

# 长江口外沙内泓河段保滩护岸对策研究

季永兴, 卢永金, 莫敖全

(上海市水利工程设计研究院, 上海 200051)

**摘要:** 分析了长江口众多外沙内泓河段的特征和演变趋势, 并利用平面二维有限元水流数学模型模拟分析该类型河段的水动力特性, 进而从水流和河床演变 2 个方面对保滩护岸结构破坏机理进行分析, 并提出了该类型河段保滩护岸工程加固措施。

**关键词:** 长江口; 外沙内泓; 保滩护岸; 河势演变; 水流数学模型

文献标识码: A

文章编号: 1009-288X(2001)01-0015-04

中图分类号: P737.13

## Beach and Bank Protection Works at Outer-bar and Inner-stream Reach in the Yangtze River Estuary

Ji Yong-xing, Lu Yong-jin, Mo Ao-quan

(Shanghai Water Conservancy Engineering Design and Research Institute, Shanghai 200051, PRC)

**Abstract** The characters of outer-bar and inner-stream reach in the Yangtze river estuary are presented by analysis of streambed evolution. Based on the value and distribution of flow velocity in construction stage by 2D hydrodynamic model, the failure mechanism of beach and bank protection works is studied from hydrodynamic, construction and streambed evolution. At last, the strategies of beach protection and accretion promotion in construction and plan layout of groin and longitudinal dam are presented.

**Keywords** the Yangtze river estuary; outer-bar and inner-stream; beach and bank protection; bed development; hydrodynamic model

长江口属缓混合陆海相潮汐河口, 口内为江心沙多岛型河道, 长江口径流量大, 潮流强, 在两股强劲动力的相互作用下, 涨落潮流路分离, 在河中形成沙岛, 构成长江口有规律的分汊。自徐六泾以下平面呈喇叭型, 徐六泾江面宽度 5.8 km, 苏北启东嘴与上海南汇嘴之间江面宽达 90 km, 崇明岛将长江口分为南、北二支; 长兴岛和横沙岛又将南支分为南北二港; 九段沙将南港分为南、北二槽, 长江口呈三级分汊, 四口入海之势。在如此复杂的河势中又存在着许多相同形态和规律的河段, 在长江口江苏海门头兴港至三和港河段、崇明鹤龙港河段、张网港至新开河河段、堡镇至团结沙河段、长兴南沿德龙圩河段均是外沙内泓(江中沙洲与岸滩间夹一深泓)河势河段。

在该类型河段保滩护岸结构常常比其它河段破坏严重。为此, 笔者从河势演变着手, 利用平面二维有限元水流数学模型, 对该类河段进行研究, 分析其水流特性, 探讨其保滩护岸结构破坏水动力机理, 并提出加固和实施保滩护岸工程的对策措施。

### 1 外沙内泓河段河势分析

外沙内泓河势的形成与上游径流、泥沙条件、边界条件、潮汐动力、科氏力作用相关。在长江口涨潮流和落潮流两股动力十分强劲, 又由于科氏力的影响, 涨潮流进入长江口以后, 主流偏北, 而落潮时主流偏南, 涨落潮流路分歧导致上游来沙在江中淤积形成暗沙(或沙洲), 暗沙与北侧岸滩间形成涨潮沟, 暗沙与南侧岸滩间为落潮主槽。位于涨潮沟外的暗沙除逐步淤高外, 还伴随有北淤南冲, 沙洲北移; 涨潮沟北侧岸滩在无保护工程情况下, 岸滩剥蚀后退, 而在沿岸建有保滩护岸工程情况下, 沙洲北移内压, 长期积累, 必造成岸滩冲刷, 深泓逼岸, 形成外沙内泓现象。

长江口典型的外沙内泓河势主要分布在如下几个河段: 北支新隆沙河段江苏侧, 从三条港、头兴港到三和港是江苏海门、启东重要的航道, 而航道外侧从三条港开始即为暗沙; 崇明鹤龙港河段, 外侧东风西沙已基本露滩, 而内侧深泓最深处高程为 -31.5 m;

