



京杭运河沟通钱塘江八堡船闸口门 综合整治方案^{*}

金国强¹, 史英标², 李浙江¹, 杨元平², 范大林¹

(1. 浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310030;

2. 浙江省水利河口研究院, 浙江省海洋规划设计研究院, 浙江 杭州 310016)

摘要: 京杭运河沟通钱塘江八堡船闸出口位于七堡弯道强潮河段, 水流泥沙条件极其复杂。为满足通航要求, 需要采取综合整治措施。针对河势变化、航槽水深、通航水流条件、闸下引航道泥沙淤积、出口通航保证率等问题, 采用河床演变分析、潮流泥沙数学模型计算、物理模型试验、船模及实船航行试验等综合方法和手段进行深入研究, 验证了船闸出口河段岸滩综合整治方案。结果表明: 通过清理残坝、缩短丁坝长度以及增建导航堤等工程措施, 促使航道主槽靠近船闸出口, 显著提高口门区通航保证率, 闸下引航道和口门区泥沙淤积量在可控范围。

关键词: 八堡船闸; 整治方案; 导航堤; 通航保证率; 防洪影响

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0098-08

Comprehensive regulation scheme for entrance area of Babao ship lock connecting Grand Canal and Qiantang River

JIN Guo-qiang¹, SHI Ying-biao², LI Zhe-jiang¹, YANG Yuan-ping², FAN Da-lin¹

(1.Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310030, China;

2.Zhejiang Institute of Marine Planing and Design, Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310016, China)

Abstract: The exit of the Babao ship lock connecting the Grand Canal and Qiantang River is located in the strong tidal bore reach of the Qibao bend, where the water flow and sediment conditions are extremely complex. Comprehensive regulation measures should be taken to meet the navigation requirements. In view of the river regime change, channel depth, flow conditions for navigation, sediment deposition in the downstream approach channel of the ship lock, and the navigation assurance rate at the exit of the lock, comprehensive methods and means are applied for an in-depth study, including the riverbed evolution analysis, mathematical model calculation of tidal flow and sediment, physical model test, and ship model and vessel maneuvering test. The comprehensive regulation scheme for the beach at the exit of the lock is verified. The results show that by clearing the residual dam, shortening the length of spur dikes, adding navigation dikes, and other engineering measures, we can make the main channel close to the exit of the ship lock, significantly improve the navigation assurance rate of the entrance area, and ensure that the sediment deposition in the downstream approach channel of the ship lock and the entrance area is within the controllable range.

Keywords: Babao ship lock; regulation scheme; navigation embankment; navigation assurance rate; flood control impact

收稿日期: 2022-05-05

*基金项目: 浙江省交通厅科技计划资助项目(2021026)

作者简介: 金国强(1965—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事航道工程的规划、设计与研究工作。

京杭运河是我国南北水运大通道, 是国家重点建设的高等级航道“四纵四横两网”之一纵。为了缓解京杭运河浙江段运量快速增长和航道通过能力不相适应的矛盾, 从大运河文化传承保护和利用出发, 根本上解决京杭运河堵航及杭州市河的通航瓶颈问题, 新开辟京杭运河与钱塘江沟通的第二通道^[1], 于 2017 年 10 月开工, 将于 2022 年 12 月底基本建成。杭州八堡船闸是京杭运河南端沟通钱塘江第二通道的关键节点工程, 通航内河 1 000 吨级船舶, 同时建设双线船闸, 阀室有效尺度均为长 300 m、宽 23 m、门槛水深 4.2 m, 双线合计设计年单向过闸货运量通过能力为 4 200 万 t。

八堡船闸出口位于钱塘江河口七堡弯道段, 见图 1。船闸口门河段受径流和潮水双向水流共同作用, 水动力强、含沙量高、河床冲淤幅度大, 口门处滩地宽浅、流态紊乱, 对船闸建设和通航带来挑战。国内外许多学者对干流枢纽船闸引航道水流流态、泥沙淤积等进行了大量研究,

取得了许多研究成果。李兴量等^[2]、杨东^[3]、周建军^[4]运用物理模型试验或平面二维定床水流数学模型等方法, 研究了船闸下游引航道的水流流速和流态等流场特征, 针对不利流态提出改善通航水流条件的工程措施; 方春明等^[5]利用异重流数学模型研究不同试运行阶段的三峡船闸引航道水流条件及泥沙淤积; Zhang 等^[6]研究了潮汐河口船闸下引航道的泥沙淤积问题, 分析回流、缓流、异重流的淤积模式。但针对沟通干流的侧向船闸建设与干流防洪兼顾的综合整治、口门区流态改善措施、引航道泥沙淤积预测等若干问题研究较少。本文采用潮流泥沙数学模型计算、动床河工模型试验、船模及实船航行试验等手段, 开展了钱塘江八堡船闸口门水域条件、整治方案优化、出口导航堤布置与通航水流条件、闸下引航道泥沙淤积、通航保证率等各项研究, 提出了八堡船闸口门综合整治方案, 为船闸建设提供技术支撑。



