



新三江船闸曹娥江侧局部动床 物理模型试验研究*

周世良¹, 王智², 王云莉¹, 张湛¹, 向美焘¹

(1. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400016;
2. 重庆交通大学, 内河航道整治技术交通行业重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 为优化新三江船闸设计, 对新三江船闸曹娥江侧局部动床开展物理模型试验研究。根据工程河段地形及工程布局, 确定模型比尺, 选取模型沙并验证模型相似性。试验采用系列年和典型洪水年的水沙条件, 对推荐方案进行局部动床冲淤试验, 研究泥沙冲淤规律及其对航道尺度和通航水流条件的影响。结果表明, 优化方案在调整下引航道口门区隔流墙为弧形渐扩喇叭状后, 船闸下引航道及口门区在不同流量工况下的通航水流条件显著改善; 系列年试验冲淤速率随年限增长而趋缓, 船闸上游河段 10 a 末冲淤速率差值缩至 0.28 万 $\text{m}^3/(\text{km}\cdot\text{a})$, 接近冲淤平衡。研究结果可为船闸设计优化与航道整治提供依据。

关键词: 动床物理模型; 泥沙冲淤; 航道尺度; 通航水流条件

中图分类号: U615

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0114-09

Physical model test of local movable-bed on Cao'e River side of Xinsanjiang Ship Lock

ZHOU Shiliang¹, WANG Zhi², WANG Yunli¹, ZHANG Zhan¹, XIANG Meitao¹

(1. Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

2. Key Laboratory of Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To optimize the design of the Xinsanjiang Ship Lock, a physical model test study is carried out on the local movable-bed on the Cao'e River side of the Xinsanjiang Ship Lock. According to the terrain of the project reach and the project layout, the model scale is determined, the model sand is selected, and the model similarity is verified. The test adopts the water and sediment conditions of a series of years and typical flood years to conduct a local movable-bed erosion and deposition test on the recommended plan, and studies the laws of sediment erosion and deposition and their impacts on the channel scale and navigable flow conditions. The results show that after the optimization scheme adjusts the diversion wall at the entrance of the lower approach channel to an arc-shaped gradually expanding trumpet shape, the navigable flow conditions of the lower approach channel and the entrance area of the ship lock under different flow conditions are significantly improved. The erosion and deposition rate in the series-year test tends to slow down with the increase of years. The difference in the erosion and deposition rate at the end of 10 years in the upstream reach of the ship lock is reduced to 2,800 $\text{m}^3/(\text{km}\cdot\text{a})$, approaching the erosion and deposition balance. The research results can provide a basis for the design optimization of the ship lock and the regulation of the waterway.

Keywords: movable-bed physical model; erosion and deposition; channel scale; navigable flow condition

收稿日期: 2024-12-29

*基金项目: 科技局青年项目(CSTB2024NSCQ-MSX0824)

作者简介: 周世良(1972—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 研究方向为水工结构。

在国家“长江经济带”“建设交通强国”“长三角区域一体化发展”等战略背景下,水运工程建设意义深远。杭甬运河三级航道整治工程作为浙江省内河水运项目,其滨海连接线及新三江船闸工程更是重中之重。滨海连接线是沟通曹娥江与杭甬运河的省骨干航道,对区域产业布局与经济发展支撑显著,于“十四五”规划中占据重要地位。当前内河航道建设蓬勃发展,众多工程相继启动或推进,在此契机下,启动滨海连接线工程研究、优化新三江船闸设计迫在眉睫。曹娥江作为钱塘江主要支流,兼具多种特性,其水文泥沙条件复杂,受潮汐、径流交互影响,河口建闸前后水动力与泥沙输移改变巨大^[1]。本研究聚焦新三江船闸曹娥江侧局部动床物理模型试验,旨在多维度剖析工程河段特性与优化方案,探究新建枢纽及不同流量下曹娥江侧出口滩地冲淤机制,通过系列试验提炼泥沙冲淤规律,为船闸优化布局与局部整治提供科学支撑,增强工程抵御冲淤风险能力^[2-3],提升航道运行可靠性与维护效率^[4-5],保障船闸通航安全高效^[6],提升船闸综合运行品质与区域水运竞争力,助力构建现代化内河水运体系。

1 工程概况

新三江双线船闸雄踞滨海连接线与曹娥江汇口,由上下引航道、闸首与闸室构成,闸室尺度 $230\text{ m}\times 25\text{ m}\times 4.5\text{ m}$ 。曹娥江干流长 197.2 km ,平均比降 3.0‰ ,为钱塘江关键支流。其上游源起磐安县尚湖镇城塘坪长坞,属山溪性河流,水流湍急、河谷深切^[7];下游于绍兴市域内长 156.6 km ,流域面积 $5\,169.8\text{ km}^2$,占全市 62.6% 。

设计方案的布置:模型模拟平原侧运河中心线长 9.14 km ,含规划的滨海连接线运河(6.732 km)和已建杭甬水运河(2.408 km)。新三江船闸上引航道导航调顺段长约 335 m ,停泊段长度为 240 m ,按航道左、右两侧各2艘船并行对靠设计,停泊段宽度 125 m ,停泊段上游制动段长度为 320 m ,连接段航道长度约为 980 m ,连接段航

