

· 船道及船闸 ·



# 长江口北槽航槽开挖对水流及河势的影响\*

刘猛<sup>1</sup>, 朱亮<sup>2</sup>, 张宏伟<sup>1</sup>, 李为华<sup>1</sup>

(1. 上海河口海岸科学研究中心 河口海岸交通行业重点实验室, 上海 201201;

2. 南通航运职业技术学院, 江苏南通 226010)

**摘要:** 基于试验数据和实测地形, 初步分析了航槽开挖对长江口北槽水流及河势的影响。结果表明: 1) 12.5 m航槽开挖引起北槽主槽尤其航槽内流速显著增加; 2) 在计算北槽航槽开挖后槽内流速时, 乐培九公式计算结果吻合较好; 3) 12.5 m航槽开挖对北槽河势变化产生显著影响, 是引起2009年以后北槽河势显著变化的一个主要原因, 因此在分析评价长江口深水航道以及其它相关的航道整治工程治理效果时, 应充分考虑航槽开挖所带来的影响。

**关键词:** 长江口深水航道治理工程; 12.5 m航槽; 水流; 河势

中图分类号: TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0107-05

## Effect on current and river regime induced by dredged channel in the north passage of the Yangtze estuary

LIU Meng<sup>1</sup>, ZHU Liang<sup>2</sup>, ZHANG Hong-wei<sup>1</sup>, LI Wei-hua<sup>1</sup>,

(1. Shanghai Estuarine and Coastal Research Center, Key Laboratory of Estuarine & Coastal Engineering Ministry of Transports, Shanghai 201201, China; 2. Nantong Shipping College, Nantong 226010, China)

**Abstract:** Based on experimental and observed terrain data, we analyze the effect of dredged channel on current and river regime in the North Passage of the Yangtze Estuary. The results show that: 1) The current velocity in the main channel increases significantly after the channel depth is dredged to 12.5 m; 2) When calculating the current velocity caused by dredged channel in the north passage, Le Peijiu's formula is more appropriate; 3) Digging of the dredged channel for 12.5 m intensifies the change of river regime in the north passage, which is one of the main reasons of the change of river regime in the North Passage since 2009. The effect of dredged channel should be considered sufficiently in the analysis and evaluation of the regulation effect of the Yangtze Estuary Deepwater Channel Regulation Project and other relevant waterway regulation engineering.

**Key words:** Yangtze estuary deepwater channel regulation project; 12.5 m deep channel; current; river regime

长江口深水航道治理工程实施前, 北槽自然通航水深不足7 m (理论基面, 下同), 通过大规模导堤、丁坝建设以及航槽开挖, 长江口12.5 m深水航道于2010年3月开通。长江口深水航道治理工程实施后, 北槽水流、河势发生了显著变化, 正确认识其变化原因及规律不仅可以为深水航道维

护、管理提供科学依据, 而且可以为其它河口整治开发提供参考。

与导堤、丁坝工程建设相同, 航槽开挖也对北槽水流、河势变化产生较大影响, 目前有关导堤、丁坝建设对北槽水流、河势变化影响的研究较多<sup>[1-3]</sup>, 但鲜见关于航槽开挖对北槽水流、河势

收稿日期: 2012-04-10

\*基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(41206072); 国家自然科学基金资助项目(50979053); 国家973计划资助项目(2010CB429002)。

作者简介: 刘猛(1983—), 男, 助理研究员, 主要从事河口水沙运动及河口航道治理研究。

变化影响的研究。本文拟借助定床、动床物理模型试验和现场实测地形数据，初步分析航槽开挖对长江口北槽水流及河势的影响，并对各挖槽水力学经验公式<sup>[4-10]</sup>在长江口北槽的适应性进行分析比较，选出较为合适的计算公式。