图 1 工程位置及河段形势

1 工程概况

1.1 流域情况

钱塘江是浙江省最大的河流, 全长 668 km, 流域面积 5.56 万 km²。从钱塘江中游富春江电站—萧山闻家堰与浦阳江汇合处为河流段, 动力条件以径流为主, 河床基本稳定; 从闻家堰—澉浦为过渡段, 受径流与潮流共同作用, 河床冲淤变化剧烈; 哕浦以下为潮流段, 习称杭州湾, 以潮流作用为主, 河床相对稳定。钱塘江河口纵剖

面上存在一庞大沙坎, 上起闻家堰, 下至杭州湾乍浦, 长达 130 km。

1.2 水沙特征

1.2.1 径流

钱塘江上游芦茨埠站多年平均流量 952 m³/s, 多年平均径流量约 300 亿 m³, 径流变化具有明显的年内和年际变化特征, 3—6 月或 4—7 月为梅汛期, 径流量约占全年的 70%, 大洪水主要出现在 5—7 月, 8 月—次年 2 月或 3 月为枯水期; 径流量

年际间变幅较大,最大与最小值之比达 4.15。自 1969 年富春江电站大坝建成运行以来,累积率 50% 流量约为 $640 \text{ m}^3/\text{s}$, 大于多年平均流量的累积率为 24.5%; 大于 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量的累积率为 2%。

1.2.2 潮汐潮流

钱塘江河口潮汐为非正规浅海半日潮,一天内两涨两落,大潮期潮波可达富春江电站大坝坝下。八堡船闸引航道口门附近七堡潮位站实测多年平均高潮位 4.43 m (国家 1985 高程),多年平均低潮位 3.65 m ,最大潮差 4.22 m ,多年平均潮差为 0.80 m 。船闸钱塘江侧设计最高通航水位取值 7.0 m ,最低设计通航水位取值 2.7 m 。口门附近河段潮流为往复流,涨潮流历时 $1 \text{ h } 11 \text{ min} \sim 4 \text{ h } 10 \text{ min}$,落潮流历时 $7 \text{ h } 42 \text{ min} \sim 12 \text{ h } 15 \text{ min}$ 。除梅汛期洪水外,涨潮流速大于落潮流速,落潮流速一般不超过 1.5 m/s ,与富春江电站下泄流量大小有关。2005 年 7 月大潮期水文测验表明口门上游的九堡大桥断面主槽大潮垂线涨潮流速 1.64 m/s 、落潮流速 0.84 m/s ,边滩涨潮流速为 2.27 m/s 、落潮流速达 0.51 m/s ,涨潮流速边滩大于主槽,落潮流速主槽大于边滩,落潮流归槽明显。

1.2.3 涌潮

钱塘江涌潮在澉浦一带形成,上溯过程中逐渐增强,至曹娥江口一大缺口一带最大,之后强度逐渐减弱。强潮时,涌潮潮头可上溯到闻家堰,全程约 90 km 。涌潮强弱与潮差大小密切相关,潮差大,涌潮强;潮差小,涌潮弱,七堡一带潮差若小于 1.0 m ,几乎没有涌潮现象。涌潮强度习惯上采用潮头高度表征,根据实测资料分析,二通道八堡出口附近最大涌潮高度约 2.5 m ,涌潮行进速度约 $6.0 \sim 7.3 \text{ m/s}$,涌潮及快水流速持续时间 15 min 左右;大中潮涨落急时段,过闸船舶应在八堡船闸上游约 35 km 的闻家堰以上深水区避涌潮。

1.2.4 泥沙

钱塘江流域来沙量很少,新安江、富春江电站建库后多年平均输沙量约 664.7 万 t 。河口的泥沙主要来自海域,一潮进出澉浦的泥沙在 1000 万 t 左右。澉浦以上河段,悬沙由均匀的粉沙组成,中