道底宽为 $45\sim 125\text{ m}$ 。曹娥江侧船闸下游航道主要沿河道主流位置走向布置,在世纪大桥上游布置河道左岸,在世纪大桥桥区河段,航道逐渐从河道左岸(大桥上游)过渡至河道右岸(大桥下游)位置,大桥通航孔布置于河道中部,航道的宽度为 110 m ,航道最大水深按 3.20 m 进行设计,最低航道河床高程为 -1.07 m 。

设计方案的不足:船闸下引航道口门区及连接段航道中心线与来流垂直,船舶进出闸受影响;下游曹娥江大闸敞泄时,部分河段流态不良,船舶航行困难;船闸下引航道口门区最大横向流速达 0.90 m/s ,调整航线后仍有超标情况,船舶进闸操作困难,易发生危险。

优化方案的布置:缩短下引航道口门区下游侧隔流墙长度约 72 m ,将外侧约 35 m 直墙迎水墙截面改为弧形面与强排泵站右侧隔流墙衔接,形成弧形渐扩喇叭状隔流墙,这样使得下引航道口门区下侧隔流墙为弧形渐扩喇叭,调顺水流的同时增大船舶进闸抵抗横流的操纵空间。

2 动床物理模型的设计与验证

2.1 模型设计要点及模型比尺

曹娥江侧试验河段地理与工程布局复杂^[8]。模型范围的确定紧密围绕新三江船闸及其周边的工程布局和河道地形,新三江闸汇流口上下游河道形态多变,转角近 90° 。依船闸与航道规划,模型(图1)试验的动床范围为:新三江船闸口门至越东路连接线上游 2.165 km 处(长约 3.6 km ,全河道横向);引航道口门至世纪大桥上游 710 m (长约 2.0 km ,模拟左侧主流与航道)。动床模型主要模拟曹娥江侧试验研究范围,模型范围同定床试验范围:河道方向汇流口上游 5.2 km (袍江大桥上游约 330 m)和汇流口下游 3.8 km (世纪大桥下游约 800 m),合计模拟曹娥江侧原型河道总长约 9.0 km 。

模型变率与原型河道宽深比相关,为保证水流运动相似性,需使模型变率在合理范围内;模型最小水深须大于 1.5 cm ,以避免水深过浅导致表面张力对水流产生较大影响;模型水流雷诺数

须大于 1 000, 确保模型水流处于紊流状态, 与天然水流结构相似。综合新三江船闸曹娥江侧水沙运动特性、河床冲淤规律、新三江船闸布置、曹娥江段航道规划及本场地、设施等具体情况, 选定模型的平面比尺为 $\lambda_L=150$, 竖向比尺为 $\lambda_h=50$, 变率为 3。

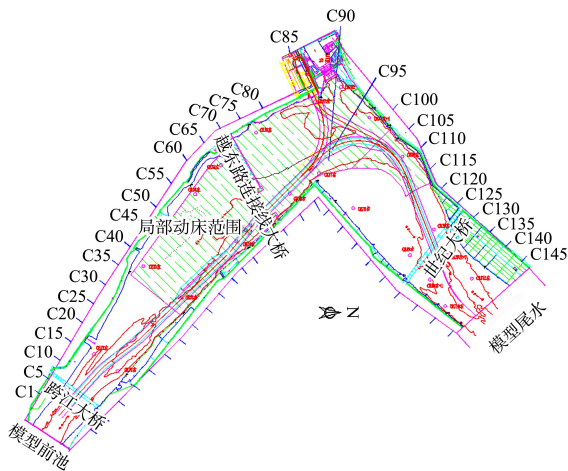


图 1 曹娥江动床模型平面布置
Fig.1 Plan layout of movable-bed model of Cao'e River

2.2 模型沙选择

本试验河段河床质中值粒径为 0.05 mm, 原型沙起动流速采用张瑞瑾公式和窦国仁公式^[9]分别计算, 具体的计算成果见表 1。

表 1 原型沙起动流速计算成果
Tab.1 Calculation results of prototype sand incipient velocity

水深/m	起动流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	张瑞瑾公式	窦国仁公式	平均值
2	0.468	0.479	0.476
3	0.497	0.515	0.508
4	0.518	0.546	0.534
5	0.536	0.575	0.556
6	0.551	0.602	0.576
7	0.564	0.628	0.595
8	0.576	0.654	0.612

模型沙的选择基于对其基本物理特性的考量, 比重、干容重及其性能的稳定性是关键因素。这些特性直接决定了模型沙在启动流速、沉速、水流挟沙力、河床冲淤方面相似比尺的确定。由于目前以底沙或悬沙运动为主的河工泥沙动床模型

