

曹娥江大闸闸上河道建桥通航水流条件*

郑国诞^{1,2}, 吴军君³, 史英标^{1,2}, 曹颖^{1,2}, 唐子文^{1,2}

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省河口海岸重点实验室, 浙江 杭州 310020;
3. 浙江省钱塘江管理局勘测设计院, 浙江 杭州 310020)

摘要: 曹娥江大闸从 2008 年底开始运行, 平时关闸蓄水, 洪汛期开闸放水。闸上河道从“洪冲淤”向“单向冲刷”转换, 河床发生着较大的变幅。在这种江道环境中建设桥梁最重要的一个制约因素为通航水流条件, 主要为工程河段的河势情况、流速流态条件以及桥梁建设后的影响。通过建闸后多年地形分析工程河段河势现状以及趋势, 并通过建立平面二维数学模型对航道内流速进行计算分析。研究可知: 1) 若无较大人类活动干涉, 工程河段河势稳定, 滩槽格局不会发生变化。2) 在通航高水位下, 流速流态符合通航要求, 建桥对航道的影响较小。因此在此河段建设桥梁是可行的。

关键词: 曹娥江; 桥梁; 通航; 河势; 流速

中图分类号: U 641; U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0141-06

Navigable flow conditions of bridge construction in the upper channel of the Cao'e River gate

ZHENG Guo-dan^{1,2}, WU Jun-jun³, SHI Ying-biao^{1,2}, CAO Ying^{1,2}, TANG Zi-wen^{1,2}

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

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

3. Reconnaissance and Design Institute, Qiantang River Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The Cao'e River gate has been in operation since the end of 2008. The gate is normally closed for storage and opened for drainage during flood seasons. The river channel on the gate has changed from “scouring during the flood and silting during tide” to “single-direction scouring”, and the riverbed has undergone a large change. In this river environment, one of the most important restricting factors for the bridge construction is the navigable flow conditions, which are mainly the river regime, flow velocity and flow pattern conditions of the project reach, and the influence of the bridge construction. In this paper, the current situation and trend of the river regime of the project reach are analyzed based on the topography of many years after the gate was built, and the flow velocity in the channel is calculated and analyzed by establishing a plane two-dimensional mathematical model. The study shows that: 1) Without the interference of large human activities, the river regime of the project reach is stable and the pattern of the beach channel will not change. 2) The flow velocity pattern meets the navigation requirements under the navigation high water level, and the construction of the bridge will have little impact on the channel. Therefore, it is feasible to build bridges in this reach.

Keywords: the Cao'e River; bridge; navigable; river regime; flow velocity

曹娥江大闸是亚洲最大的强涌潮河口第一大闸, 位于钱塘江南岸曹娥江河口处, 于 2008 年

12 月下闸蓄水^[1]。大闸的建设阻挡了外海泥沙进入河道, 改变了闸上河道水流泥沙运动规律, 现状的

收稿日期: 2020-08-12

*基金项目: 浙江省科技计划项目(2015C03003); 国家自然科学基金项目(51609214)

作者简介: 郑国诞(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水动力数值模拟、物模模型试验。

河道形势和水流条件与建闸前发生了巨大的改变，通航水流条件也随之改变。在这种河道下新建桥梁，需对通航水流条件重新评估，重点为桥区航道的河势稳定性以及水流情况。王柏明等^[2]基于曹娥江大坝建闸前水沙输移特点及河床演变分析，采用动床数学模型研究了建闸对闸上河床演变的影响，结果表明：建闸后闸上河道蓄水及口门侵蚀基面抬高，闸前至新三江闸河段内呈壅水淤积，新三江闸以上河段发生单向冲刷；吴修锋等^[3]采用平面二维水流泥沙数学模型对曹娥江大坝建成后闸上河道冲刷情况进行了计算分析，在验证计算的基础上，对上浦闸至河口段的水流冲刷情况和堤防可能的险工、险段进行预测分析；徐启航等^[4]以重庆市蔡家嘉陵江大桥桥区河段物理模型试验为基础，分析桥区河段的

河床演变，同时研究了桥梁间距、桥跨布置及主墩形式对桥区通航水流条件的影响；严军等^[5]利用平面二维水沙数学模型，对设计方案下航道内京广铁路桥桥墩附近流场、航道内水面线比降、航道内水流流速进行数值模拟计算，分析模拟河段的通航水流条件。