值粒径大多在 $0.02 \sim 0.04 \text{ mm}$,本河段床沙粒径与悬沙基本相同,其中值粒径在 $0.025 \sim 0.030 \text{ mm}$ 。二通道附近水域的含沙量变化与潮汐、潮流关系密切,潮汐大、潮流强、含沙量增大;反之潮汐小、潮流弱、含沙量变小,涨潮含沙量明显大于落潮含沙量。

1.3 河段演变

1.3.1 河段演变特征

图 2 为七堡—七格研究河段地形云图,可见八堡船闸口门河段北岸为七堡弯道凹岸,受北岸控导丁坝群作用北岸边滩发育,南岸为弯道凸岸边滩,包括径流在内的落潮流作用下,中槽成为主槽。该河段的河床演变与上游径流丰枯密切相关,年内呈“洪冲潮淤”、年际表现为“丰冲枯淤”的演变特征。1970—2019 年 4—6 月的洪汛期平均流量约 $1360 \text{ m}^3/\text{s}$,年内洪汛期河床发生冲刷,河床平均容积约 3650 万 m^3 ,汛后 7 月容积为最大,可达 5166 万 m^3 ;7—11 月平均流量减小至 $550 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,河床发生回淤致容积减小至 2722 万 m^3 ;12 月—翌年 3 月枯水潮弱,平均流量约 $690 \text{ m}^3/\text{s}$,河床处于较为稳定的微淤微冲状态,多年平均容积达 2762 万 m^3 ,年内季节性冲淤基本平衡,冲淤幅度在 $2 \sim 4 \text{ m}$ 。

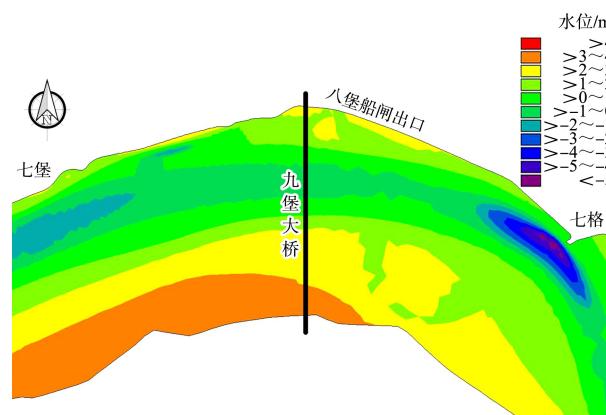


图 2 七堡—七格河段地形云图

1.3.2 河势变化规律

八堡船闸出口河段的上、下游共有 8 座长短不一的丁坝群保滩护塘。河床受七堡 1# 坝和七格下坝之间丁坝群的挑流作用,主槽偏离左岸较远,八堡船闸出口主槽离左岸平均距离达 588 m ,历年

来出口附近河段深泓线变化见图 3。受钱塘江径流丰枯变化和潮汐大中小潮变化的影响, 主槽年际变化存在靠左、中线或中偏右形态的河势, 在离左岸 220~800 m 范围内摆动。八堡出口断面离左岸 100、400 m 处河床多年平均高程分别为 2.8、0.5 m。整治前近岸 200 m 内设计低潮位 2.7 m 以下水深 3.2 m 的保证率为 0, 离岸 200~350 m 以内通航水深保证率多年平均不到 50%, 断面主槽水深保证率多年平均为 95%, 主槽通航水深保证率的高、低与不同水文年有关, 枯水年或丰转枯的第 1 年主槽通航水深保证率仅为 43%~88%。