多选用比重远小于天然沙的轻质材料加工成模型沙, 在综合对比电木粉、煤粉、木屑、塑料沙、粉煤灰等多种模型沙后, 根据本试验的具体需求, 选择性能比较稳定的塑料沙(中值粒径 $d_{50}=0.019\text{ mm}$, 密度 $\rho_s=1.15\text{ t/m}^3$, 干密度 $\rho'_s=0.69\text{ t/m}^3$)作为模型沙。模型沙起动特性试验在长 6 m、宽 0.25 m、高 0.25 m 的变坡水槽内进行, 流量采用高精度流量计控制, 试验水深范围为 3.4~15.6 cm。根据水槽试验结果, 得到模型沙在不同水深时的起动流速(少量动时), 见表 2。原型沙及模型沙起动相似计算成果见表 3。

表 2 模型沙起动流速
Tab.2 Incipient velocity of model sand

水深/cm	起动流速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
5.00	6.60
6.67	6.78
8.33	7.03
10.00	7.13
11.67	7.31

表 3 起动流速相似计算成果
Tab.3 Calculation results of similarity for incipient velocity

原型水深/m	原型流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	模型水深/m	模型流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	模型沙起动流速比尺
3	0.508	0.050	0.066 0	7.70
4	0.534	0.067	0.067 8	7.88
5	0.556	0.083	0.070 3	7.92
6	0.576	0.100	0.071 3	8.08
7	0.595	0.117	0.073 1	8.13

注: 原型沙 $d_{50}=0.033\text{ mm}$; 模型沙 $d_{50}=0.019\text{ mm}$ 。

可见, 当原型水深 3~7 m(模型相应水深 0.050~0.117 m)时, 模型沙起动流速比尺为 7.70~8.13, 与流速比尺的偏差小于 10%, 满足相关规范要求。

2.3 模型相似性验证

河道水面线相似的本质是河床糙率的相似, 为满足模型水流条件相似的要求, 保证模型与原型阻力相似, 须对模型进行水面线验证试验。因此对模型进行水面线验证试验、断面垂线流速分布验证、泥沙冲淤验证, 动床冲淤验证典型断面对比见图 2。

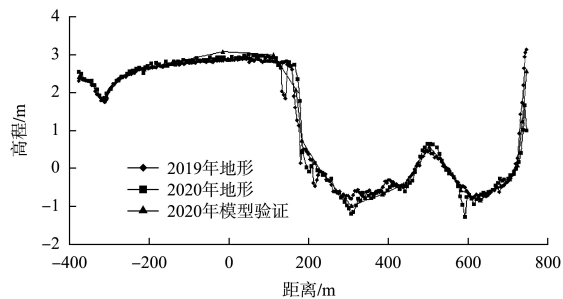


图2 动床冲淤验证典型断面对比
Fig. 2 Comparison of typical cross-sections for verification of movable-bed erosion and deposition

动床验证试验成果表明,2019—2020年,动床试验河段原型表现为新三江闸以上河段冲刷,原型冲刷14.29万 m^3 、淤积4.09万 m^3 ,模型对应12.89万与4.55万 m^3 ,误差分别为9.79%与11.25%,冲淤部位、范围与分布高度一致,有力地证明了模型冲淤与原型相似,为航道整治方案试验筑牢基础。

3 曹娥江侧局部动床试验

3.1 水沙条件

考虑到工程河段曹娥江大坝运行缺少洪水年的水沙过程,为提高模型试验成果的合理性和可靠性,动床试验进行了实测系列年(2010—2019)+典型洪水年的河床冲淤试验,见表4。

表4 动床试验系列年来水来沙过程特征值
Tab. 4 Characteristic values of water and sediment processes in movable-bed experiment in series years

年份	最大流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最大含沙量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	年输沙量/万t
2010	1 580.1	0.720	4.12
2012	1 580.1	0.325	14.65
2013	2 549.1	0.164	38.80
2014	2 549.1	1.130	97.81
2015	2 549.1	0.426	73.78
2016	3 300.0	0.347	60.69
2017	2 549.1	0.167	41.37
2018	2 549.1	0.338	35.74
2019	2 549.1	0.102	25.15

考虑到系列年试验放水流量较小,最大流量为3 300 m^3/s ,增设4级典型频率洪水流量的泥沙冲淤试验见表5,最大流量至9 903 m^3/s ,拓宽试验工况范围,深度探究洪水对工程河段冲淤影响。

表5 典型频率洪水试验工况
Tab. 5 Test conditions of typical-frequency flood

频率 $P/\%$	天数/ d	曹娥江流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	放水时间/ min	模型加沙量/ kg	尾门 水位/m
—	2	5 000	9.60	10.39	3.90
20	1	7 420	4.80	7.71	4.75
10	1	8 963	4.80	9.32	5.13
5	1	9 903	4.80	10.29	5.24