新建桥梁位于曹娥江下游转弯处，距离下游新三江闸 1.67 km，距离下游的世纪大桥约 3.2 km，距离上游袍江大桥 3.8 km，工程位置及航道桥梁关系见图 1、2，桥梁主跨为 145 m+400 m+145 m，通航标准为内河 III 级天然航道。本文拟采用建闸后多次水下地形进行桥区航道位置的河床演变分析，并建立平面二维数学模型进行通航水流条件的模拟研究，为今后桥梁的通航影响论证提供科学依据，并为相关工程提供参考。

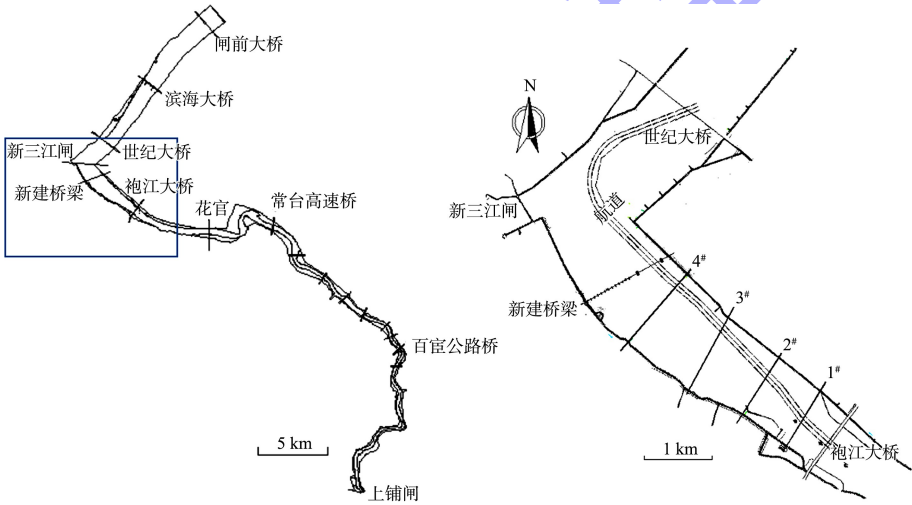


图 1 新建桥梁工程位置

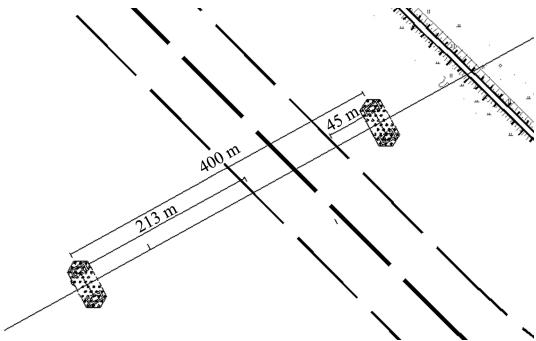


图 2 航道与桥墩局部位置

1 桥区河势分析

1.1 深泓稳定性分析

图 3 是工程位置 2002 年以来的历次深泓变

化，由图 3 可知：在新三江闸弯道处差异较大，口门建闸前工程河段受涨潮流控制，涨潮流顶冲河道凹岸，致使河道左岸形成深泓；建闸后涨潮流消失，在单向径流作用下，受到袍江大桥左岸凸起的岸线、袍江大桥以下河宽放宽以及新三江闸经常开闸顶托上游的综合影响，弯道处深泓线逐步摆向河道右岸，经袍江大桥后，目前深泓仍贴右岸下泄至新三江闸弯道下游，直至顶冲绍兴左岸堤塘才向下游偏转并再度向右岸偏转，且河道左岸目前还形成了大片滩地。