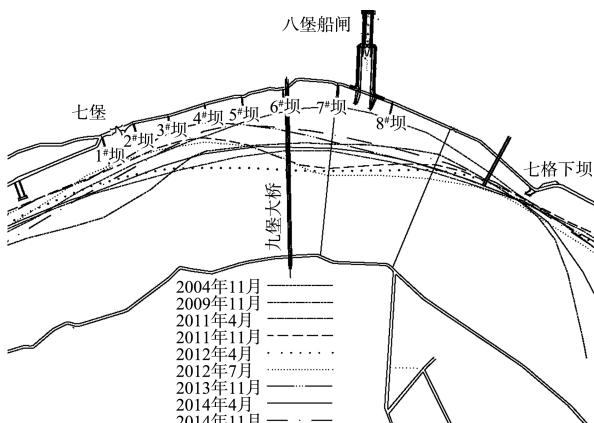


图 3 工程河段历年深泓线平面变化

2 口门整治方案

2.1 整治思路

基于船闸口门段河床演变分析和现状通航水深保证率统计, 受出口河段上下游丁坝群护堤的作用, 近岸无法满足通航水深要求, 为改善通航水深条件须采取工程整治措施。但口门整治方案实施将会影响附近河段的水流场、泥沙场及滩槽格局, 从而引起河势调整, 导致河段防洪形势的改变, 因此在研究整治工程方案时应充分考虑河段的防洪安全, 达到防洪安全和改善口门水深兼顾的目的^[7]。出口河段整治思路为: 一是清理残坝, 并适当缩短现存丁坝长度, 促使主槽靠近左岸; 二是口门建 2 条导堤伸到主槽, 在两导堤间浚深航道, 并减小引航道口门区横流。若采取以上措施主槽还不能靠近二通道出口附近, 则清除丁坝, 采用直立式加固措施加强堤脚防冲。

2.2 研究方法

在八堡船闸工程可行性研究和设计阶段, 采用了二维潮流泥沙数学模型计算、整体河工模型试验、船模及实船航行试验等多种方法研究二通道出口河段水域条件及滩槽演变规律; 优化口门整治方案, 并确定清理残坝的范围和缩短长度, 以及两条导堤的长度、方向和顶高程; 预测口门整治方案对钱塘江河口河势及防洪的影响; 研究口门通航水流条件及其闸下游引航道泥沙淤积、船舶航行安全等技术问题, 在此基础上确定口门综合整治方案。

2.2.1 潮流泥沙数学模型

建立大范围潮流泥沙数学模型, 研究分析出口河段整治方案治理效果, 包括工程影响区域的流速变化、河床冲淤变化, 并为局部数学模型和整体物理模型试验提供边界条件。模型的上边界取在富春江水库大坝坝下, 下边界为澉浦断面, 整个计算域的面积约 702 km², 引航道口门及丁坝附近区域的计算网格加密, 保证流场模拟精度, 整个计算域内共布设 1.598 1 万个三角形单元, 水流计算的时间步长为 1 s。

建立小范围局部潮流泥沙数学模型, 研究引航道出口导堤布置方案和对应口门区水流流态及泥沙淤积, 并分析整治方案实施后对钱塘江防洪的影响。模型的上边界为闻家堰断面, 下边界为仓前段, 小范围局部数模的计算网格见图 4, 计算域面积为 65.3 km², 共布设了 2.250 7 万个单元、1.171 2 万个节点, 水流计算的时间步长为 0.1 s, 计算边界条件由大范围数学模型计算提供。



图 4 小范围数模计算网格

2.2.2 物理模型试验研究

为研究出口河段整治方案的效果,建立了整体物理模型。模型的上边界取在富阳,富阳以上至富春江电站用扭曲河道代替,下边界为尖山河湾廿二工段断面,模拟江道长 110 km,总水域面积 335 km²。模型平面比尺 $\lambda_L = 600$, 垂直比尺 $\lambda_h = 120$, 变率 $\eta = 5$ 。动床试验河段长 20.5 km, 面积 38 km²。

为研究八堡口门导航堤布置方案、口门区水流条件及引航道泥沙淤积,建立了局部大比尺物理模型。模型上边界在上游 6 km 钱江二桥,下边界在下游 4 km 位置,模拟江道长 10 km,总水域面积约 17 km²,平面比尺 $\lambda_L = 120$,垂直比尺 $\lambda_h = 60$,变率 $\eta = 2$ 的小变率模型。

2.2.3 船模航行试验研究

通过在正态河工模型上进行单船、拖带船队

船模航行试验,研究船舶通过八堡船闸口门、九堡大桥区域的安全航线和操控技术指标,评估通航条件,为船舶安全通航提供技术参数。选定模型几何比尺为 $\lambda_L = \lambda_h = 60$ 、变率 $\eta = 1$ 的正态模型。模拟水域全长约 3.35 km、宽 1.7 km,上边界距船闸口门 2 km,下边界距闸口门 1.35 km,在船模研究区域布置 4 个水位站点和 3 个测流断面,各断面选取 8 个流速代表点进行流速率定,模型布置见图 5。采用梯级恒定流进行船模试验,并由小范围局部潮流数学模型计算提供相应组次的水流边界条件,利用数模计算成果对代表点的水位、流速、流向进行模型试验调试率定,率定结果表明:288 个涨落潮垂线平均流速数据中相对误差小于 10% 的占 84%,大于 20% 的仅占 3%;潮位误差均在 0.10 m 以内。综上,模型达到了较高的率定精度,基本达到了流场相似的要求,可进行船模航行试验。

