



曹娥江大闸口门船闸冲淤减淤研究*

吴星¹, 孙国栋¹, 胡成飞^{2,3}, 李志永^{2,3}, 陈家浩¹, 张公略⁴

(1. 绍兴市公路港航与运输管理中心, 浙江 绍兴 312000;

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 310020;

3. 浙江省河口海岸重点实验室, 浙江 杭州 310020; 4. 浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310011)

摘要: 曹娥江大闸口门船闸所在工程河段水文泥沙条件复杂, 是兼具强涌潮、高含沙量、河床冲淤剧烈等特点的游荡型河段。针对高含沙量可能带来的闸下强淤积问题, 通过曹娥江大闸闸下河床地形实测资料分析、冲淤现场试验、泥沙淤积计算等, 总结河床冲淤规律, 研究曹娥江大闸口门船闸水域河床稳定性等关键问题。根据现场冲淤试验分析, 曹娥江大闸闸下 115~200 m 范围内在大潮淤积初期淤积速率为 20.8~21.8 cm/d, 采用淤积经验公式计算得到口门船闸闸下淤积幅度可达 17 cm/d。对于闸下强淤积问题, 提出蓄水冲沙池作为冲淤减淤方案, 估算得到在蓄水冲沙池月均泄水量为 813 万 m³ 的情况下可使引航道河床维持约 -1.7 m 高程, 为今后类似船闸的防淤减淤设计及科研提供参考。

关键词: 强涌潮河口; 出海船闸; 数学模型; 减淤措施; 试验研究; 曹娥江大闸

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0144-09

Research on siltation reduction by flushing at ship lock of Cao'e River Gate

WU Xing¹, SUN Guodong¹, HU Chengfei^{2,3}, LI Zhiyong^{2,3}, CHEN Jiahao¹, ZHANG Gonglue⁴

(1. Shaoxing Highway Port and Transportation Management Center, Shaoxing 312000, China;

2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China;

3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Estuary and Coast, Hangzhou 310020, China;

4. Zhejiang Institute of Digital and Intelligent Transportation Technology, Hangzhou 310011, China)

Abstract: The project reach encompassing the Cao'e River ship lock features complex hydrological and sedimentary conditions. It is a meandering section subject to strong tidal bores, high sediment loads, and significant riverbed erosion and deposition. To address the severe siltation issue downstream of the lock resulting from high sediment concentrations, this study analyzes measured riverbed topography below the Cao'e River Gate, conducts flushing tests, and performs sediment deposition calculations. These analyses reveals the patterns of riverbed erosion and siltation, and investigates key issues such as the stability of the riverbed in the ship lock approach channel. On-site flushing test analysis indicate that during the initial phase of spring tide sedimentation within the area 115~200 m downstream of the Cao'e River Gate, the average sedimentation rate ranges from 20.8 to 21.8 cm/d. Using an empirical sedimentation formula, the calculated average siltation amplitude below the outlet lock reaches 17 cm/d. To mitigate the problem of intense siltation below the lock, the construction of a water storage and sediment flushing basin is proposed as an effective sediment control measure. Calculations estimate that with a monthly average flushing discharge of 8.13 million cubic meters, the approach channel riverbed can be maintained at an elevation of approximately -1.7 m. These findings provide reference for the future design and research of sedimentation prevention and reduction in similar ship lock projects.

Keywords: strong tidal bore estuary; seaward ship lock; mathematical model; measures of siltation reduction; experimental research; Cao'e River Gate

收稿日期: 2024-12-26

*基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目 (2024023)

作者简介: 吴星 (1988—), 男, 硕士, 工程师, 从事港航工程相关领域研究。

通信作者: 胡成飞 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事河口海岸动力、泥沙及滩槽演变等研究。E-mail: chengfei_hu@163.com

曹娥江是浙江省第一大河钱塘江的主要支流^[1-2],曹娥江大闸是我国第一个河口大闸,集防潮、防洪、治涝、水资源开发利用、改善水环境和航运条件等功能为一体,工程级别为 I 等,于 2008 年建成蓄水投运,主要建筑物包括挡潮泄洪闸、堵坝、鱼道等^[3-5]。大闸建设时,曹娥江大闸口门船闸工程因水文泥沙条件复杂、河势复杂多变,在钱塘江河口尖山河段南岸、已建曹娥江大闸右侧的堵坝区域预留了船闸位置^[6-7]。根据规划,船闸按 I 等工程、通航 3 000 吨级江海联运船标准建设,地理位置及俯瞰图见图 1、2。

钱塘江河口大规模整治工程(治江缩窄)实施后,见图 3,钱塘江尖山河段河势已趋于走中偏南的稳定态势^[8-9],为曹娥江大闸口门船闸工程建设创造了一定的条件。但所在河段是强涌潮、高含沙、河床冲淤剧烈的游荡型河段,河床稳定性、引航道口门水流流态及泥沙淤积为船闸建设的关键问题,需深入研究。江耀祖等^[10]通过在多沙河流建设大型船闸物理模型试验,对三峡永久船闸闸室防淤减淤提出改善措施;柳仁绽等^[11]根据金汇港南闸闸下港池原体观测资料,对港池回淤进行模拟计算,得出港池内淤积的一系列参数。然而,涉及强涌潮通海船闸建设的冲淤减淤研究较少。