### 1 数据及方法

为了避免采用水槽试验因各种概化带来的不确定影响，本文涉及的物理模型试验<sup>[11-13]</sup>均在上海河口海岸科学研究中心长江口整体物理模型上开展，该模型长期应用于长江口重大涉水工程相关的科研论证工作，对于北槽潮流动力场、河床演变等问题具有较高的模拟精度，模型水平比尺为1:1 000，垂直比尺为1:125<sup>[11-15]</sup>。

其中，定床水流试验采用2000年2月实测地形，其工程布置见图1，北侧布置10条丁坝（N1~N10）、南侧布置9条丁坝（S1~S9，其中S9为斜丁坝），上游大通流量取30 000 m<sup>3</sup>/s，口外潮差约4.1 m。模型上布置10个测量断面，共62个测点（图1）同步测量流速，试验共分为航槽开挖至10 m和航槽开挖至12.5 m两个组次。动床物理模型试验分别采用2008年5月和2011年2月实测地形，新建丁坝工程见图2，分别对北侧N1~N6丁坝和南侧S3~S7丁坝进行了延长。

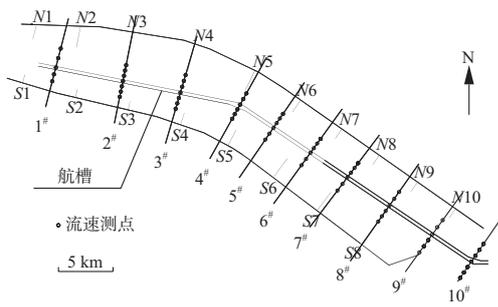


图1 工程及测点布置

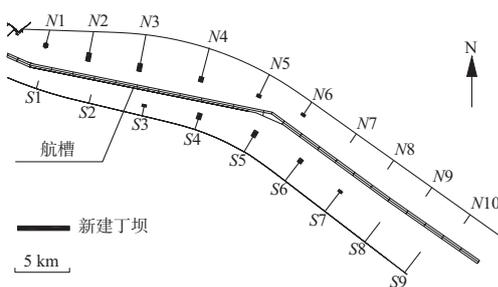


图2 新建丁坝及航槽布置

### 2 航槽开挖对北槽水流影响

定床水流试验所得航槽水深为10 m与12.5 m的条件下，北槽落急流速及其差值分布分别见图3~5，航中落急流速及其差值沿程分布见图6。

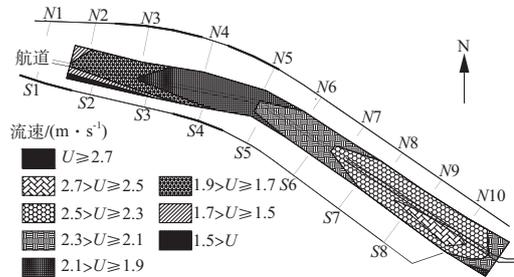


图3 北槽10 m航槽落急流速分布

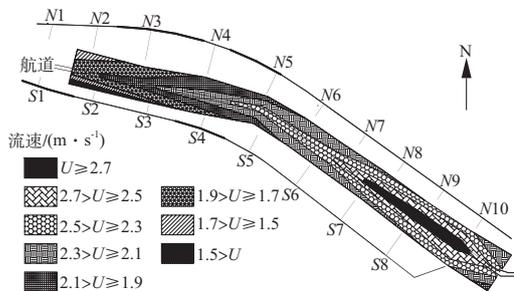


图4 北槽12.5 m航槽落急流速分布

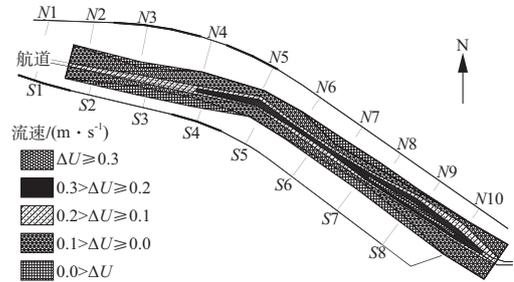


图5 北槽12.5 m与10 m航槽落急流速差值分布

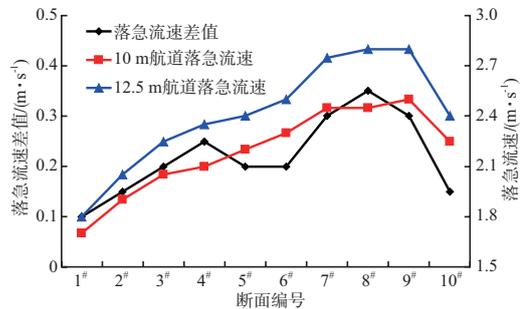


图6 航中落急流速及其差值沿程分布

由图3~6可见，航槽开挖对北槽水流产生了较大影响，主要表现为以下2点：

1) 横向流速变化：航槽开挖深度增加后，航槽内及两侧附近区域流速增加较为显著，距航槽越远流速增加越小，当距离超过一定值后，流速