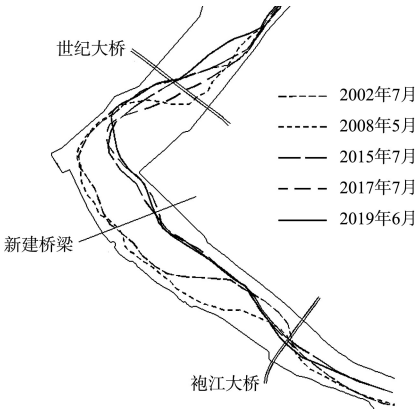


图 3 工程河段深泓线变化

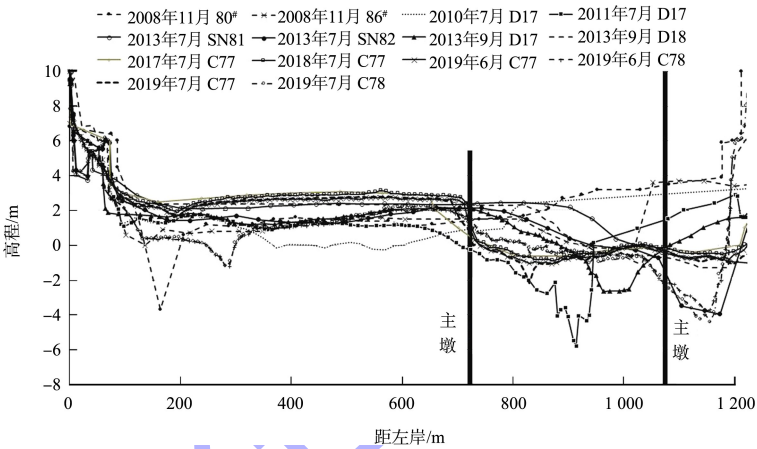


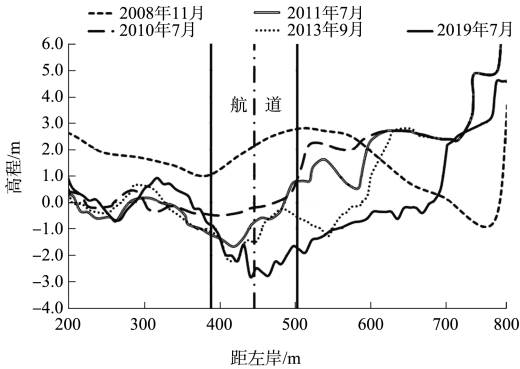
图 4 工程线位上下游近区断面形态

1.3 航槽断面分析

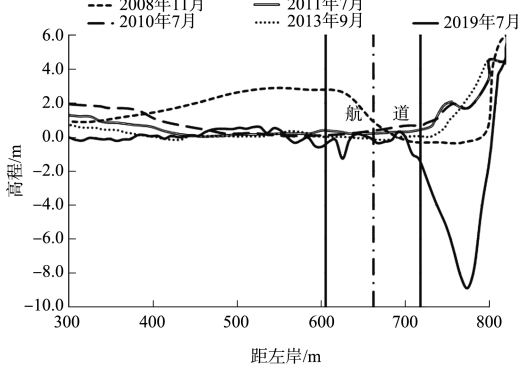
在工程上游位置布设 4 个断面，利用断面位置附近不同测次的地形资料进行航槽稳定性分析，断面位置见图 1，断面形态见图 5。1#断面临近袍江大桥，深泓位置较为稳定，深泓高程持续冲刷下降，0 m 以下深槽建闸后有所冲刷发育，宽度有所增大；2#断面原深泓高程在 0 m 左右，是近乎平底的 U 形槽，在 2019 年测图上，右岸前沿出现较深的 V 形深槽，深泓高程冲刷至-8.9 m；3#断面两侧 0 m 等高线及深泓的位置均较为稳定，2019 年深泓高程冲刷近 2 m；4#断面早期等高线及深泓位置较稳定，但 2019 年明显向左岸偏移(可能与下游丁坝的修建有关)，深泓高程冲刷幅度在 1 m 左右。总体上看，工程上游航槽所在的河槽较为稳定，存在冲刷趋势。

1.2 桥址断面稳定性分析

将工程线位上下游近区约 500 m 以内的测量断面绘于图 4。由图 4 可知，在 2008 年关闸蓄水前，越东路线位上下游深槽最深点均位于左岸堤前100~300 m 范围内；曹娥江大闸建成后，2010—2011 年深槽逐步向右岸摆动，至 2013 年深槽最深点基本稳定在右岸堤前 300 m 以内。断面上最深高程 -5.8 m，出现在 2011 年 7 月 D17 断面。建闸后工程上下游断面形态较为一致，均为左滩右槽形态。左岸为高程 0~3 m 的边滩，宽度在 600~800 m；河槽基本稳定在右岸，宽度在 400~600 m。