本文利用曹娥江大闸闸下河床地形实测资料分析、冲淤试验、泥沙淤积计算等手段,总结河床冲淤规律,研究钱塘江河口支流曹娥江口门船闸水域河床稳定性等关键问题,旨在为工程提供可行的清淤减淤方案,并为今后类似船闸闸室的防淤减淤设计及科研提供参考。

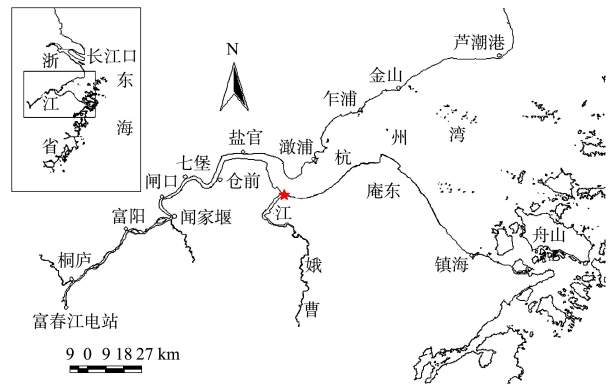


图 1 曹娥江大闸地理位置

Fig. 1 Geographical location of Cao'e River Gate



图 2 曹娥江大闸俯瞰图

Fig. 2 Overhead view of Cao'e River Gate

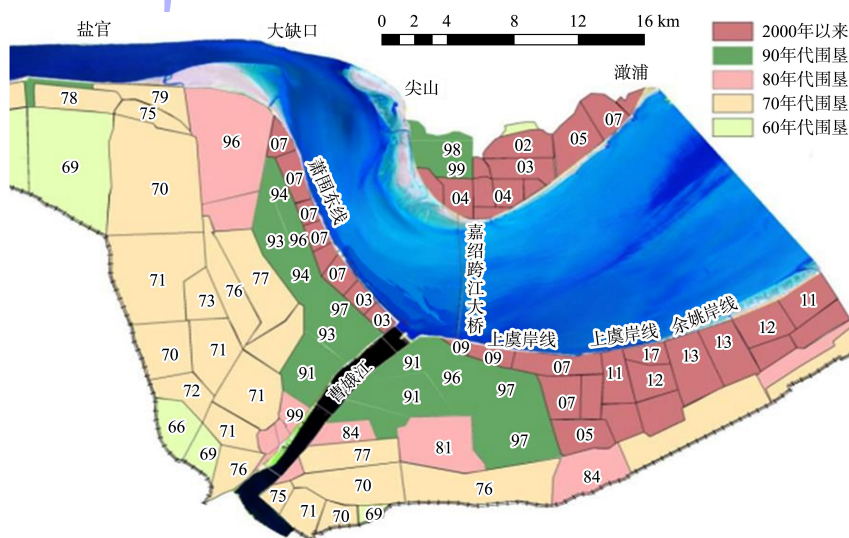


图 3 钱塘江河口治理过程

Fig. 3 Regulation process of Qiantang River estuary

1 坝址选择及船闸总体布置

1.1 坝址选择

根据曹娥江大坝现状及规划,在堵坝靠导流堤侧预留有口门船闸位置,新建船闸位置选择明确^[12]。

1.2 新建船闸总体布置

根据拟建工程区的周边建筑物、现场地形地貌等建设条件,结合数模计算和通航水流条件分析^[13-14],船闸采用坝上式布置(推荐方案),船闸下闸首(江侧闸首)坐落在现有口门大坝堵坝位置,船闸轴线与大坝轴线夹角为82°。新建船闸总体为中间水利多功能调控闸,采用两侧布置船闸主体及上、下游引航道的双线船闸形式,船闸主体左、右两侧对称布置。单线船闸有效尺度325 m×46 m×5.2 m(闸室长度×闸室宽度×门槛水深)。中间水利多功能调控闸设置上、下游2座,每座3孔,单孔净宽20 m。上、下游冲沙闸及左、右两侧船闸主体形成长630 m、宽86 m的蓄水冲淤池。跨两线船闸及多功能调控闸需要增设跨航桥梁及接线道路,合计总长547 m,见图4。

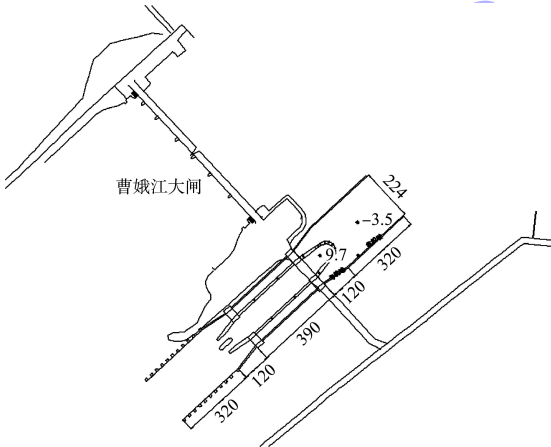


图4 船闸布置方案(单位:m)
Fig. 4 Layout plan of ship lock (unit: m)