3.2 推荐方案系列年局部动床冲淤试验

3.2.1 泥沙冲淤地形变化过程

系列年试验精准呈现不同年末(3 a末、5 a末、10 a末)工程河段从模型照片到断面变化,系列年水沙过程后典型断面河道地形变化见图3。

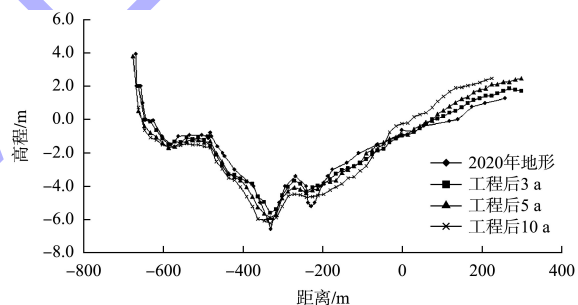


图3 系列年水沙过程后典型断面河道地形变化
Fig. 3 Changes in river channel topography of typical cross-sections after water and sediment processes in series years

3.2.2 泥沙冲淤量

系列年不同时段、不同河段河床冲淤量见表6。

精确统计船闸上下游及口门区连接段各时段冲淤量,揭示其冲淤趋势差异。从表6可以看出,船闸上游河段10 a末渐趋冲淤平衡,冲淤速率差值缩至0.28万 $\text{m}^3/(\text{km} \cdot \text{a})$;口门区及连接段河段10 a末接近平衡但冲淤速率略高;下游河段则从微淤转冲刷,速率差值变化反映其冲淤态势演变。

表 6 系列年不同时段河床冲淤量

Tab. 6 Erosion and deposition volumes of riverbed at different periods and river sections in series years

河段	河段运行时段	冲淤量/(10 ⁴ m ³)	单位河长冲淤量/(10 ⁴ m ³ ·km ⁻¹)	冲淤速率/(10 ⁴ m ³ ·km ⁻¹ ·a ⁻¹)
船闸上游 (CS36~CS84)	3 a 末	83.02/-116.39	28.01/-39.37	9.34/-13.12
	5 a 末	93.27/-120.89	31.47/-40.79	6.29/-8.16
	10 a 末	95.93/-122.33	32.36/-41.27	3.24/-4.13
船闸下游 (CS100~CS116)	3 a 末	50.36/-50.08	52.46/-52.17	17.49/-17.39
	5 a 末	51.31/-53.55	53.45/-55.57	10.69/-11.11
	10 a 末	48.24/-60.96	50.25/63.50	5.03/-6.35

注：表中“+”表示淤积，“-”表示冲刷。

3.2.3 泥沙冲淤分布

冲淤河道地形与试验初期差值等值线变化云图见图 4。依据等值线精准剖析各河段冲淤部位，船闸上游越东路大桥附近、下游航道及边滩等冲淤特征各异，明确泥沙在河道不同区域冲淤规律，受周边桥梁桥墩布局与水流交互影响显著。

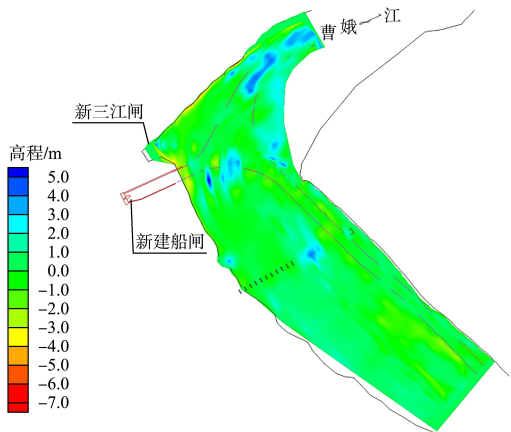


图 4 冲淤河道地形与试验初期差值等值线变化云图 (10 a 末)

Fig. 4 Cloud map of contour changes in the difference value between erosion and deposition river terrain and initial test stage (at the end of 10 years)

3.2.4 泥沙冲淤深度

分段量化各河段不同年末最大冲淤深度，船闸上游 5 a 末后冲淤渐稳；口门区受多因素作用冲淤复杂，10 a 末冲刷加深；下游受河势枢纽影响，边滩淤积与深槽冲刷加剧，见表 7。

表 7 系列年不同时段河床最大冲淤高度
Tab. 7 Maximum erosion and deposition heights of riverbed at different periods in series years

时段	最大冲淤高度/m		
	船闸上游河段 (CS36~CS84)	船闸河段 (CS84~CS100)	船闸下游河段 (CS100~CS116)
3 a 末	3.05/-2.87	5.48/-3.36	4.68/-4.22
5 a 末	4.16/-3.05	6.06/-3.46	4.52/-5.11
10 a 末	4.20/-3.07	5.80/-3.59	5.44/-5.31

3.3 推荐方案典型频率洪水过程冲淤试验

3.3.1 泥沙冲淤过程

全面展示典型频率洪水各流量工况下工程河段从模型照片、云图到断面及深泓线变化的冲淤演变全程，与系列年试验对照，凸显洪水对河道冲淤作用特性及差异，典型频率洪水动床试验河床深泓线纵向变化见图 5。