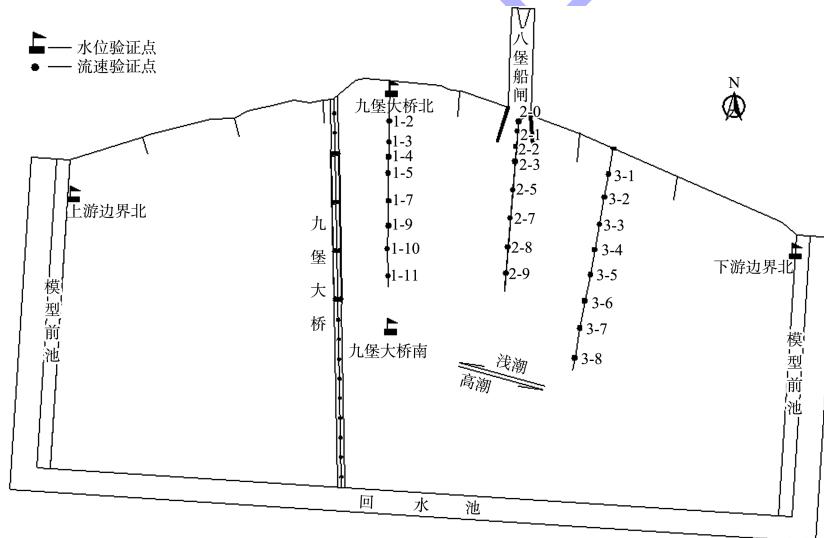


图 5 船模航行试验布置

2.3 整治方案试验研究

2.3.1 出口段整治方案

为了能改善八堡船闸出口水深条件满足船舶通航要求,又能确保防洪、海塘安全,利用潮流泥沙数学模型计算、整体河工模型试验等方法对清理残坝、清理残坝并适当缩短丁坝、清除丁坝等多个整治方案进行了试验研究,从对防洪影响、口门水深改善效果及技术经济等综合比选得到出

口河段整治方案的推荐方案,即清理残坝下的块石(高程-5.0~ -2.0 m),1#坝缩短到 200 m,5#、8#坝大幅度清理残坝并缩短丁坝至长度 100 m,见图 6。该方案实施后在典型小洪水作用下八堡出口附近-0.5 m 以上边滩宽度约 180 m,与现状相比口门附近边滩宽度减小了 200~250 m,基本达到整治目的,再采用 2 条短导航堤与主槽连接,可进一步提高口门水深保证率^[8]。