张网港至新开河河段,内侧为新桥水道,外侧从东风东沙(或称扁担沙)一直下延至新河港;堡镇至团结沙河段,外侧堡镇沙(六效沙脊),内侧为一深槽;长兴南沿德龙圩河段,内侧深槽逼岸,最近距离仅 20~30 m,外侧为瑞丰沙。

从长江口水下地形图可以看出,各主要外沙内泓河段均有一个明显特征:内泓均以涨潮流为主,泓槽逼岸,岸滩陡峭,泓槽以外均有露滩或不露滩沙体,上游几乎都有串沟与泓槽连接。从历年河床断面变化(图 1)还可以看出,该类型河段有的已经趋于稳定,有的外沙还在内移,深泓还在加深,向岸滩逼近,影响岸滩的稳定。

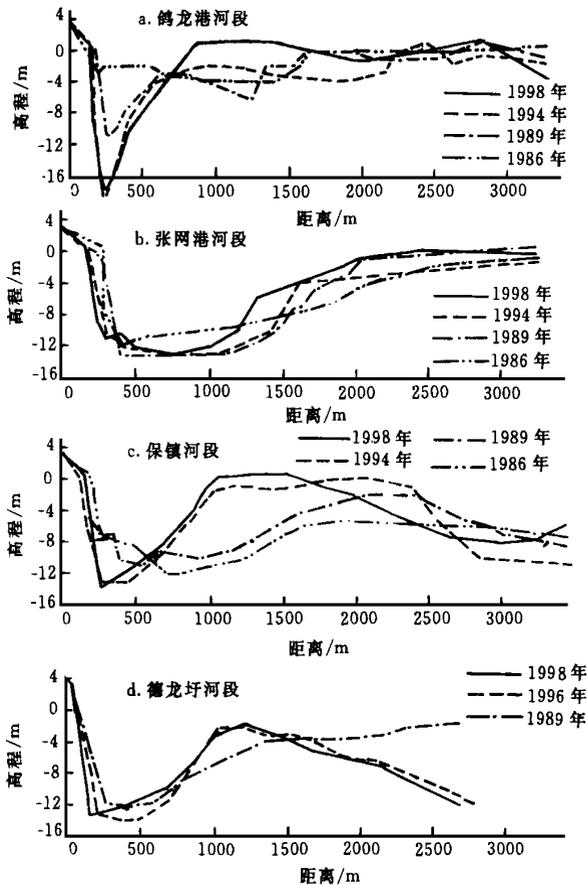


图 1 外沙内泓河段典型断面变化图

## 2 水流数学模型模拟

### 2.1 数学模型简介

为研究外沙内泓河段水流特性,对该类河段进行数值模拟,采用由美国陆军工程兵师团水道实验站(WES)编制的二维平面有限元水动力数学模型方程式<sup>[1]</sup>,其基本方程是采用三维潮波方程沿深度积分推得的二维不可压缩浅水流动方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0$$

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[ E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + gh \left[ \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{g \rho n^2}{(h^{1/\epsilon})^2} \cdot (u^2 + v^2)^{1/2} - YV_a^2 \cos j - 2h w v \sin h = 0$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[ E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + gh \left[ \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{g \rho n^2}{(h^{1/\epsilon})^2} \cdot (u^2 + v^2)^{1/2} - YV_a^2 \cos j - 2h w v \sin h = 0$$

式中:  $h$ ——水深;  $u, v$ —— $x, y$ 方向的流速;  $t$ ——时间;  $\rho$ ——流体密度;  $E$ ——水平涡动粘滞系数;  $g$ ——重力加速度;  $a$ ——河床底高程;  $n$ ——Manning系数;  $\epsilon$ ——经验风剪系数;  $V_a$ ——风速;  $j$ ——风向;  $k$ ——地球自转角速度;  $i$ ——地球纬度。

