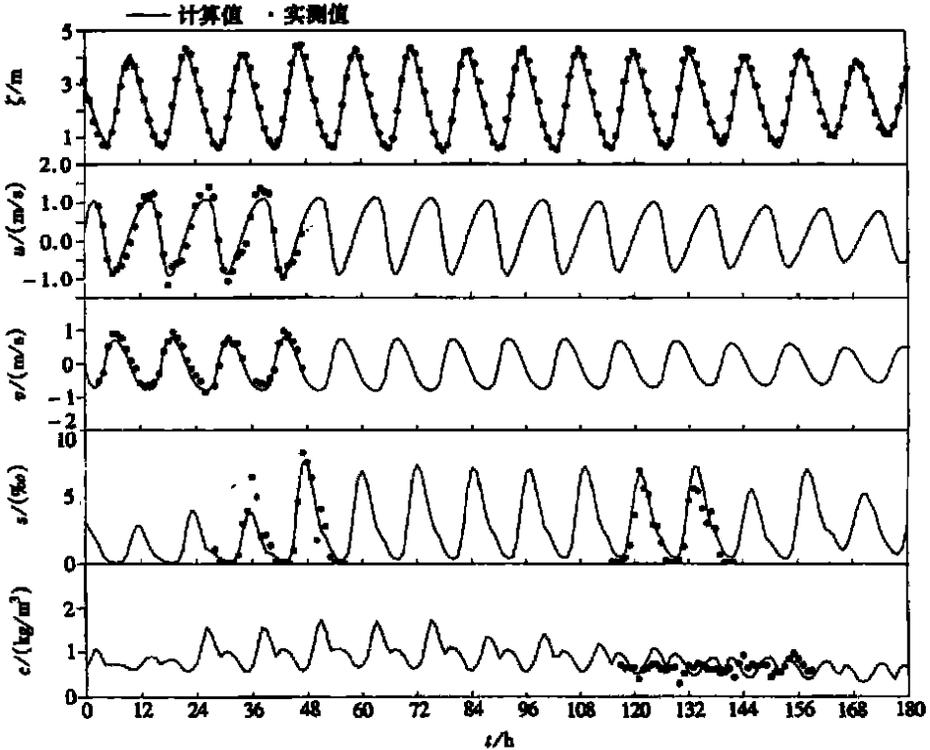


图2 计算与实测潮位( $\zeta$ )、流速( $u, v$ )、盐度( $s$ )和泥沙浓度( $c$ )的比较

图2比较了计算与实测的潮位、流速(北东两个方向)、盐度以及含沙量变化的过程,由图可见,计算和实测的潮位符合良好,在相位上两者完全一致,潮位的高低则有一些误差,最大误差约在20 cm左右。流速变化的相位,两者符合较好,从流速的绝对值看,东西向流速符合较好,南北向流速的对比情况稍差。本文模拟的流场与文献[8]的三维数值研究结果进行了对比,涨落潮的总体流势(包括局部流势以及潮流椭圆的旋转方向等),尤其是九段沙串沟和横沙东滩串沟及其附近的涨落潮流向,两者均一致。计算和实测盐度的相位变化基本一致,含沙量的平均值符合较好。总体上讲,在缺乏准确边界条件的情况下,水流、盐度、含沙量的验证满足工程应用的要求。

### 3 航道分流分沙比的变化

分析工程前后的流场<sup>[2]</sup>,分流口潜堤堤根的B点(如图3)可以作为南、北槽的分流断面的

分界点,通过 B 点作分流断面 AB、BC (见图 3),定义北槽分流、分沙比如下:

$$\beta_w = \frac{Q_w}{Q_w^T}, \quad \beta_s = \frac{Q_s}{Q_s^T}$$

其中  $Q_w = \int_B^C uH dy, Q_s = \int_B^A uH dy$

分别为北槽的分流量和输沙率,

$$Q_w^T = \int_A^C uH dy, \quad Q_s^T = \int_A^C uH dy$$

分别为南北槽的总流量和总输沙率。

现考察工程对航道分流分沙的影响,为此,在实际工程布置(丁坝长度与设计长度之比为 1,潜堤方向角定义为  $0^\circ$ )下,改变两种潜堤方向:北偏  $10^\circ$ 、 $-10^\circ$ (即南偏),以及两种丁坝长度:长度减半、无丁坝,共计算了 6 种方案,如表 1。