不增反而减小。如图5所示, 当航槽底高程由-10 m 降至-12.5 m时, 航槽内及航槽附近区域流速增加 0.1~0.35 m/s; 坝头附近出现大片流速减小区域。

2) 纵向流速变化: 航槽开挖深度增加后, 北槽全河段主槽流速均增加, 其中导堤出口(7#~9# 测量断面)附近流速增加最为明显; 往上游, 流速增加值缓慢减小; 往口外, 流速增加值迅速减小。如图5所示, 当航槽底高程由-10 m降至-12.5 m时, 航中落急流速平均增加约0.22 m/s, 其中导堤出口附近(8#测量断面)流速增加约0.35 m/s, 北槽进口处(1#测量断面)流速增加约0.1 m/s, 口外(10#测量断面)流速增加约0.15 m/s。

从以上试验结果可见, 与径流河段不同, 长江口北槽航槽开挖后槽内流速增加而并未减小。在类似长江口的巨型河口实施挖槽, 由于挖槽的面积与潮流的过水面积相比可忽略不计, 因此挖槽对潮位的影响也是可以忽略不计的, 换言之, 航槽开挖对北槽水力坡度的影响可以忽略不计。根据明渠非恒定流运动规律可知, 在不考虑水力坡度变化时, 流速变化主要受水深影响, 水深越大流速也越大。

关于航槽开挖对水流的影响, 很多学者进行过研究<sup>[4-10]</sup>, 但结果差别较大。目前已公开发表的有关挖槽水力学经验公式绝大多数是根据水槽试验数据通过量纲分析获得, 如李安中公式<sup>[6-7]</sup>、赵晓东公式<sup>[8]</sup>、刘光臣公式<sup>[8]</sup>以及曹民雄公式<sup>[8]</sup>等; 少数经验公式是结合理论分析和现场观测资料分析获得, 如乐培九公式<sup>[9]</sup>。结合试验<sup>[11]</sup>初始条件, 运用各经验公式计算得到的结果与实测值对比见图7。

可见, 除乐培九公式与实测结果较为一致外, 其它各主要基于水槽试验数据得出的经验公式计算值均偏小, 这可能与采用概化水槽试验引起的槽内引流不足有关。

### 3 航槽开挖对北槽河势影响

长江口深水航道治理工程实施前, 北槽自然通航水深不足7 m, 2005年二期工程完工后, 北槽自然通航水深逐渐增至约9 m, 2007年以后, 北槽河势总体趋于稳定<sup>[12]</sup>。2009年, 长江口北槽12.5 m航槽开挖, 航槽底宽350~400 m、航槽长