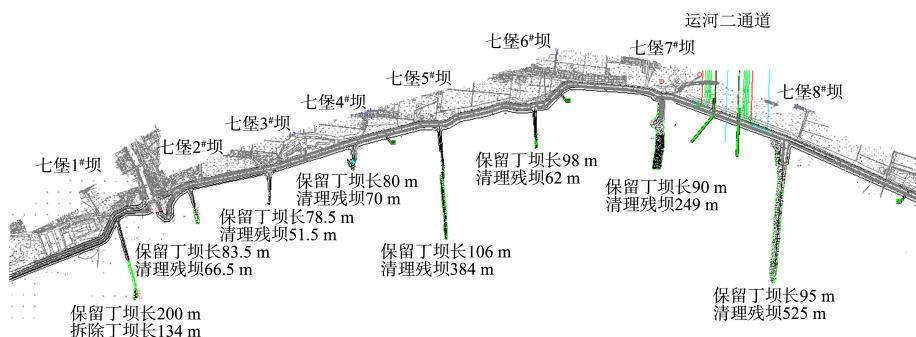


图 6 八堡船闸出口河段整治方案

2.3.2 船闸口门导航堤布置方案

在推荐口门河段整治方案的基础上, 采用局部泥沙数学模型计算、大比尺定床和局部动床河工模型试验口门导堤平面布置方案进行分析, 各口门布置方案见图 7。

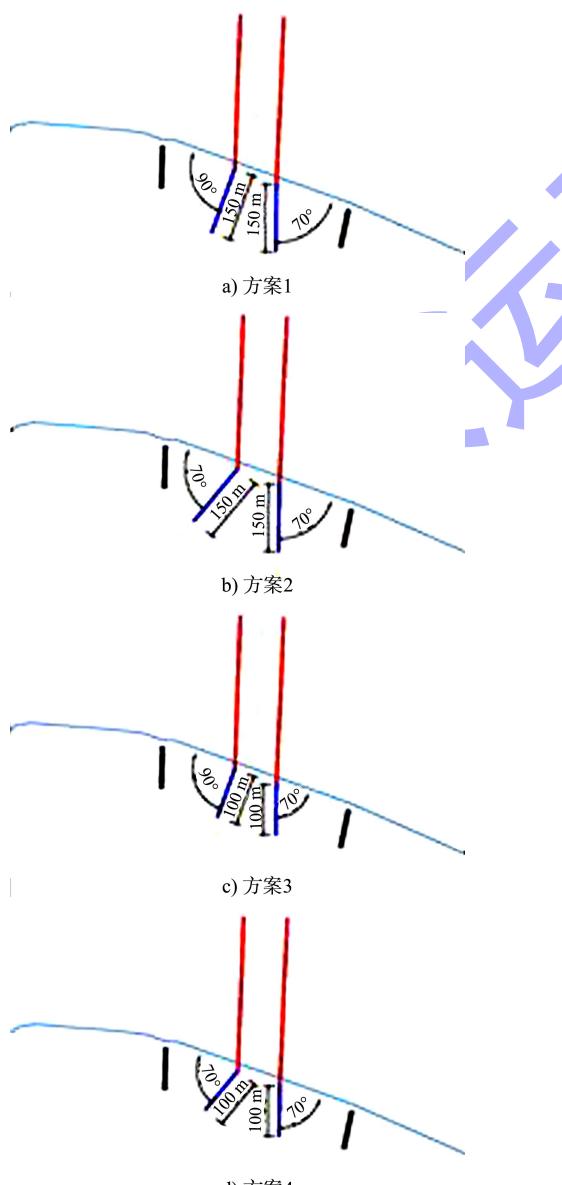


图 7 口门导堤布置方案

针对导堤方向(70° 、 90° 及 110°)及导堤长度(50、100、150 m)等不同组合进行流场分布、水动力影响、横向流速大小及持续时间、船舶航行安全、引航道泥沙淤积、口门水深条件等多指标综合比较。导堤方向比较结果表明: 方案 1~4 口门附近流速分别增加 20%~23%、15%~20%、16%~20%、10%~15%, 方案 2、4 的导堤方向对口门外水域流场的影响相对较小, 各方案横向流速小于某级流速的持续时间总体无本质差异, 考虑到导堤方案 4 口门宽度略大于方案 3, 转弯半径大于方案 3, 有利于船只安全进出口门, 但其下游引航道口门区丰水年泥沙淤积量稍大于方案 3, 在丰水条件下 15 d 的淤积量分别为 0.30、0.42 m, 枯水水文年差异不大。导堤长度比较结果表明: 两种导堤长度方案口门附近的横向流速差异不大, 长度 150、100 m 的方案引航道口门内泥沙淤积强度差异不大, 口外 15 d 的泥沙淤积厚度 100 m 方案比 150 m 方案大 20~30 cm, 总体上长度 150 m 方案的泥沙淤积强度略小。综合导堤长度和方向的比选结果, 推荐上游导航堤长度 150 m、方向与上游岸线夹角 70° , 下游导航堤长度 150 m, 与下游岸线成 70° 的八字形布置方案 2。

2.3.3 引航道口门区通航水流条件分析

采用平面二维局部水流数学模型和物理模型试验、船模航行试验及实船航行试验对丰、平、枯 3 种典型地形与富春江电站下泄流量为 4 500、952、300 m^3/s 和下边界为 5%、10%、50% 和 90% 潮差保证率的潮位过程等组合条件下的口门区的水流流态进行模拟分析, 口门区航线上的代表点位见图 8。图 9 给出了丰水(2002 年 7 月)地形、上游不同下泄径流和 10% 潮差保证率组合条件下

引航道口门区代表点的纵、横向平均流速。分析结果表明：在导堤布置方案实施后，口门前沿涨、落潮流速增加 10%~15%，口门内存在回流，但回流流速满足规范要求；口门区横向流速在枯水年水文条件下几乎全潮过程满足规范要求；丰水年水文条件下横向流速满足规范要求即小于 0.3 m/s 的时间较短，口门区的水流流态对船舶安全航行影响较大，需通过船模和实船航行试验确定口门区可通航流速大小。船模和实船航行试验结果表明，船舶进出口门限制流速落潮流速应小于等于 1.2 m/s，涨潮流速应小于等于 1.5 m/s^[9]，除了汛期大流量和大中潮涨落急时段外，均可满足。