上述非线性偏微分方程用有限单元法计算,单元网格采用 8 节点四边形单元及 6 节点三角形单元。边滩单元采用线性计入法,即当单元的平均高程低于某一设定潮位时,整个单元为湿单元,参加计算;当单元平均高程高于某一设定潮位时,整个单元为干单元,不参加计算;当单元平均高程介于 2 设定潮位之间时,按线性比例调整单元参与计算“面积”。

模型模拟范围内有开边界(水域)和闭边界(岸边)2种。对开边界采用潮位过程  $h = h(t)$  作为边界条件。对闭边界,根据边壁不可穿越条件,以  $\vec{u} \cdot \vec{n} = 0$  作为边界条件。

计算初始时刻  $t = t_0$  时的边界条件为  $h(t)|_{t=0} = h(t_0)$  和  $u(t)|_{t=0} = C$ 。由于初始时刻的偏差在计算时会很快消失,故计算时取初始时刻的水位为计算域的平均潮位的近似值,流速为一假定值。为减少人为干扰,紊动粘滞系数  $E$  和 Manning 系数均由程序根据式(1)和式(2)计算得出。紊动粘滞系数  $E$  利用 Peclet 数根据网格单元边长和计算流速自动调整

$$P = \frac{du dx}{E} \quad (1)$$

式中:  $P$ ——Peclet 数;  $N$ ——流体密度;  $u$ ——流速;  $dx$ ——单元网格;  $E$ ——紊动粘滞系数; Manning 系数根据网格单元平均水深利用下面公式自动调整。

$$n = \frac{n_{max}^0}{h} + n_{max}^1 \cdot e^{-\bar{h}/h_0} \quad (2)$$

式中:  $n$ ——Manning 系数;  $n_{max}^0$ ——无植被网格单元最大 Manning 系数;  $n_{max}^1$ ——有植被网格单元最大 Manning 系数;  $\bar{h}$ ——单元网格平均水深;  $V$ ——经验系数;  $h_0$ ——有植被影响的最大水深。

为研究长江口和杭州湾整体水动力情况和为各局部区域数学模型提供边界条件,笔者建立了整体水动力数学模型。为研究各河段,又根据具体河段建立局部嵌套数学模型(图 2, 3)

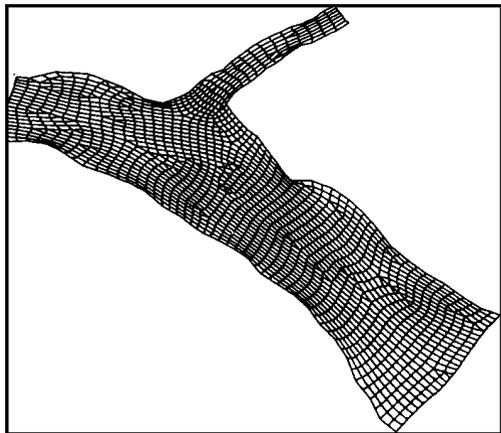


图 2 崇明鸪龙港河段局部数学模型

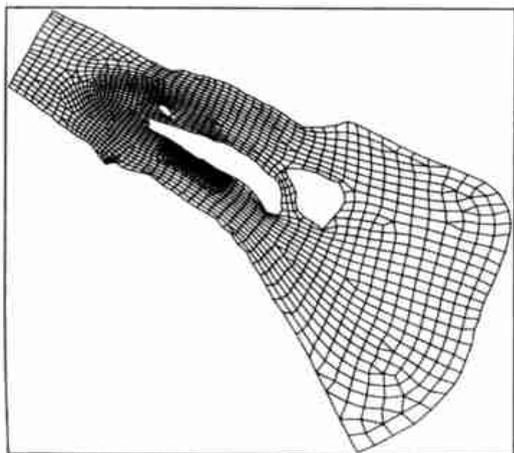


图 3 长兴南沿德龙圩河段局部数学模型

整体数学模型的验证采用 1996 年 3 月大潮同步实测资料进行验证,其中包括长江口所有潮位站潮位资料和 13 个流速验证点的流速、流向资料,验证显示计算与实测资料吻合的较好<sup>[2]</sup>。局部数学模型利用整体数学模型计算的流速进行验证,验证结果显示也吻合较好。