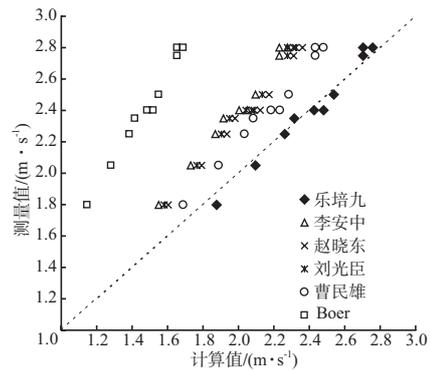


图7 各公式计算结果与实测值比较

度92.27 km, 基建疏浚工程量约 $2.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 同期实施了新的丁坝工程(图2), 工程实施后, 北槽河势发生了显著且历时较长的变化。在航槽开挖及新建丁坝综合作用下, 2009年5月—2011年5月的北槽河势变化(天然实测)见图8。以2008年5月北槽地形作为初始地形, 由物理模型试验<sup>[12]</sup>获得仅由新建丁坝工程引起的2 a(2008-05—2010-05)北槽河床变化见图9。由物理模型试验<sup>[13]</sup>预测的2011-02—2013-02北槽河床变化情况见图10。

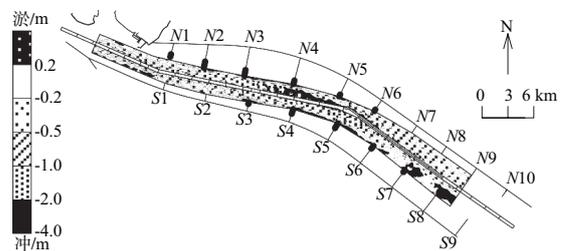


图8 航槽开挖和新建丁坝综合作用下北槽河势变化 (天然实测结果)

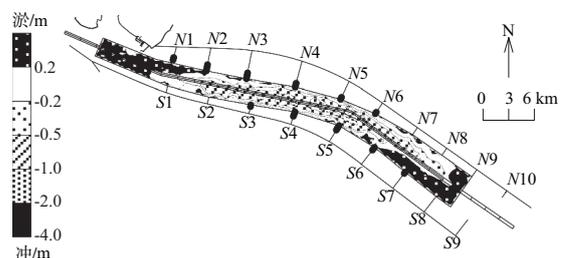


图9 新建丁坝作用下北槽河势变化(模型试验结果)

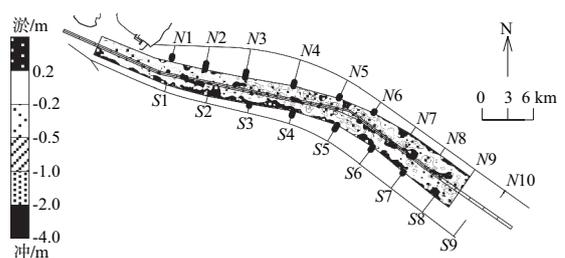


图10 2011年2月—2013年2月北槽河势变化 (模型试验结果)

由图8~图10可见, 12.5 m航槽开挖后, 北槽河势变化呈现以下5个主要特点:

1) 河床冲刷区域纵向范围扩大。

在仅有新建丁坝作用时(图9), 北槽河床冲刷区域纵向主要分布在N2~N8丁坝之间, 但北槽N8丁坝以下、N2丁坝以上河床普遍淤积, 可见, 新建丁坝工程建成后仅能引起工程内局部区域产生冲刷。与航槽开挖后北槽全河段主槽流速增加一致(图5), 当存在12.5m航槽开挖条件时, 北槽河床冲刷区域基本贯穿整个北槽(图8和图10)。

2) 河床冲刷幅度横向分布不均匀, 距航槽越近冲刷越显著。

在仅有新建丁坝作用时(图9), 北槽河床冲刷区域(如N3~N6丁坝之间)冲刷幅度主要集中在0.5~1.0 m, 横向分布相对较为均匀。航槽开挖后, 距航槽越近的滩面冲刷越明显, 反之, 距航槽越远的滩面冲刷越弱, 甚至淤积。当存在12.5 m航槽开挖条件时, N3~N6丁坝(图8)之间滩面冲刷幅度在0.0~3.0 m, 其中航槽附近边滩冲刷幅度主要集中在2.0~3.0 m; 其余区域河床冲刷幅度横向分布不均匀现象更加明显, 航槽附近边滩冲刷幅度约为2.0 m, 坝头附近滩面冲刷较弱甚至淤积。