2 船闸及其引航道泥沙问题研究

2.1 自然条件下闸下河床冲淤规律

2.1.1 闸下河床冲淤特征

大坝投入运行后,2009—2020年期间在闸前水域对78测次的水下地形进行跟踪监测。为便于分析,将闸前水域分为如图5所示的A、B、C3个区域,将闸前B、C区域的相关统计成果列于

表1,其变化过程见图6。统计可知:C区域(闸下),高程为-5.84~-2.66 m,平均-4.43 m,近4 a变幅为2.86 m;B区域(堵坝前沿),高程为-2.05~0.61 m,平均-1.16 m,近4 a变幅为0.99 m。堵坝前沿区域总体河床略有淤高,但变幅较小。

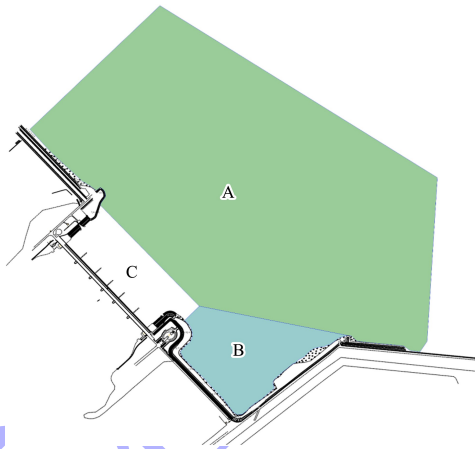


图5 闸下分区
Fig. 5 Partition under the gate

表1 各测次平均高程特征值
Tab.1 Characteristic values of average elevation for each measurement

区域	最小值/ m	出现 测次	最大值/ m	出现 测次	平均 值/m	近4 a 变幅/m
B	-2.05	2016年3月	0.61	2011年9月	-1.16	0.99
C	-5.84	2019年7月	-2.66	2011年9月	-4.43	2.86

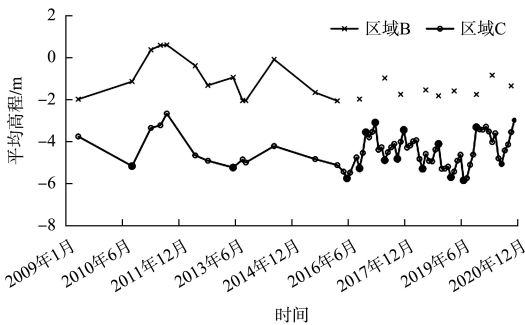


图6 曹娥江闸前区域河床平均高程变化
Fig. 6 Average elevation change of riverbed in front area of Cao'e River Gate

2.1.2 大坝泄水对闸下河床冲淤影响

对闸下区域(C区)河床与大坝泄水量分析表明,大坝泄水量与闸下河床冲淤密切相关。2019年6—7月,曹娥江挡潮泄洪闸排水量达11.01亿m³,远大于多年平均月排水量3.52亿m³,该时期闸下

河床平均高程刷深 1.22 m; 此后的 8—11 月大闸排水量较小, 闸下河床平均淤高 2.43 m。其余时段也表现出同样的特征。监测资料表明, 大闸排水可有效减缓闸下河床淤积, 闸下排水量减小后河床则快速回淤。分析显示, 闸下河床平均高程与前期月排量的关系如图 7 所示, 即排水量越大, 闸下河床平均高程越低。

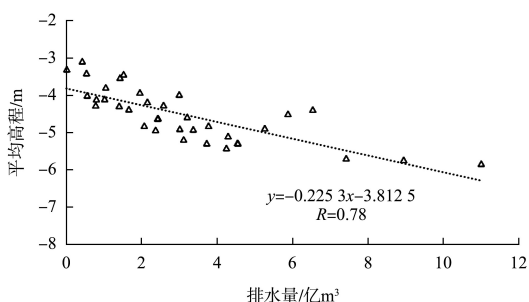
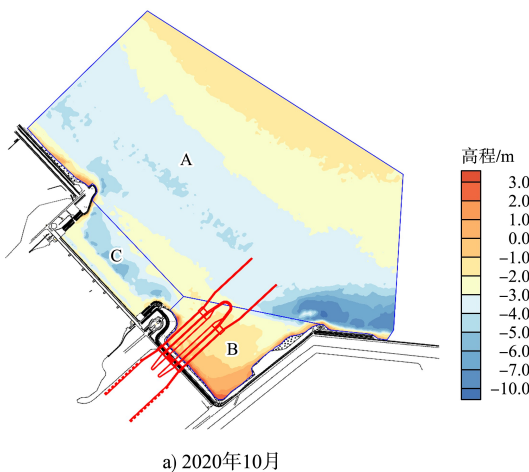