长江口的泥沙主要来源于上游径流挟沙,如何控制落潮时航道的分流分沙情况,是工程的关键。图 4 为工程前后落潮时的分流分沙过程对比,可见工程后北槽航道的分流量 ( $Q_w$ ) 和分沙量 ( $Q_s$ ) 均有所减少。这是因为潜堤工程改

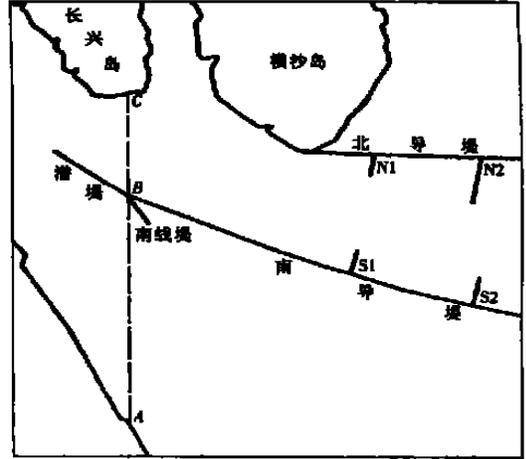


图 3 南北槽分流分沙端面示意图

表 1 分流分沙计算方案

方案	潜堤偏角	丁坝长度/设计长度	备注
1	$0^\circ$	1	实际工程布置
2	$0^\circ$	0.5	
3	$0^\circ$	0	
4	$10^\circ$	1	工程前
5	$-10^\circ$	1	
6			

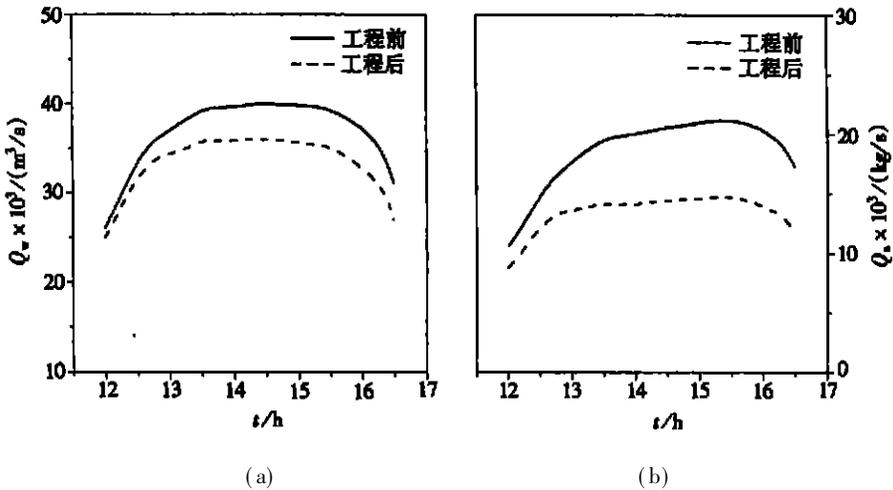
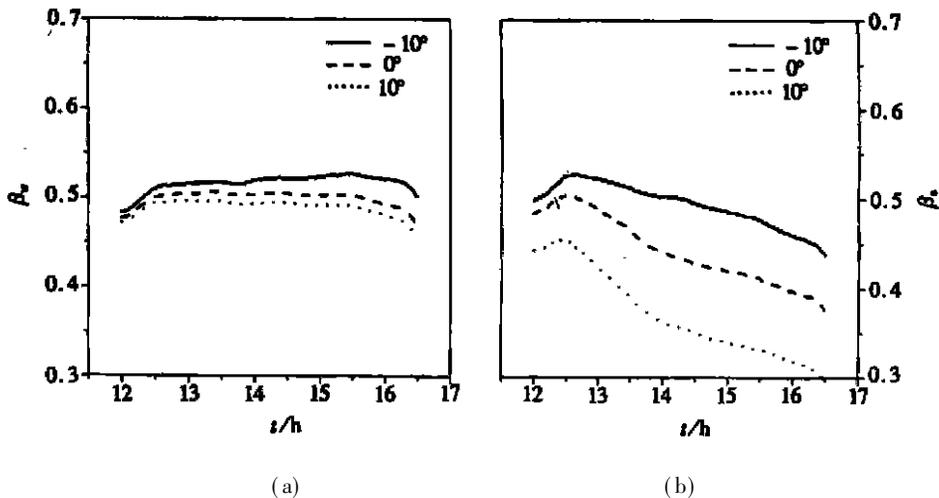