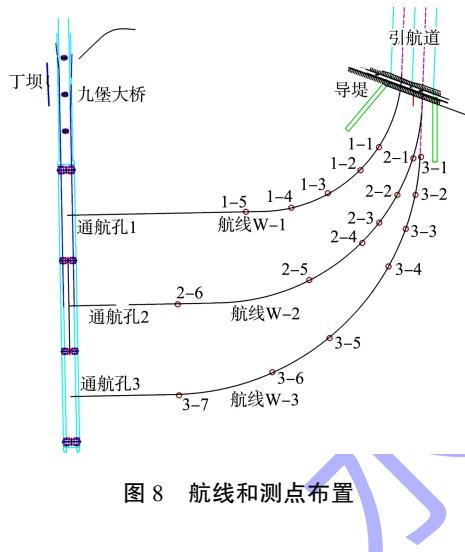


图 8 航线和测点布置

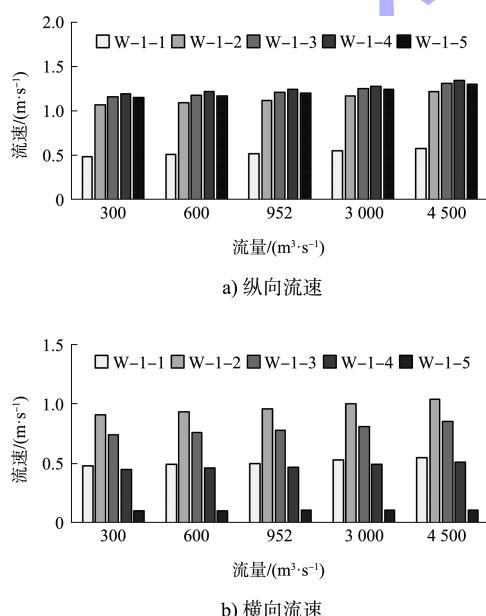


图 9 丰年(2002 年 7 月)潮差保证率 10% 和不同流量下引航道口门区代表点平均流速

2.3.4 阀下引航道和口门区泥沙淤积分析

阀下引航道泥沙淤积主要由口门区的回流淤积、涨落潮挟沙水流引起的缓流淤积以及清浑水密度差导致的异重流淤积等 3 部分组成。利用口门附近河段实测水沙资料建立潮差与流速及含沙量的相关关系，以洪水期水文测验成果建立洪水期上游下泄流量与流速及含沙量相关关系，分别计算丰、平、枯典型水文年下上述 3 部分泥沙淤积量。预测计算结果表明：2002 年典型丰水年洪水淤积量为 11.4 万 m³，潮水淤积量为 28.2 万 m³，全年泥沙淤积量为 39.6 万 m³；2008 年典型枯水年洪水淤积量为 1.9 万 m³，潮水淤积量为 4.5 万 m³，全年泥沙淤积量为 6.4 万 m³；2000 年典型平水年洪水淤积量为 6.4 万 m³，潮水淤积量为 17.2 万 m³，全年泥沙淤积量为 23.5 万 m³。计算典型年内各月淤积量分布见图 10，年内 6—10 月是淤积量最大时期，占全年淤积量的 2/3~3/4，其中 6—7 月淤积主要由汛期洪水引发，8—10 月则主要是潮流淤积，应根据工程河段水文情势合理安排疏浚。

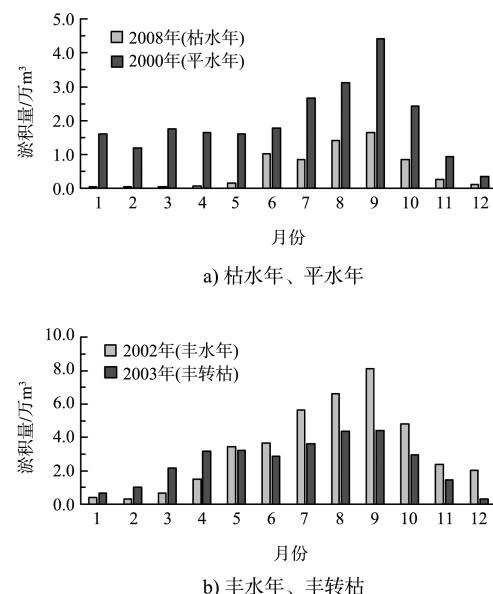


图 10 典型年引航道泥沙淤积量的逐月分布

2.4 出口通航保证率

在分析船闸口门区水深、流速、涌潮、洪水等因素对通航保证率影响的基础上，统计了口门区丰、平、枯典型水文年的通航保证率。八堡船闸口门主槽通航水深保证率多年平均为 96.4%，