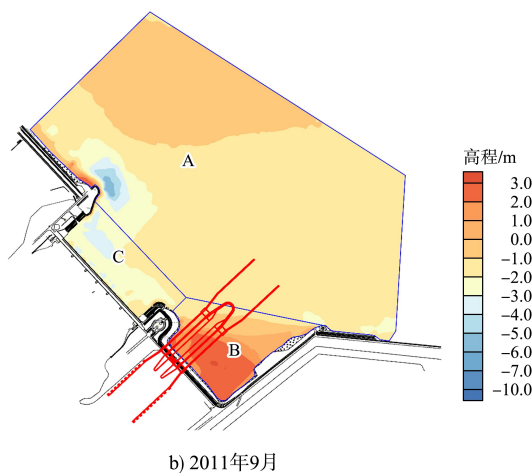
图7 曹娥江大闸排水量与闸下 C 区河床平均高程相关关系
Fig. 7 Correlation between drainage volume of Cao'e River Gate and average elevation of riverbed in Zone C under the gate

2.1.3 拟建引航道区域河床特征

2020 年 10 月堵坝前沿河床面貌见图 8a), 坝下 100 m 以内河床高程为 -2.0 ~ 2.0 m, 靠近导流堤一侧水深较深, 坝下 100 m 处河床高程为 -2.0 m, 靠近东侧堤防附近河床较高, 0 m 以上滩地长度达 250 m。拟建出口船闸靠近导流堤一侧, 从近 4 a 河床变化可知, 引航道无干预情形下的河床可能的淤积高程为 -1.5 ~ 0.5 m; 若考虑堵坝下河床整体较高的 2011 年 9 月测次, 则堵坝近岸侧河床可淤至 1.0 ~ 2.6 m, 见图 8b)。



a) 2020年10月



b) 2011年9月

图8 曹娥江大闸坝下河床面貌
Fig. 8 Appearance of riverbed under the dam of Cao'e River Gate

2.2 闸下河床冲淤变化现场试验

2.2.1 试验方案

2021 年 5—6 月期间在曹娥江大闸水域共布置 6 个断面, 开展 7 次排水和地形响应监测, 见图 9, 1#~3# 断面分别位于泄洪闸第 3 厢 13 孔、第 4 厢 17 孔、第 6 厢 25 孔, 4# 断面位于导堤处, 5# 和 6# 断面位于堵坝下游, 分别靠近导堤和右岸海塘, 基本不受大闸排水影响。

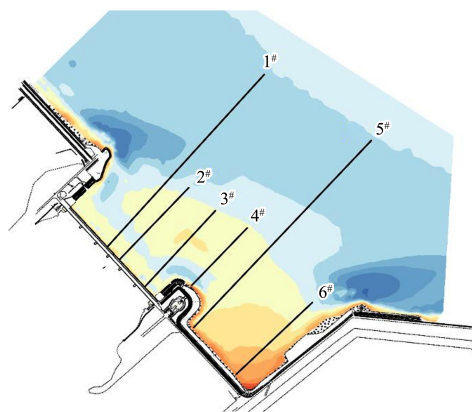


图9 现场回淤观测试验断面布置

Fig. 9 Section layout of on-site siltation observation test

2.2.2 成果分析

曹娥江大闸闸下左右岸海塘长度分别为 370、760 m, 导堤长 180 m。试验期间各断面形态及典型范围内平均高程变化呈现规律见图 10。

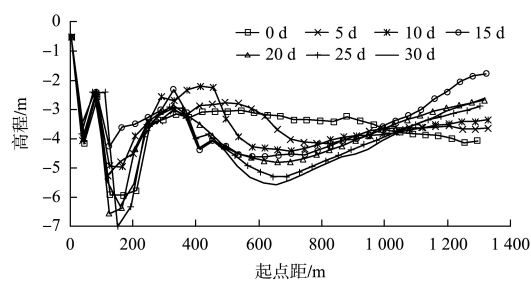
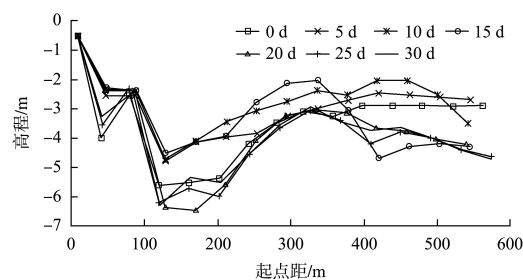
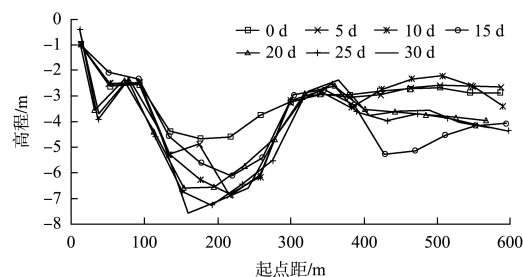
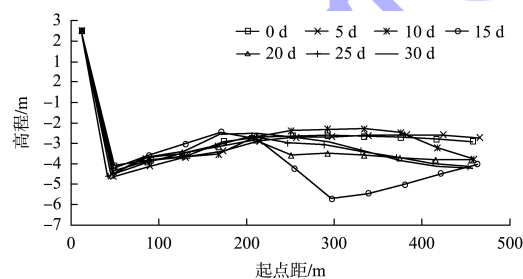
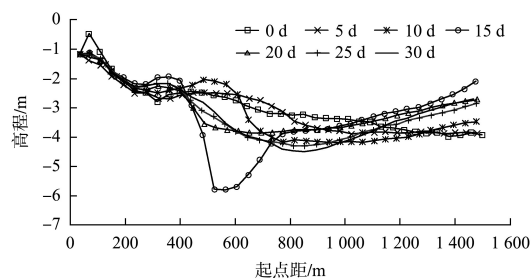
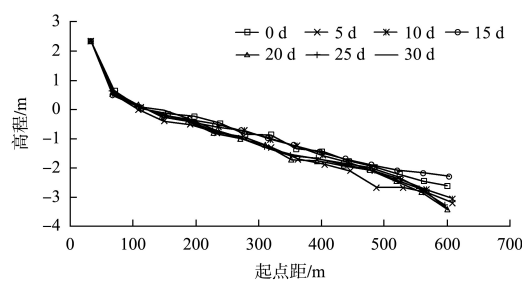
a) 1[#]b) 2[#]c) 3[#]d) 4[#]e) 5[#]f) 6[#]