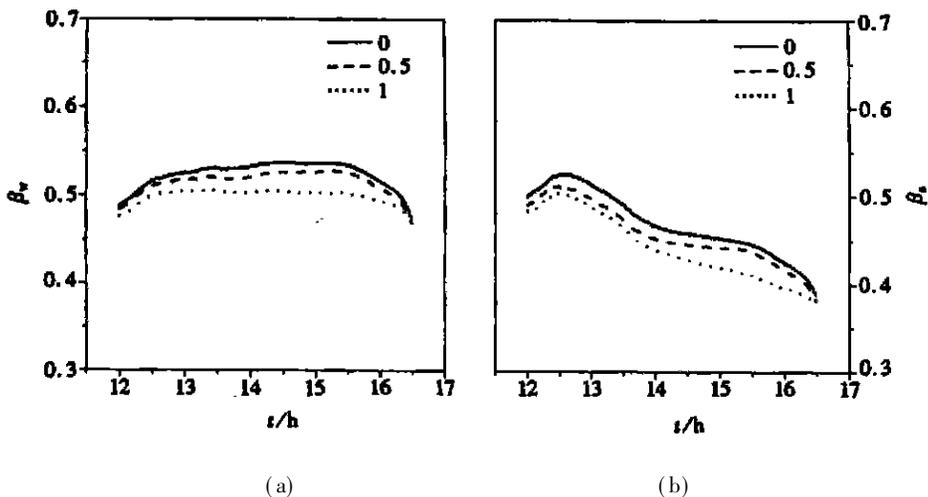
图 4 工程前后北槽航道落潮时的(a)分流(b)分沙量过程

变了分流口附近的局部流场,因潜堤由堤根到堤头,顶高程由 2.0 m 逐渐过渡到  $-2.0$  m,而在工程前潜堤附近滩面高程在 0.0 m 到  $-8.0$  m 之间,潜堤的修建使局部河底高程抬高,致使一

部分底层水流进入南槽, 从而北槽航道的分流量减少。另一方面, 由于流速分布上大下小、含沙量分布上小下大, 漫过潜堤的水流为上层相对较清的水体, 而下层的浑浊水体被潜堤拦截在航道之外, 航道的分沙量必然因此而减少。



0°: 设计潜堤方向; 10°: 潜堤北偏 10°; -10°: 潜堤南偏 10°  
图 5 潜堤方向对北槽航道落潮时的 (a) 分流 (b) 分沙比的影响



1: 设计丁坝长度; 0.5: 丁坝长度减半; 0: 无丁坝  
图 6 丁坝长度对北槽航道落潮时的 (a) 分流 (b) 分沙比的影响

由此看来, 潜堤的方向和堤顶高程将会对航道分流分沙的效果产生重要影响。潜堤方向的改变必然导致航道分流分沙比的变化, 如图 5(落潮流的情况) 所示, 在设计潜堤布置(0°)下, 航道的分流比约为 50%, 分沙比在 40% ~ 50% 之间变化; 当潜堤南偏(-10°)时, 一方面潜堤堤头处进入航道的过流断面略有增加, 另一方面落潮流与潜堤交角的改变有利于水流进入北槽, 因此航道的分流分沙比均增加, 分流比约增加 1% ~ 2%, 分沙比约增加 2% ~ 7%; 基于相同的原因, 当潜堤北偏时, 分流分沙比均减小, 分流比约减小 1%, 分沙比约减小 5% ~ 8%。

丁坝的束水作用固然有利于攻沙, 但丁坝的存在缩窄了航道的过流断面, 必然会影响航道的分流能力。图 6 为丁坝长度不同时, 落潮时航道的分流分沙比的变化, 按设计丁坝计算时,