丰水年和平水年主槽通航水深保证率可达 100%, 枯水年不利年份为 84%~88%; 径流流量大于 4 000 m³/s 的累积率为 1.9%, 钱塘江禁航; 避涌涨落急时段所减的保证率为 6.4%; 引航道口门至主槽约 100 m 范围在不利年份需适时疏浚以满足通航水深要求, 综合分析得出口门区满足船舶安全通航要求的通航保证率多年平均约为 88.1%, 总体上达到整治目标预期。

2.5 防洪影响及补偿措施

二通道八堡船闸出口整治方案实施后, 遭遇 100 a 一遇洪水时, 钱塘江河口左岸塘前滩地最大冲刷幅度达 7.0 m, 其可能出现的范围为 8#坝—七格下坝; 其余堤段冲刷幅度为 0.2~1.4 m; 钱塘江右岸九上顺坝段塘前滩地冲刷幅度为 0.4~1.3 m。依据影响程度及范围, 对北岸标准海塘 8#坝—七格下坝段长 1.78 km 的区段采取重点区段加固, 对左岸 1#坝—7#坝段长约 2.66 km 的区段采取次要区段加固, 对七堡 1#坝至上游约 1.52 km 及七格下坝段的区段采取一般区段加固, 并对受影响的丁坝及九上顺坝区段采取加固措施。对重点区段的防治加固措施, 推荐采用密距短丁坝群的防冲保护方案, 其余区段采用短板桩与水平防护相结合的加固方案, 通过海塘加固补偿措施, 实现改善口门水深和防洪安全兼顾的目标。

3 结语

1) 八堡船闸口门钱塘江段河床年内呈洪冲潮流、年际丰冲枯淤, 丰水年大冲大淤、枯水年小冲小淤的冲淤演变特征, 在径潮流和丁坝群作用下深泓线离左岸 220~800 m 范围内摆动, 需通过整治工程措施改善船闸口门水深条件。

2) 通过清理残坝、缩短丁坝长度的八堡船闸口门钱塘江段整治方案, 可显著减小边滩宽度, 主槽靠近口门; 再采用短导航堤与主槽连接, 可进一步提高口门水深保证率, 导航堤长度和方向与整治后的丁坝长度、边滩宽度相关, 并应符合船舶航行轨迹要求。

3) 通过平面二维潮流数学模型计算和物理模型试验、船模及实船航行试验对口门区的水流流态进行了模拟分析, 提出船舶进出口门涨落潮限制流速; 预测了不同水文年闸下引航道的泥沙淤积量, 丰水年显著大于枯水年, 应根据水文情势合理安排疏浚。

4) 整治后引航道口门通航保证率基本达到正常通航要求, 不利年份口门至主槽约 100 m 范围内须适度疏浚以提高口门通航保证率。

5) 八堡船闸口门综合整治工程实施后, 遭遇 100 a 一遇洪水时, 出口上下游一定范围内防洪堤塘前滩地遭受不同程度的冲刷, 应根据影响程度对海塘采取相应的加固措施。

参考文献:

- [1] 金国强, 张一鸣, 程巍华, 等. 京杭运河(浙江段)三级航道整治工程工程可行性研究报告[R]. 杭州: 浙江省交通规划设计研究院, 2011.
- [2] 李兴亮, 陈夜鹰. 弯曲河段下游引航道口门通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2016(2): 127-141.
- [3] 杨东. 江苏泗阳船闸下游引航道非恒定流研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [4] 周建军. 内河船闸引航道尺度与通航水流条件的关系[J]. 人民长江, 1997, 28(8): 3-5.
- [5] 方春明, 李云中, 牛兰花, 等. 三峡工程临时引航道泥沙淤积数值模拟[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 320-324.
- [6] Zhang X N, YANG H, SUN B. Prediction of siltation in the downstream approach channel of tidal locks [J]. China ocean engineering, 1999, 13(3): 317-326.
- [7] 史英标, 杨元平, 程文龙. 钱塘江七格弯道段河势演变对控导丁坝的响应[J]. 浙江水利科技, 2014, 42(5): 13-18.
- [8] 杨元平, 伍冬领, 陈甫源. 京杭运河二通道出口钱塘江段治理方案动床模型试验研究[J]. 浙江水利科技, 2009(5): 15-17.
- [9] 史英标, 杨元平, 伍冬领, 等. 京杭运河浙江段三级航道整治工程八堡口门关键技术问题研究[R]. 杭州: 浙江省水利河口研究院, 2010.