图 10 试验期间各断面高程变化

Fig. 10 Changes in elevation of each section during test

1) 大坝未排水时, 闸下河床淤积速率较快。5月10—25日期间, 大坝13孔和17孔未排水, 其所在的III厢和IV厢累计排水分别为480万和0 m³。在此期间, 1[#]和2[#]断面均呈淤积态势, 距闸门115~200 m范围内15 d平均高程累计淤积幅度分别为2.05和1.17 m, 淤积速率为13.7和7.8 cm/d; 距闸门200~300 m范围内平均高程累计淤积幅度分别为0.79和1.10 m, 淤积速率为5.3和7.3 cm/d。

最初5 d淤积速率最快, 1[#]和2[#]断面距闸门115~200 m范围内河床平均高程淤积幅度分别为1.04和1.09 m, 淤积速率分别为20.8和21.8 cm/d; 其中单点最大淤积速率可达29 cm/d, 如2[#]断面距闸195 m处河床高程由10日的-5.42 m淤高至15日的-3.99 m。这一方面是由于初始河床高程较低, 泥沙易淤积; 另一方面最初5 d为大潮期, 水域含沙量较高。

2) 大坝泄水冲刷效果较好, 外江主槽贴近时, 泄水冲刷效率较高。5月25—30日大坝13孔和17孔分别排水365万和359万 m³, 其所在的III厢和IV厢分别排水1164万和1028万 m³。该时期1[#]和2[#]断面离闸115~200 m范围内平均高程分别刷深2.20和1.91 m, 冲刷速率为44.0和38.2 cm/d。这一方面是该时期排水量较多, 初始河床高程相对较高; 另一方面5月25日测次中外江主槽较为贴近闸下, 且高程较低, 如1[#]和2[#]断面离闸400~500 m范围内平均高程分别为-4.21和-4.43 m, 较低的主槽高程增大了泄水冲刷效率。

2.3 引航道淤积预测

2.3.1 引航道泥沙淤积一般原理

对于感潮河流盲肠段(或闸下引河)的泥沙淤积,目前大多认为有回流淤积、异重流淤积和缓流淤积3种形式^[15-17]。张幸农等^[18]应用上述理论较好解决了张家港二线船闸等工程中的引航道泥沙预测问题。理论上,分别求出3部分的淤积量,并对其求和即可得到引航道内的总淤积量。

2.3.2 工程引航道泥沙淤积计算

林健等^[19]指出:由于潮汐河口为非恒定流,水流及泥沙条件均随时间而变化,各部分的淤积机理并不很清楚,采用的有关参数缺少通用性。根据工程河段的潮汐变化特征可知,工程邻近河段相关闸港口门的淤积主要为涌潮及随后的潮流输沙引起。涨潮时,涌潮及涨潮流挟带高含沙水体在1~2 h内充满闸港口门段。之后,在外江落潮过程中,闸港内流速趋近于0,在没有船舶等外部搅动的情况下泥沙几乎处于静水沉降状态;只有口门附近尚悬浮在水体中的泥沙会随外江潮位的降落被挟带出闸港口门段外。

本次计算考虑典型大、中、小潮3种水文条件,分别预测引航道在各典型潮下的泥沙淤积强度。为了计算整个涨、落潮的淤积厚度,计算时将涨、落潮过程划分为若干时段,依据每个时段的水位(水深)、含沙量计算各个时段内引航道内的淤积厚度,再将每个时段的淤积厚度累加得出

整个潮周期的淤积厚度,步骤如下。

1) 计算时段 Δt_i 内的泥沙淤积量 G_i :

$$G_i = \alpha_i \omega S_i \Delta t_i \quad (1)$$

式中: Δt_i 为计算时段; α_i 为 Δt_i 时段内的泥沙落淤率; ω 为泥沙沉速; S_i 为 Δt_i 时段内的含沙量。

2) 累加各时段 Δt_i 内的泥沙淤积量,并除以泥沙淤积干容重,得单位面积港池的淤积厚度:

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \omega S_i \Delta t_i}{\gamma_{\text{干}}} \quad (2)$$

式中: $\bar{Z}$ 为单位面积的淤积厚度; $\gamma_{\text{干}}$ 为泥沙的干容重,取 800 kg/m^3 ; ω 取 0.0005 m/s ; α_i 取1。