河床冲刷幅度横向分布不均匀主要由挖槽后

引起的水流横向变化所致, 即航槽内及靠近航槽区域流速增加, 距航槽越远流速增加越小, 当距离超过一定值后, 流速不增反而减小。

3) 航槽两侧边滩横向坡度增加明显。

航槽开挖后, 距离航槽越近的滩面冲刷幅度越大, 距离航槽越远的滩面冲刷幅度越小, 甚至淤积, 这种变化必然导致航槽两侧边滩横向坡度增加。2009年2月和2010年11月, 天然河床各等深线随距航槽中线平均距离变化见图11, 依据图11统计获得的各横向范围滩面坡度及其变化值见表1。可见, 航槽两侧边滩横向坡度增加明显, 但横向分布极不均匀: 航槽边线至距航槽中线300 m范围内, 航槽南侧滩面平均坡度增加18‰, 北侧滩面平均坡度增加11.9‰; 距航槽中线300~600 m, 航槽南侧滩面平均坡度增加1.8‰, 北侧滩面平均坡度增加2.7‰; 距航槽中线600~900 m, 航槽南侧和北侧滩面平均坡度均增加0.6‰。

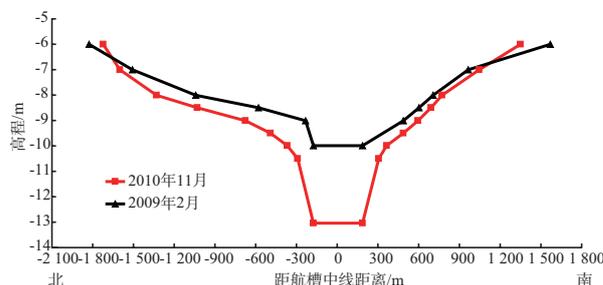


图11 各等深线随距航槽中线平均距离变化

表1 滩面坡度变化

统计内容	航道南侧			航道北侧		
	2009年2月 平均坡度/‰	2010年11月 平均坡度/‰	平均坡度变化量/‰	2009年2月 平均坡度/‰	2010年11月 平均坡度/‰	平均坡度变化量/‰
航槽边线~300 m	3.3	21.3	18.0	8.8	20.7	11.9
300~600 m	3.7	5.5	1.8	1.4	4.1	2.7
600~900 m	4.2	4.8	0.6	1.1	1.7	0.6

注: 300 m、600 m以及900 m均指距航槽中线的距离。

从挖槽后水流与河床横向变化趋势可以判断, 随着航槽开挖深度的增加, 航槽附近区域滩面冲刷幅度较远处区域大, 必将引起航槽两侧滩面坡度增加, 这也正是导致目前北槽航槽两侧滩面横向坡度逐渐增大的主要原因。

4) 河床冲刷总量显著增加。

12.5 m航槽开挖后, 不仅引起新建丁坝工程

以外区域冲刷, 而且还增加了新建丁坝工程区域内的冲刷幅度, 河床冲刷总量显著增加。无12.5 m航槽开挖条件时(图9), N3~N6丁坝之间河床平均冲刷幅度约0.5 m, 但存在12.5 m航槽开挖条件时, N3~N6之间河床平均冲刷幅度超过1 m。按图中冲刷量统计, 在仅有新建丁坝工程作用时, 航槽以外河床冲刷总量约为3 300万

m<sup>3</sup>; 当增加12.5 m航槽开挖条件时, 航槽以外河床冲刷总量增加至约9 300万m<sup>3</sup>, 约为前者2.8倍。

#### 5) 河床调整持续时间增长。

长江口12.5 m深水航道开通以前, 每期(一期工程、完善段工程以及二期工程)工程实施后, 北槽河床调整主要集中在工程实施后的半年内, 但12.5 m航槽挖通后, 北槽河床调整持续时间明显增加, 至2011年2月, 也就是工程实施后2 a, 北槽河床仍在继续调整。由图10可见, 在目前工程条件下, 从2011年2月—2013年2月, 北槽河床冲刷量仍高达约2 000万m<sup>3</sup>, 其变化趋势仍与上述4个特征一致。