## 2.2 水流特性分析

利用数学模型采用 1996 年 3 月实测大潮进行水流计算。计算结果表明,由于受科氏力的影响,长江口水流流向发生了微小的变化,而且水流流向变化在长江口口外和口内并不一致。水流在口外由于水域宽阔,河床约束条件小,流向变化大;进入口内由于受河床约束条件大,流向变化就小;在进入外沙内泓河段以后,流向变化更小,但总体上科氏力仍然使水流向北偏转,冲向北侧岸滩。从流速分布上看,在崇明鸪龙

港和长兴南沿德龙圩外沙内泓河段,流速从上至下逐渐递增,1996 年 3 月枯季情况下,泓槽涨潮最大流速为 0.76~1.66 m/s,落潮最大流速为 0.56~0.96 m/s,涨潮流速明显大于落潮流速,洪季大潮情况下涨落潮流速更大,这充分说明,外沙内泓河段是以涨潮流为主的河段,涨潮流在该类型河段的河势形成和发育上起着重要作用。而且,一般在长江口地区河床与岸滩的泥沙起动流速均较小,抗冲流速有限,所以在上述较大流速作用下,河床与岸滩均易冲刷。

## 3 保滩护岸结构破坏机理分析

在长江口外沙内泓河段主要护岸工程有顺坝护岸、丁坝护岸和丁顺坝结合护岸 3 大类型,护岸工程因不同位置和类型又有不同的破坏原因。

(1) 水动力因素是外沙内泓河段保滩护岸工程破坏的主要原因。根据数学模型计算结果,该类型河段的岸滩和泓槽流速较大,河床与岸滩在大流速作用下易于冲刷,这是深泓成的一个重要因素。另外,数学模型计算反映,在丁坝上下游面产生了下降水流(图 4),坝头附近在坝下游有一涡旋和回流区(图 5)。



图 4 丁坝周围水面等值线图

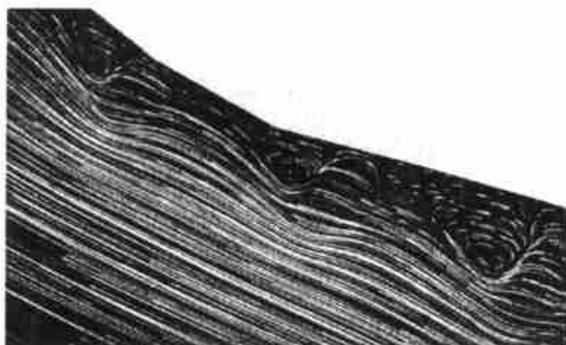


图 5 数学模型动态模拟丁坝周围流场

回流和主流交界处为一连串尾流涡旋,下降水流是导致坝面破坏的一个重要原因,涡旋是造成丁坝坝头冲刷的主要原因<sup>[3]</sup>,而回流区则是泥沙搬运的主要堆积区。由于该类型河段处于潮汐河口,丁坝在每天

两涨两落的涨落潮涡旋流及往复流的作用下,坝头和坝的两侧均易于淘刷,并在两侧较远处形成堆积区,实测水下地形丁坝头部深坑、丁坝两侧凹陷及丁坝间突岸很好地反映了此情况

(2) 丁坝坡面坡度是丁坝稳定的又一重要因素。根据实践经验和室内实验,较陡的边坡对控制坝田回流为较优<sup>[4]</sup>,但过陡的坡度易于使丁坝两侧和丁坝坝头冲刷,同时也不利于丁坝的抗滑稳定。丁坝边坡稳定与众多因素有关,一般认为丁坝两侧坡度以  $1:1.5 \sim 1:3$  为宜<sup>[5]</sup>。根据实测,丁坝两侧冲刷坑边坡一般为  $1:2 \sim 1:3$ ,坝头冲刷坑边坡一般为  $1:3 \sim 1:5$ 。由于历史上经济条件的限制,以及经验缺乏和理论的不成熟,对该类型河段丁坝两侧坡度研究较少。所以丁坝坡面坡度和丁坝坝头坡度是影响该类型河段护岸丁坝稳定的又一重要因素。