本次估算时综合考虑各项因素,由于数学模型不能完全反映出涌潮期的含沙量,因此对典型大、中潮型,选取河段以往相应潮差涌潮时段内的含沙量确定。中潮期曹娥江口无涌潮含沙量资料,中潮涌潮时含沙量采用大、中潮涨潮时段含沙量相应关系推求;典型小潮时涌潮作用不明显,含沙量直接按照模拟数值模拟结果确定。按照式(2)即可估算得到工程引航道泥沙淤积强度。

日淤积厚度估算的关键参数及预测值见表2。由表可知,引航道的淤积强度较大,大潮时日淤积厚度 28 cm ;中潮日淤积厚度 17 cm ;小潮日淤积厚度 7 cm ;大、中、小潮平均日淤积厚度 17 cm 。

表2 日淤积厚度估算结果

Tab. 2 Estimation result of daily siltation thickness

潮型	对应潮差涌潮时段实测最大含沙量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	对应淤浦实测潮差/m	日平均淤积厚度/cm	淤浦潮差/m	曹娥江口涌潮时段实测最大含沙量(2007年10月大潮)/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
大潮	18.9	7.68	28	7.98	19.6
中潮	14.1	6.63	17	—	—
小潮	3.0	4.46	7	—	—
平均	12.0	5.59	17	—	—

2.4 清淤、减淤方案

拟建船闸所在的尖山河段潮大流急,含沙量高,并有涌潮作用,河床冲淤多变,船闸引航道泥沙淤积较严重。至今,钱塘江水域闸下清淤方

案基本上有2种:一种是水力冲淤,被广泛应用于钱塘江两岸排涝闸闸下清淤;另一种是人工疏浚,如三堡船闸引航道清淤方式为定期开挖疏浚。以上2种方式适用于排涝闸闸下清淤以及通航水

深和保证率要求不高的内河船闸引航道清淤,但对解决通航水深和通航保证率要求高的出海船闸显然不能满足运行要求。

目前我国清淤技术分 3 类:疏浚清淤、水力清淤和扰动清淤^[20-22]。由于钱塘江河口河床底质为细粉砂,易起动,受涌潮作用,水体含沙量高,船闸引航道淤积强度大,且航道每天必须通航,疏浚清淤事倍功半,故本工程考虑水力清淤和扰动清淤^[23]。

基于上述分析,提出采用“涨潮纳潮蓄水、落潮泄水冲沙、汛期泄洪冲沙”的方案(图 11),在高潮位、含沙量较低的时段打开蓄水池上部闸门纳潮蓄水;在落潮阶段,当水位降低潮位临近时段利用蓄水池和引航道内的水位差泄水冲淤。

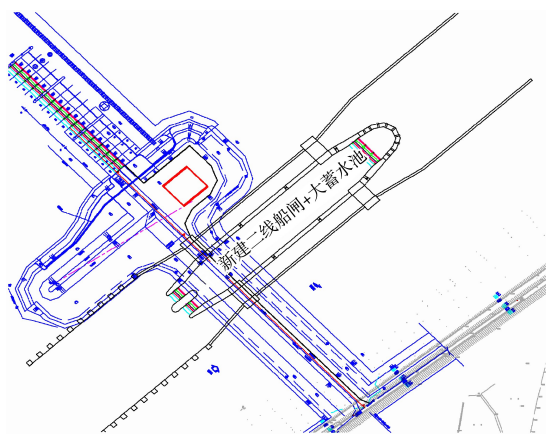


图 11 船闸、冲沙泄洪闸兼蓄水池冲沙池方案

Fig. 11 Scheme of ship lock, flushing and flood discharge gate with water storage and flushing pool

2.5 减淤措施效果类比分析

为了对纳潮冲淤、泄水冲沙的减淤效果进行分析,利用曹娥江闸下 2017—2019 年相关资料,建立闸下期末河床平均高程 H 与期初平均高程 H_0 、大闸月排水量 W 的多元回归关系,相关系数达 0.88,见式(3)及图 12,表明闸下期末河床平均高程与期初河床平均高程、期间大闸排水量存在良好的关系。大闸排水量越多,闸下河床高程越低;闸下初始河床高程越低,需要维持闸下河床高程的排水量也越多。

$$H = 0.363H_0 - 0.554 \ln W - 2.419 \quad (3)$$

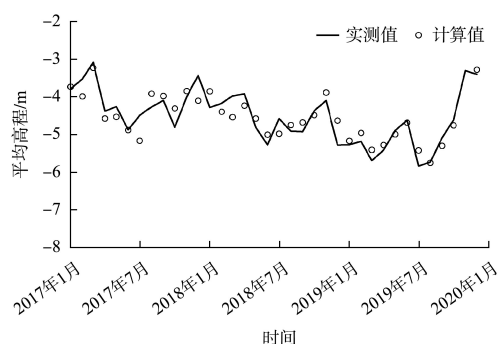


图 12 曹娥江大闸闸下河床高程与前期高程、大闸排水量关系

Fig. 12 Relationship between elevation of riverbed under Cao'e River Gate, previous elevation, and gate drainage volume