航道的分流分沙与图 5 设计潜堤布置( $0^\circ$ )情形相同,即分流比约为 50%,分沙比约 40%~50%;如果丁坝长度减少一半,分流比约增加 2%;如果不设束水丁坝,则分流比进一步增大,较设计丁坝情形增大 3%左右。随着分流比的增大,由水流挟带进入航道的泥沙数量亦相应增加,即分沙比亦增大。由此可见丁坝的阻水作用,丁坝越长,航道过流断面越小,水流阻力亦越大,因而航道分流比越小。另外,丁坝长度由设计值减半后分流比增大的幅度,比由半长丁坝到无丁坝情形分流比增加的幅度大。这是因为丁坝较长时,坝头附近的河底高程较底,丁坝缩小的断面为深槽的一部分,过流断面减少较多,而丁坝较短时坝身位于浅滩上,丁坝所缩窄的断面为浅滩上的部分,这部分断面的过流能力即使在修建导堤以前也是很有限的。

## 4 结束语

本文建立了水平二维水流、盐度、泥沙数学模型,并应用于长江口深水航道整治工程,研究了双导堤对航道附近流场的影响。结果表明双导堤工程减少了航道的分沙量,这有利于维护航道的畅通,但同时也使航道的分流比减小。潜堤方向、丁坝长度对航道分流分沙有重要影响,比较而言,潜堤方向的改变对分流分沙比的作用更为明显。因此,如何合理布置整治工程的各部分建筑物及其优化设计,如:潜堤和丁坝的主轴方向、长度、高程等,以利用流速和含沙量的不同分布特点,达到合理分水分沙,使航道清淤量最小的目的,是应深入研究的课题,将为长江口整治工程二、三期的实施提供有益的参考。

### [参 考 文 献]

- [1] 上海航道勘察设计院. 长江口深水航道治理工程(一期)工程可行性研究报告(修订本)[R], 1997.
- [2] ZHOU Ji\_fu, LI Jia\_chun, LIU He\_dong. Influences of the waterway project in the Yangtze River Estuary on sediment transport[A]. In: WANG Zhao\_ying, HU Shi\_xiong Eds. Stochastic Hydraulics' 00, Proceedings of the Eighth International Symposium on Stochastic Hydraulics[C]. Rotterdam: A A Balkema Publishers, 2000, 333—341.
- [3] 周济福,王涛,李家春,等. 径流和潮流对长江口泥沙运输的影响[J]. 水动力学研究与进展, 1999, 14(1): 90—100.
- [4] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [5] 曹志先. 基于湍流猝发的床面泥沙上扬通量[J]. 水利学报, 1996, (5): 18—21.
- [6] 唐存本. 泥沙起动的规律[J]. 水利学报, 1963, (2): 1—12.
- [7] 南京水利水电科学研究院河港研究所. 长江口深水航道二维全沙数学模型计算(会议文件)[R]. 1997.
- [8] 河海大学海岸及海洋工程研究所. 长江口深水航道整治一期工程三维数值研究[R]. 1998.

# Influences of the Fish\_Mouth Project and the Groins on the Flow and Sediment Ratio of the Yangtze River Waterway

ZHOU Ji\_fu, LI Jia\_chun

( Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100080, P. R. China )

**Abstract:** A depth\_integrated two\_dimensional numerical model of current, salinity and sediment transport was proposed and calibrated by the observation data in the Yangtze River Estuary. It was then applied to investigate the flow and sediment ratio of the navigation channel, i. e. the North Channel of the Yangtze River Estuary, before and after the first phase waterway project is implemented. Particularly, the influences of groin length and the orientation of the submerged dam on the flow ratio and sediment load discharging into the North Channel were discussed. The numerical results demonstrate that less sediment load discharges into the navigation channel, which unburdens the waterway dredging, but in the meantime the flow ratio is also decreased. The flow and sediment ratio can be adjusted by changing layout and dimensions of the hydro\_structures, such as the groin length, the top height, etc. The effect of the orientation of the submerged dam is more obvious than the groin length.

**Key words:** the Yangtze River Estuary; waterway project; flow and sediment ratio; numerical model