a) 1#断面



b) 2#断面

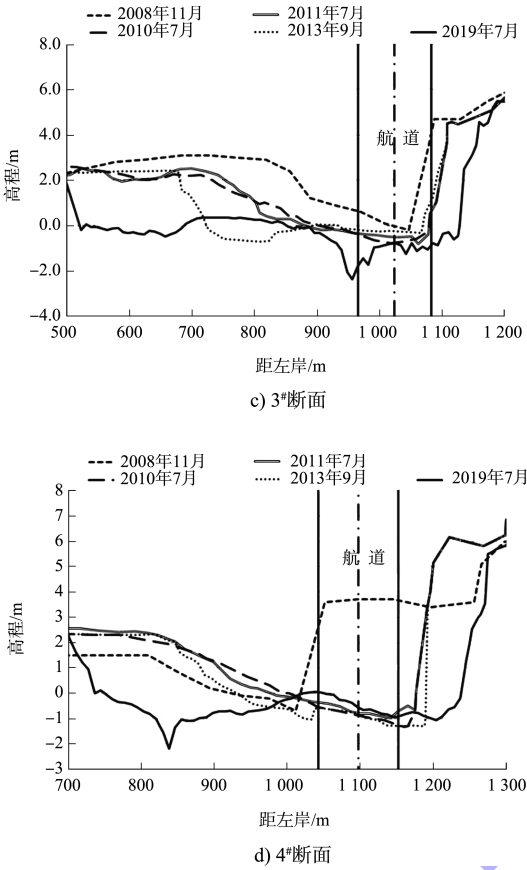


图 5 断面形态

1.4 演变趋势预测

建闸之后，河口段的冲淤特性将由建闸之前的“洪冲潮淤”转向“单向冲刷”，河道断面不断得以扩大，最后达到冲刷平衡。由于曹娥江大闸建成至今才 10 年，闸上河道未经特大洪水冲刷，江道冲刷亦未见达到平衡状态，预测工程区附近河道今后仍有进一步刷深趋势。倘若工程河段无大规模挑流或挖沙工程，且上游来小洪水时，河势基本不会发生变化；发生特大洪水时工程河段现状偏右岸的深槽将有可能往左岸拓宽，左岸或有崩滩，右岸即使局部发生淤积亦仍将保持深槽形态，同时洪水过后，河槽的动力轴线将恢复偏向右岸的形态，左岸冲刷崩塌的滩地可能会淤积恢复，同时右岸深槽在长期冲刷的趋势下亦将继续冲深。

2 数模建立及验证

2.1 模型建立

采用平面二维浅水潮波方程模拟水域的流场

情况，并采用并行计算提高计算效率^[6]，控制方程如下：

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} - fv + gu \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + fu + gv \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) \tag{3}$$

式中：z 为水位；u、v 分别为 x、y 方向上的垂线平均流速分量；H 为水深；g 为重力加速度；f 为柯氏力参数；C 为谢才系数；ε_x、ε_y 分别为 x、y 方向的涡动扩散系数；t 为时间。

采用 SMS 软件并利用三角形网格对计算域进行概化，对工程附近局部范围以及江道地形变化剧烈的位置进行加密处理，最小网格仅为 1 m，局部网格见图 6，大范围计算选定上边界为上浦闸，下边界为曹娥江口，见图 1。

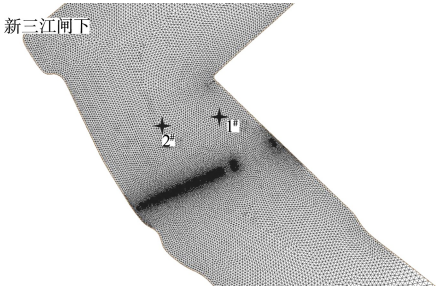
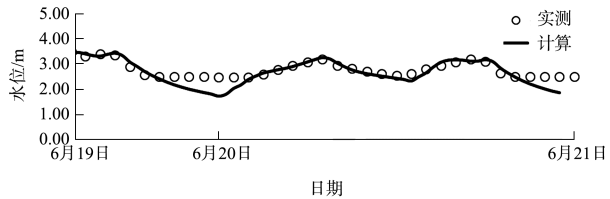