依据 2020 年曹娥江大闸全年调度资料,每次泄水平均开孔 13 孔,即平均排水宽度 260 m,则月平均单宽流量 q 与月排水量关系为:

$$W = 6.739q \quad (4)$$

若要保持闸下河床在一定高程不变化,即 $H = H_0$,联合式(3)、(4),可得维持一定河床高程所需的月平均单宽流量,见式(5),对应的关系曲线见图 13。

$$q = 0.145e^{-4.366 - 1.150H} \quad (5)$$

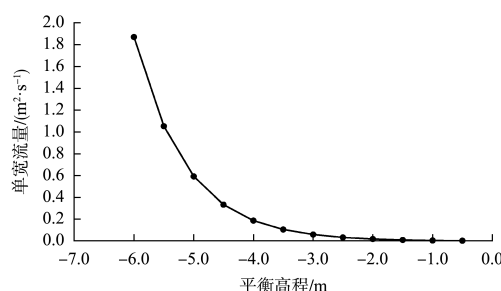


图 13 闸下河床各平衡高程所需的月均单宽流量

Fig. 13 Monthly average single width flow required for each equilibrium elevation of the riverbed under the gate

由于引航道与闸下水域所处环境类似,上述关系可用于类比分析蓄水池泄水冲沙的减淤效果。

设计方案中蓄水池面积约 5 万 m^2 ,曹娥江口近年来平均潮差为 5.42 m,对应容积为 27.1 万 m^3 。考虑到利用水头差泄水冲刷,实际调度过程中蓄水池中的水无法全部泄出。假定每潮有 1/2 水量可用于泄水冲刷,则每潮放水量约 13.55 万 m^3 ,折合月均泄水量为 813 万 m^3 ,月均单宽流量 0.014 m^2/s 。

初步估算该水量基本可使引航道河床维持-1.7 m 高程。

3 结语

1) 现场冲淤试验发现,曹娥江大闸未排水时闸下河床淤积速率较快,闸下 115~200 m 范围内大潮淤积初期的日均淤积速率为 20.8~21.8 cm/d,采用淤积经验公式计算得到出口船闸闸下引航道日平均淤积幅度可达 17 cm。

2) 大闸泄水对闸下河床冲刷效果较好,针对船闸闸下引航道淤积问题提出“涨潮纳潮蓄水、落潮泄水冲沙、汛期泄洪冲沙”防淤减淤方案,估算得到在蓄水冲沙池月均泄水量为 813 万 m³ 的情况下可使引航道河床维持约-1.7 m 高程。

3) 减淤措施效果类比分析与实际不完全相符,实际曹娥江大闸并非每天泄水,而类比分析结论是将每月泄水量平均到每天得到的,坦化了排水强度,推算可能存在一定误差。

4) 蓄水池纳潮冲淤方式是浑水冲刷,其冲刷效率也可能较大闸的清水冲刷效率更低。下一阶段需开展物理模型试验和室外现场试验,以便为船闸及引航道减淤清淤措施选择和确定提供依据。

5) 利用船闸泄水清淤有着广阔的应用前景。其冲淤方式还涉及研究河段的泥沙特性、船闸输水系统过流能力等问题,还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 黄建维,张金善.我国河口挡潮闸闸下淤积综合治理技术[J].泥沙研究,2004,29(3):46-53.
HUANG J W, ZHANG J S. Regulation techniques of sediment siltation downstream tidal barriers in China[J]. Journal of sediment research, 2004, 29(3): 46-53.
- [2] 刘洋,韩晓旭,李丽娟.1980—2018年曹娥江中上游径流变化特征及归因分析[J].水资源与水工程学报,2022,33(6):53-61.
LIU Y, HAN X X, LI L J. Characteristics and attribution analysis of runoff changes in the middle and upper reaches of Cao'e River from 1980 to 2018[J]. Journal of water resources and water engineering, 2022, 33(6): 53-61.
- [3] 郑国诞,吴军君,史英标,等.曹娥江大闸闸上河道建桥通航水流条件[J].水运工程,2021(6):141-146.
ZHENG G D, WU J J, SHI Y B, et al. Navigable flow conditions of bridge construction in the upper channel of the Cao'e River gate[J]. Port & waterway engineering, 2021(6): 141-146.
- [4] 王军,陈舟.曹娥江大闸枢纽工程鱼道设计与实践[J].浙江水利科技,2017,45(5):51-53.
WANG J, CHEN Z. Design and practice of fishway in Cao'e River sluice hub project [J]. Zhejiang hydrotechnics, 2017, 45(5): 51-53.
- [5] 王军,陈舟.曹娥江大闸闸下防冲设施设计与运行[J].水利水电技术,2016,47(11):36-39,43.
WANG J, CHEN Z. Design and operation of downstream anti-scour facilities for Cao'e River Sluice [J]. Water resources and hydropower engineering, 2016, 47(11): 36-39, 43.
- [6] 浙江省水利水电勘测设计院.浙江省曹娥江大闸枢纽工程初步设计报告[R].杭州:浙江省水利水电勘测设计院,2005.
Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-electric Power. Preliminary design report of Cao'e River Sluice Hub project in Zhejiang Province [R]. Hangzhou: Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-electric Power, 2005.
- [7] 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院).曹娥江大闸口门船闸水文专题研究报告[R].杭州:浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院),2021.
Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design). Special research report on hydrology of Cao'e River grand lock gate and ship lock [R]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design), 2021.
- [8] 王柏明,史英标,曹颖,等.曹娥江出口船闸建设若干关键问题初探[J].水电能源科学,2019,37(8):61-64,37.
WANG B M, SHI Y B, CAO Y, et al. Preliminary discussion on some key issues in construction of Cao'ejiang ship lock [J]. Water resources and power, 2019, 37(8): 61-64, 37.
- [9] 卢祥兴,韩曾萃.钱塘江尖山河段北岸治江工程对环境的影响分析[J].水科学进展,2002,13(5):552-556.