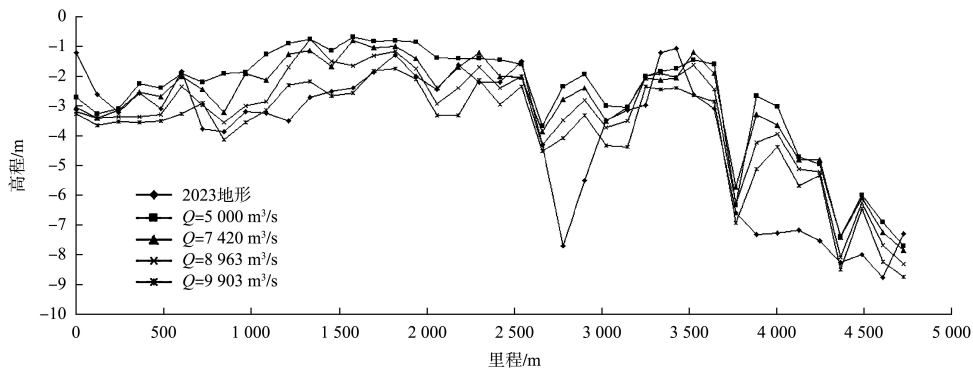


图 5 典型频率洪水动床试验河床深泓线纵向变化

Fig. 5 Longitudinal changes of riverbed thalweg line in movable-bed test of typical-frequency flood

3.3.2 泥沙冲淤量

新三江船闸建成后，遇曹娥江典型频率洪水不同流量时：船闸上游河段以冲刷为主；下引航道口门区及连接段河段微淤；下游河段以冲刷为主。且上游河段的冲淤量小于下引航道口门区和连接段以及下游河段，而下游河段的冲淤量略大于下引航道口门区和连接段。此外，随着洪水流量的增加，工程河段各段的单位河长冲淤量均呈增加趋势，且上游河段的单位河长冲淤量明显小于下引航道口门区和连接段河段以及船闸下游河段。工程河段典型洪水过程单位河长泥沙冲淤量变化见图 6。

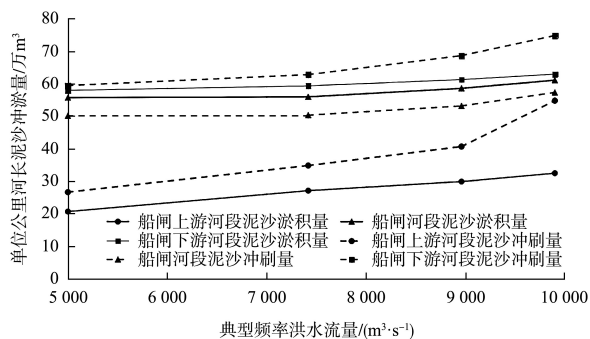


图 6 典型洪水水沙过程单位河长泥沙冲淤量变化
Fig. 6 Variation of erosion and deposition quantity per unit river length during water and sediment process of typical flood

3.3.3 泥沙冲淤分布

工程河段典型年频率洪水流量水沙过程河道地形及冲淤变化等值线图见图 7。

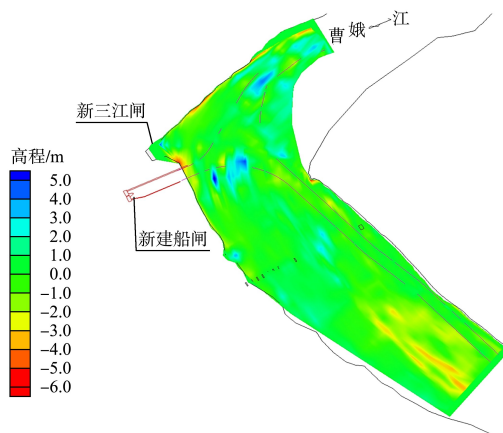


图 7 冲淤河道地形与试验初期差值等值线云图 ($Q=9\,903\text{ m}^3/\text{s}$)
Fig. 7 Cloud map of contour changes in difference value between the erosion and deposition river terrain and initial test stage ($Q=9\,903\text{ m}^3/\text{s}$)

从试验成果照片及等值线图可知，典型年频率洪水流量水沙过程对工程河段的河床冲淤作用位置基本相同，由于典型频率洪水较大，泥沙冲幅值和范围相对较大。

3.3.4 泥沙冲淤深度

典型频率洪水过程工程河段最大冲刷、淤积深度统计结果见图 8。

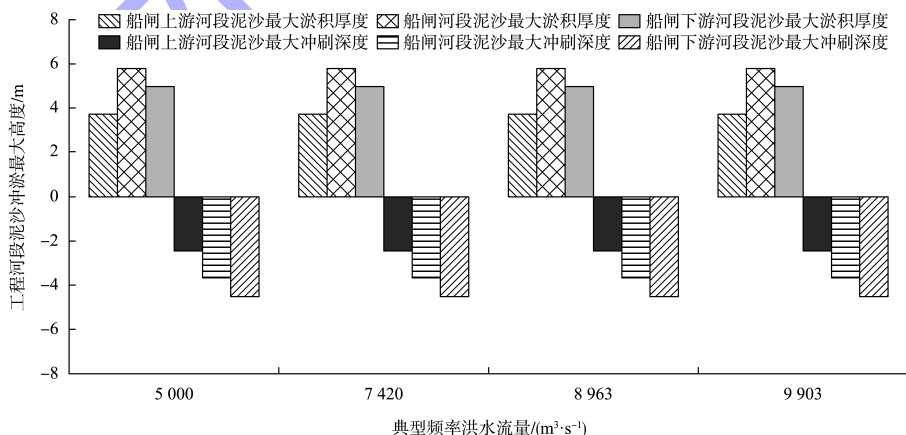


图 8 典型频率洪水河床最大冲淤高度
Fig. 8 Maximum erosion and deposition height of riverbed under typical-frequency flood