图 6 工程局部网格

2.2 验证

2019 年 6 月中下旬曹娥江开闸泄洪，进行实测水位流速验证，其验证点位置见图 6，验证结果见图 7。由图 7 可知，模型验证良好，能进行下一步工况计算。



a) 新三江闸下水位

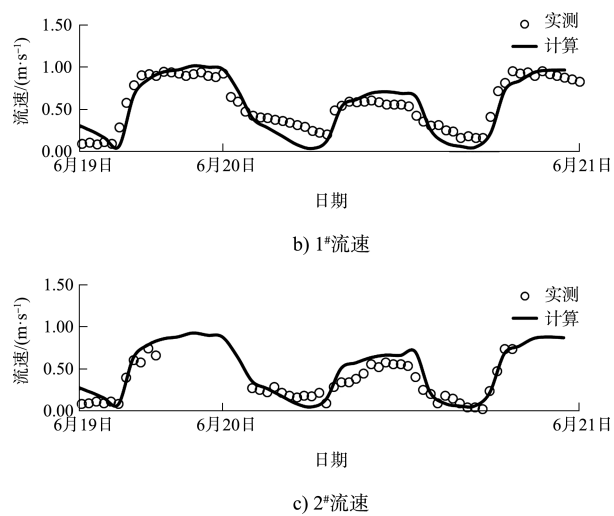


图 7 验证结果

3 通航水流条件分析

最为关心的通航水流条件是在通航高水位下通航孔内横、纵流速以及建桥前后对航道的影响情况, 本次通航高水位为 5 a 一遇高水位, 因此数模模型上边界取上游 5 a 一遇流量组合下游曹娥江闸上 5 a 一遇洪水位 4.93 m, 并考虑下游曹娥江大闸泄洪的影响, 其工程断面流量约达7 420 m³/s。

3.1 通航孔内流速分析

以新建桥梁为中心, 在曹娥江主航道桥址上下游 400 m 范围内, 流速与航道的夹角为 0.3°~1.9°, 纵向流速为 1.59~1.73 m/s, 横向流速为 0.01~0.06 m/s, 符合通航要求, 其工程附近流场见图 8。

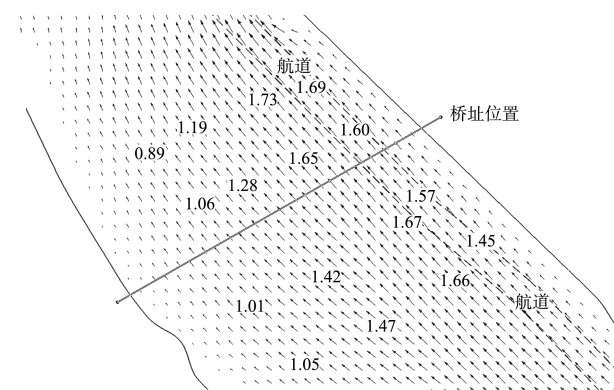


图 8 工程附近流场 (单位: m/s)

3.2 建桥对通航孔内水位影响

新建桥墩的阻水作用引起河道过水面积缩小, 导致上游洪水位有所壅高, 影响范围主要为桥墩附近以及桥位上游, 由于航道边线距离桥梁最近的主墩约 45 m, 航道位置水位的影响相对较小,

其值均在 0.015 m 以内。见图 9。

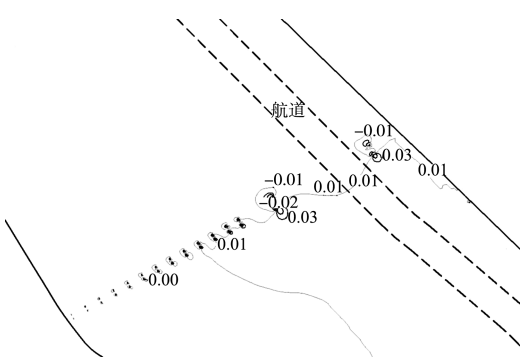


图 9 工程建设前后水位变化等值线 (单位: m)