- LU X X, HAN Z C. Effect of regulation project along north bank of Jianshan bend in Qiantang Estuary on environment[J]. *Advances in water science*, 2002, 13(5): 552-556.
- [10] 江耀祖, 吴英卓, 王业红. 三峡永久船闸闸室防淤减淤试验研究[J]. *水利水电快报*, 1999, 20(10): 7-11.
- JIANG Y Z, WU Y Z, WANG Y H. Experimental study on siltation prevention and reduction of lock chamber of Three Gorges permanent ship lock [J]. *Express water resources & hydropower information*, 1999, 20 (10): 7-11.
- [11] 柳仁铨. 金汇港闸下港池的回淤过程[J]. *泥沙研究*, 1988, 13(4): 30-39.
- LIU R D. The process of shoaling on downstream basin of the gate in Jinhui Gang [J]. *Journal of sediment research*, 1988, 13(4): 30-39.
- [12] 浙江数智交院科技股份有限公司. 曹娥江大闸口门船闸工程预可行性研究报告[R]. 杭州: 浙江数智交院科技股份有限公司, 2022.
- Zhejiang Shuzhi Transportation Institute Technology Co., Ltd. Preliminary feasibility study report on Cao'e River lock project [R]. Hangzhou: Zhejiang Shuzhi Transportation Institute Technology Co., Ltd., 2022.
- [13] 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- Code for master design of shiplocks: JTJ 305-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [14] 渠化工程枢纽总体设计规范: JTS 182-1—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- Design code for hydrojunction general layout of canalization works: JTS 182-1-2009[S]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [15] 高亚军, 陆永军, 许慧. 小浪底水库异重流对库区河床冲淤的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(2): 240-244.
- GAO Y J, LU Y J, XU H. Effect of density currents in Xiaolangdi Reservoir on riverbed erosion and deposition [J]. *Journal of Hohai University (natural sciences)*, 2009, 37(2): 240-244.
- [16] 周巧菊, 赵雪荣. 长江下游河段大型挖入式港池泥沙回淤研究[J]. *水道港口*, 2015, 36(3): 214-219, 263.
- ZHOU Q J, ZHAO X R. Research on siltation in large excavated-in harbor basin of Lower Yangtze River [J]. *Journal of waterway and harbor*, 2015, 36 (3): 214-219, 263.
- [17] 吴澎, 张珊, 罗少桢, 等. 航电枢纽工程选址与布置[J]. *水运工程*, 2011(9): 185-188.
- WU P, ZHANG S, LUO S Z, et al. Site selection and layout of navigation-power junction [J]. *Port & waterway engineering*, 2011(9): 185-188.
- [18] 南京水利科学研究院. 张家港船闸扩建工程下游引航道泥沙淤积计算分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2004.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. Calculation and analysis of sedimentation in the downstream approach channel of Zhangjiagang ship lock expansion project [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2004.
- [19] 林健, 窦国仁, 马麟卿. 潮汐河口挖入式港池淤积研究[J]. *水利水运科学研究*, 1996(2): 95-102.
- LIN J, DOU G R, MA L Q. Siltation study of dredged harbour basins on tidal estuaries [J]. *Hydro-science and engineering*, 1996(2): 95-102.
- [20] 金桂中, 胡成飞, 曾剑, 等. 上虞闭合式港船闸引航道水流条件及淤积预测 [J]. *水运工程*, 2019 (8): 141-146.
- JIN G Z, HU C F, ZENG J, et al. Prediction of flow condition and siltation in approach channel of closed-type port of Shangyu [J]. *Port & waterway engineering*, 2019(8): 141-146.
- [21] 吴辉. 钱塘江强涌潮河段闭合式港泥沙淤积研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- WU H. Study on the siltation in dock harbor in the strong tidal bore reach of Qiantang estuary [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [22] 俞月阳, 唐子文, 卢祥兴, 等. 曹娥江船闸引航道冲淤研究[J]. *泥沙研究*, 2007, 32(3): 17-23.
- YU Y Y, TANG Z W, LU X X, et al. Siltation in the lock approach of the Cao'e River [J]. *Journal of sediment research*, 2007, 32(3): 17-23.
- [23] 徐进超, 李云, 宣国祥, 等. 船闸泄水作用下引航道中动水冲沙规律[J]. *水科学进展*, 2016, 27(2): 186-195.
- XU J C, LI Y, XUAN G X, et al. Study on the sediment scouring rules by dynamic water effect in approach channel under the action of ship lock sluicing [J]. *Advances in water science*, 2016, 27(2): 186-195.
- (本文编辑 王传瑜)