(3) 泓槽逼岸、岸滩陡峭影响了顺坝坝基和丁坝坝头的稳定。从前面分析得出,由于外沙内泓现象愈演愈烈,内泓缩窄,河床刷深,北岸剥滩,深槽逼岸,岸滩陡峭(图 1),而且泓槽流速较大,水流较急,顺坝坝基和丁坝坝头因难以立稳而塌落。

(4) 风浪是该类型河段保滩护岸工程破坏的另一因素。该类型河段处于长江口内,一般受风浪影响很小,所以该类型河段保滩护岸工程的丁、顺坝均为抛石(表面理砌)结构,其坝身和坝头一般未设消浪设施,所以有的丁、顺坝在风暴潮的情况下遭到了局部破坏,并且逐渐剥蚀岸滩

#### 4 外沙内泓段保滩护岸工程加固措施

保滩护岸工程的加固要根据河势演变特征、水流特性和保滩护岸结构破坏的机理有针对性地进行。

(1) 要从总体出发,抓住节点,从而控制住整个河势。从河势上分析,外沙内泓河段保滩护岸结构破坏比较严重的一般处于整个河段的节点部位。比如,崇明鹧龙港河段结构破坏严重的主要在鹧龙港东 6 坝以西,长兴德隆圩河段破坏严重的主要在德隆圩 5—8 坝,尤以 6 坝为最重要

(2) 在外沙内泓河段保滩护岸中丁顺坝结合的思想是比较正确的选择。保滩护岸的破坏无非是水流或风浪的作用,或者两者兼而有之。由以上分析可以看出,在外沙内泓河段,水动力因素是保滩护岸工程破坏的主要原因。实践证明,在水深流速大的情况下,采用平顺护岸是比较适宜的;在河口地区,当岸滩主要受潮流作用时,采用丁坝保滩和造滩效果良好。外沙内泓河段同样采取此思想,利用顺坝保住高滩,抵御部分风浪对岸滩的侵蚀,同时利用丁坝挑流护滩

(3) 合理布置丁顺坝是工程加固的一个重要环节。许多学者已经对丁坝群保滩的合理间距做了较深入的研究,一般认为合理的间距为  $1:2 \sim 1:4$ <sup>[6]</sup>。丁坝间距过小,丁坝坝头冲刷坑易连成一体,形成一条深泓;间距过大,对丁坝间岸滩起不到保护作用。在维持航道方面一般采用较小间距,而在保滩护岸方面则要采取较大间距。利用数学模型计算了在长兴岛南沿德隆圩增减一条丁坝对水流影响情况,结果显示,加密一条丁坝后水流外移,且尾涡旋减少。

(4) 保滩护岸的结构型式和材料,特别是丁坝坝头的结构型式和材料是工程加固的关键。要从坝体的稳定性、抗水流冲击、造价、施工难易等方面综合考虑选择适合外沙内泓河段的保滩护岸结构型式和材料

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 卢永金,陈美发,季永兴,陆建锋.平面二维水力数学模型在上海水利工程中的应用[J].水动力学研究与进展,1997,13(3增刊):61-65.
- [2] 陈美发,卢永金,季永兴.崇明北沿滩涂促淤围垦工程水流数学模型研究(之一)[C].见:第十四届全国水动力学研讨会文集.上海:海洋出版社,2000.238-243.
- [3] 长江水利水电科学研究院.国外丁坝研究综述[J].人民长江,1979,(3):51-61.
- [4] 程年生.有边坡丁坝回流试验研究[J].水利水运科学研究,1991(2):123-132.
- [5] 方达宪,王军.漫水丁坝边坡系数对丁坝坝头局部冲减的探讨[J].华东公路,1991,73(6):64-67.
- [6] 常福田.丁坝群合理间距的试验研究[J].河海大学学报,1992,20(4):7-14.