工程河段泥沙最大淤积、冲刷厚度随频率洪水流量增加而增大，船闸下引航道口门区及连接段淤积明显，下游河段冲刷强 4 级典型频率洪水

流量后，各河段最大淤积、冲刷厚度数据分别为：上游河段 5.06、5.40 m，船闸河段 6.26、4.34 m，下游河段 5.22、5.92 m。

3.3.5 工程河段河道地形泥沙冲淤变化规律

在系列年和典型频率洪水流量水沙条件下,工程河段主要呈现出深槽冲刷和边滩淤积的规律,由于系列年水沙过程最大流量为 3 300 m³/s,较典型年流量小了 1 700~6 603 m³/s,典型年泥沙最大冲淤范围和幅值大于系列年试验成果,分别见图 9、表 8。

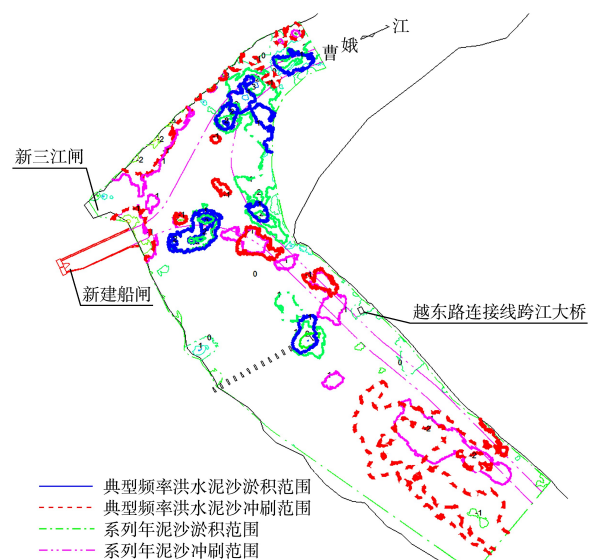


图 9 典型年泥沙冲淤范围 ($Q=9\,903\text{ m}^3/\text{s}$) 与系列年试验成果 (10 a 末) 比较
Fig. 9 Comparison between erosion and deposition range in a typical year ($Q=9\,903\text{ m}^3/\text{s}$) and test results of series years (at the end of 10 years)

表 8 曹娥江动床试验最大冲淤幅值成果比较
Tab. 8 Results comparison of maximum erosion and deposition amplitude in movable-bed test of Cao'e River

河段	试验名称	最高淤积厚度/m	最大冲刷深度/m
船闸上游河段	典型频率洪水试验	5.06	-5.40
	系列年试验	4.20	-3.07
船闸河段	典型频率洪水试验	6.26	-4.34
	系列年试验	6.06	-3.59
船闸下游河段	典型频率洪水试验	5.34	-5.92
	系列年试验	5.44	-5.31

由图 9 和表 8 可知,船闸下引航道口门区及连接段,典型年与系列年泥沙冲淤范围相差较小,船闸上下游段相差较大。越东路连接线跨江大桥和袍江大桥间河段,其上游受袍江大桥桥墩布置影响,过该桥后水流靠右偏中,因河段较窄流速

大,对左侧大边滩冲刷强。典型频率洪水流量下,河道主流过船闸下引航道口门区连接段后冲向左岸,加强左岸冲刷,左岸深槽冲刷、右侧淤积,航道内流速缓。船闸上游河段典型年和系列年水沙过程最大冲刷、淤积高度相差大,淤积厚度差 0.86 m,冲刷深度差 2.33 m。

3.4 泥沙冲淤对工程河段航道尺度及其通航水流条件的影响

3.4.1 系列年水沙试验过程

系列年水沙试验过程时段 3 a 末、5 a 末和 10 a 末,船闸工程河段需要疏浚的范围,疏浚最大深度、面积和泥沙方量见表 9。

表 9 系列年水沙试验过程中泥沙淤积特征参数
Tab. 9 Characteristic parameters of erosion and deposition during water and sediment test process of series years

河段	时段	最小航深/m	疏浚面积/m ²	疏浚方量/万 m ³
船闸上游河段航道	3 a 末	3.05	1.023 6	0.44
	5 a 末	2.99	1.059 0	0.06
	10 a 末	3.27	0.645 3	0.02
船闸下引航道口门区及连接段	3 a 末	1.59	6.272 0	4.09
	5 a 末	2.91	1.694 4	1.24
	10 a 末	2.85	0.885 0	0.65
船闸下游河段航道内	3 a 末	2.04	3.853 5	3.56
	5 a 末	2.03	3.183 7	2.70
	10 a 末	1.79	2.256 0	2.18