通过以上分析可见, 12.5 m航槽开挖对北槽河势变化产生了显著影响, 是引起2009年以后北槽河势显著变化的一个主要因素, 因此在分析、评价北槽深水航道以及其它相关的航道整治工程治理效果时, 应充分考虑航槽开挖所带来的影响。

## 5 结语

1) 当航槽开挖深度从10 m增加至12.5 m, 北槽内水流运动发生较大变化: 横向上, 航槽内及靠近航槽区域流速增加显著, 距航槽越远流速增加越小, 当距离超过一定值后, 流速不增甚至减小; 纵向上, 北槽全河段主槽流速增加, 航中流速平均增加约0.22 m, 最大增加约0.35 m。

2) 对于北槽航槽开挖引起的槽内水流变化, 除乐培九公式与实测结果较为一致外, 其它各家公式计算值均偏小, 可能与其采用概化水槽试验引起的槽内引流不足有关。

3) 12.5 m航槽开挖是引起2009年以后北槽河势显著变化的一个主要因素。12.5 m航槽开挖后, 北槽河床冲刷区域纵向范围扩大; 河床冲刷幅度横向分布不均匀, 距航槽越近冲刷越显著; 航槽两侧边滩横向坡度增加明显; 河床冲刷总量显著增加以及河床调整持续时间增长。

## 参考文献:

[1] 陈志昌, 乐嘉钻. 长江口深水航道整治原理[J]. 水利水

运工程学报, 2005(1): 1-7.

- [2] 韩玉芳, 陈志昌. 丁坝群在调整宽浅河床地形中的作用[J]. 水利水运工程学报, 2004(2): 23-28.
- [3] 王兆华, 杜景龙. 长江口深水航道一、二期工程建设以来北槽河段的冲淤演变[J]. 海洋通报, 2006, 25(6): 55-62.
- [4] Hydraulics Research Station Wallingford Laboratory. Studies of Flow Across Dredged Trenches(Ex618)[R]. 1973.
- [5] Boer S. The Flow Across Trenches at Oblique Angle to the Flow(Report S490)[R]. The Netherlands: Delft Hydraulics Lab, 1985.
- [6] 李安中, 孙桂生. 开敞水域斜跨挖槽内的流速折减规律研究[J]. 泥沙研究, 1993(3):51-58.
- [7] 李安中, 刘光臣, 李青云. 开敞水域中斜跨挖槽流速变化规律的试验研究[J]. 河海大学学报, 1993(1): 31-38.
- [8] 曹民雄, 应强, 孔祥柏. 河口地区航槽开挖后槽内流速的变化[J]. 海洋通报, 1997(6): 51-58.
- [9] 乐培九, 张华庆. 河口海湾地区航道挖槽回淤的估算方法[J]. 水道港口, 1993(3): 1-11.
- [10] 黄志扬, 张玮, 崔冬, 等. 开敞水域中斜跨航槽水流的流速计算[J]. 水运工程, 2005(8): 1-4.
- [11] 上海河口海岸科学研究中心. 长江口二期整治工程总平面调整试验研究报告[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2001.
- [12] 上海河口海岸科学研究中心. 长江口深水航道三期工程减淤工程措施深化研究报告[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2008.
- [13] 长江口12.5 m深水航道减淤工程方案研究清水动床物理模型试验研究[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2011.
- [14] 上海河口海岸科学研究中心. 长江口深水航道三期工程航道回淤悬沙模型试验研究[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2004.
- [15] 上海河口海岸科学研究中心. 长江12.5 m深水航道向上延伸至太仓动床物理模型试验研究[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2007.

( 本文编辑 郭雪珍 )