由表 9 可以看出,船闸工程河段地形在系列年冲淤过程中,船闸工程河段的泥沙疏浚量呈逐年递减的趋势,船闸工程上游段 10 a 末的平均淤积厚度为 0.03 m,已基本处于冲淤平衡状态,船闸下引航道口门区及连接段和船闸工程下游段平均淤沙厚度分别为 0.76 和 0.97 m,平均冲淤厚度在 1.0 m 内,河道冲淤还未完全平衡。

3.4.2 典型年频率洪水水沙试验过程

船闸工程河段各段需要疏浚的范围、疏浚最大深度、面积和泥沙方量见表 10。

典型频率洪水的极限冲刷对工程河段的航道河床地形的影响较大,但当典型流量 $Q\geq 7\,420\text{ m}^3/\text{s}$ 后,船闸工程河段航道内泥沙疏浚量随流量的增大呈递减的趋势,在 $Q=9\,903\text{ m}^3/\text{s}$ 时,船闸上游

段、下引航道口门区及连接段和下游段航道内平均淤积厚度分别为 0.27、0.86 和 2.45 m, 说明船闸下典型频率洪水过程对船闸下游段河床泥沙冲淤影响较大, 但船闸上游段、下引航道口门区及连接段河道地形已基本处于冲淤平衡状态。

表 10 典型频率洪水水沙试验过程中泥沙淤积特征参数
Tab. 10 Characteristic parameters of erosion and deposition during water and sediment test process of typical-frequency flood

河段	典型频率洪水流量/(m ³ ·s ⁻¹)	最小航深/m	疏浚面积/m ²	疏浚方量/万 m ³
船闸上游河段航道	5 000	2.72	17.602 7	1.69
	7 420(<i>P</i> =20%)	2.64	8.027 3	2.59
	8 963(<i>P</i> =10%)	2.79	3.074 7	0.58
	9 903(<i>P</i> =5%)	2.84	0.108 0	0.03
船闸下引航道口门区及连接段	5 000	1.99	9.689 4	8.82
	7 420(<i>P</i> =20%)	1.79	12.366 5	7.62
	8 963(<i>P</i> =10%)	2.29	9.295 0	4.18
	9 903(<i>P</i> =5%)	2.39	2.649 5	2.28
船闸下游河段航道内	5 000	2.01	1.934 1	2.56
	7 420(<i>P</i> =20%)	1.44	2.200 0	2.83
	8 963(<i>P</i> =10%)	1.69	1.217 7	2.03
	9 903(<i>P</i> =5%)	1.74	0.786 2	1.93

3.4.3 泥沙冲淤对航道通航水流条件的影响

为观测船闸工程河段泥沙冲淤对航道通航条件的影响, 对不同流量 ($Q=1\,605、5\,000、7\,420、8\,963\text{ m}^3/\text{s}$) 对应河段流场进行观测并分析。系列年冲淤试验后, $Q=1\,605\text{ m}^3/\text{s}$ 时船闸下引航道及口门区基本静水; $Q=5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时制动段静水, 口门区最大纵、横向流速有变化, 但纵向满足规范、横向小于 0.8 m/s ; $Q=7\,420\text{ m}^3/\text{s}$ 时制动段流速指标达标, 口门区最大纵、横向流速超标, 超标范围在口门区至连接段末段 70 m ; $Q=8\,963\text{ m}^3/\text{s}$ 时制动段个别点横向流速略超规范但小于 0.5 m/s , 口门区最大纵、横向流速超标。在船闸下引航道口门区连接段, 动床冲淤后流速增加, 与航道中心线交角有变化, 通航流态变差^[10]。船闸工程河段上下游河段动床冲淤后, 流速增加, 流向与航道中线交角增大, 通航水流条件变差。

4 结论

1) 调整下引航道口门区隔流墙为弧形渐扩喇叭状后, 船舶进出船闸时有较大的操纵空间; 遭遇曹娥江典型频率洪水 ($Q=5\,000、7\,420、8\,963、9\,903\text{ m}^3/\text{s}$) 时, 船闸上游河段主要为冲刷, 下引航道口门区及连接段主要为微淤, 下游河段主要为冲刷。且上游河段单位河长泥沙冲淤量小于船闸及下游河段, 下游河段单位河长冲淤量略大于船闸河段。

2) 曹娥江侧泥沙冲刷主要发生在河道主槽主流区, 淤积主要发生在边滩缓流区。系列年冲淤试验结果表明, 河段冲淤速率随着年限的增加逐渐减弱, 10 a 末曹娥江侧工程河段已基本处于冲淤平衡状态。典型频率洪水冲淤试验结果表明, 工程河段遭遇典型频率洪水时, 船闸工程下游河段左岸仍存在深槽冲刷和左岸岸壁后退的情况。

3) 新三江船闸下引航道口门区和连接段以及上游河段无论在系列年冲淤过程, 还是在典型频率洪水流量下, 航道泥沙疏浚量变化较小, 但冲淤后的河道地形对航道尺度和流速流态等通航水流条件有一定的影响, 因此船闸工程建成后, 有必要对工程河段航道进行监测和维护性河道疏浚^[11]。

参考文献:

[1] 杨斌. 钦州湾河口岸滩演变稳定性及成因分析[J]. 湖南交通科技, 2024, 50(2): 154-159, 175.
YANG B. Stability and causation analysis of the evolution of the Qinzhou Bay estuary beach[J]. Hunan communication science and technology, 2024, 50(2): 154-159, 175.
[2] 刘汝兰, 李俊花, 程海峰, 等. 1998—2023 年长江口南槽河床演变特征及其影响因素[J]. 水利水运工程学报, 2025(1): 37-46.
LIU R L, LI J H, CHENG H F, et al. Bed evolution characteristics and influencing factors of the South Passage of the Yangtze Estuary (1998–2023) [J]. Hydro-science and engineering, 2025(1): 37-46.

- [3] 郑国诞, 刘烨, 唐子文, 等. 多因子影响下的钱塘江通航保证率研究[J]. 水运工程, 2024(12): 105-110.
ZHENG G D, LIU Y, TANG Z W, et al. Navigation guarantee rate of Qiantang River under influence of multiple factors [J]. Port & waterway engineering, 2024(12): 105-110.
- [4] 邱忠恩. 三峡工程综合效益的长期发展趋势分析[J]. 湖北水力发电, 2008(1): 54-56.
QIU Z E. Analysis of long-term development tendency of comprehensive benefits of TGP [J]. Hubei water power, 2008(1): 54-56.
- [5] 许绍林, 倪志辉. 不同开挖条件对山区挖入式码头通航水流条件影响分析[J]. 水运工程, 2024(11): 56-63.
XU S L, NI Z H. Influence of different excavation conditions on navigable flow conditions for excavated wharf in mountainous area [J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 56-63.
- [6] 贾大山. 三峡航运发展历程、经验与启示[J]. 中国水利, 2024(22): 55-60.
JIA D S. Experiences and reflections of history of navigation development of the Three Gorges [J]. China water resources, 2024(22): 55-60.
- [7] 刘俊威, 王萍萍, 郜宁静. 关于加强浙江省蓄滞洪区建设与管理的思考[J/OL]. 水利发展研究, 1-5[2024-12-19]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4655.TV.20241030.0920.006>.
LIU J W, WANG P P, GAO N J. Thoughts on the construction and management of flood detention basins in Zhejiang Province [J/OL]. Water resources development research, 1-5 [2024-12-19]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4655.TV.20241030.0920.006>.
- [8] 林一楠, 潘虹, 胡成飞, 等. 曹娥江大闸闸下地形影响因素分析及预测[J]. 水利水运工程学报, 2024(6): 97-102.
LIN Y N, PAN H, HU C F, et al. Analysis and prediction of the factors influencing the terrain under the Cao'e River sluice gate [J]. Hydro-science and engineering, 2024(6): 97-102.
- [9] 孙斌, 肖宇. 湖南澧水武圣宫滩航道改道平面二维水流数学模型研究[J]. 水运工程, 2023(11): 106-113.
SUN B, XIAO Y. Two-dimensional flow mathematical model of Hunan Lishui Wushengong beach channel diversion [J]. Port & waterway engineering, 2023(11): 106-113.
- [10] MEI L Q, AN J F, LI Z H, et al. Study of navigable flow conditions in the intermediate channel of decentralized cascade locks [J]. Water, 2023, 15(19): 3394.
- [11] 刘洋, 杨恒勇, 王茂枚, 等. 河道疏浚砂综合利用质量检验标准探究[J]. 江苏水利, 2024(12): 64-68.
LIU Y, YANG H Y, WANG M M, et al. Research on quality inspection standard of river dredged sand comprehensive utilization [J]. Jiangsu water resources, 2024(12): 64-68.

(本文编辑 赵娟)

~~~~~

(上接第 83 页)

- [13] 邱喜, 尹崇清. 高桩梁板式码头整体优化设计[J]. 水运工程, 2008(8): 71-74.  
QIU X, YIN C Q. Integral optimization design for piled beam-slab wharf [J]. Port & waterway engineering, 2008(8): 71-74.
- [14] 田中南, 刘庄. 某拖轮码头高桩结构的设计优化[J]. 港口航道与近海工程, 2023, 60(4): 63-66.  
TIAN Z N, LIU Z. Optimum design of piled structure of a tugboat wharf [J]. Port, waterway and offshore engineering, 2023, 60(4): 63-66.
- [15] WANG H F, JASON L. Dynamic testing and static load test report for access trestle piles [R]. Conakry: China Harbour Engineering Company Guine Office, 2024.  
(本文编辑 王璁)