3.3 建桥对航道内流速的影响

本工程的建设对流速的影响主要发生在桥位附近, 由于桥墩的挤压作用, 桥墩之间流速有所增大, 航道内流速受到主墩的挤压主要以增加为主, 增加幅度为 0~0.11 m/s, 流速的增加有利于航深维护, 但是对船舶操作不利, 远区局部位置受到桥墩阻流的影响, 存在着流速减小现象, 减小幅度为 0~0.07 m/s。航道内流向的变化也相对较小, 幅度为 0°~3°。另外, 根据计算可知, 主墩两侧由于挑流的作用, 导致主墩周边流向改变较大, 产生了一定范围内横流超过 0.3 m/s 的区域, 左侧主墩靠近航道 7 m 范围内横流流速超过 0.3 m/s, 右侧主墩靠近航道 8 m 范围内横流流速超过 0.3 m/s。总体来说, 由于新建桥梁距离航道位置较远, 对航道内流态改变较小, 流速、流向变幅有限, 建桥后航道内纵向流速均小于 2 m/s, 横向流速也未超过 0.3 m/s, 仅在桥墩局部有一定影响。见图 10。

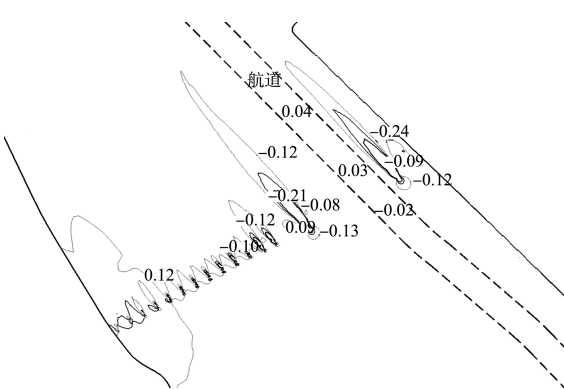


图 10 工程建设前后流速变化等值线 (单位: m/s)

3.4 建桥对航道内河床的影响

工程建设引起的一般床面变化, 如达到了极

限平衡状态，可以采用如下公式^[7]进行估算：

$$H_2 = \left(\frac{q_2}{q_1} \right)^{2/3} H_1 \tag{4}$$

式中： H_2 为工程建设冲淤平衡后水深； q_1 为工程前单宽流量； q_2 为工程后单宽流量； H_1 为工程实施前计算水深。

由公式可知，河床的冲淤变化相当复杂，并不单纯取决于工程前后的流速变化，还与工程水域的水深情况、泥沙特性等有密切关系，图 11 为工程建设后河床冲淤变化图。从图 11 可知，桥址上游侧航道由于受到主墩对水流的阻挡作用，河床略有淤积，桥址及桥址下游侧均是以冲刷为主，桥址位置上下游 400 m 航道内河床变化幅度为 -0.23~0.15 m，幅度相对较少，不会影响航深变化，不影响此河段河势。

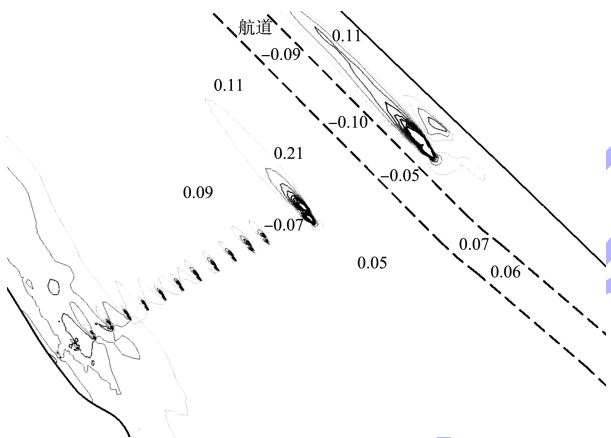


图 11 工程建设前后河床冲淤变化（单位：m）

4 结论

1) 曹娥江大坝建设后，工程河段仅受径流单向作用，上游袍江大桥左岸凸出的岸线、袍江大桥以下河宽放宽以及新三江闸泄水顶托等多种因

素，造成工程上下游左滩右槽的断面形态，倘若工程河段无大规模挑流或者挖沙工程，且上游来小洪水时，河势基本不会发生变化，航槽断面也较为稳定；发生特大洪水时工程河段现状偏右岸的深槽将有可能往左岸拓宽，且进一步刷深，说明现状航道布置合理。

2) 通过数模计算可知，在通航高水位下航道内流速均小于 2 m/s，符合相关规范要求，建桥对流速的影响主要发生在桥墩局部，对航道范围内影响较小，不影响船舶通行。

3) 通过半经验半理论公式计算可知，建桥对航道内河床变形影响较少，不会影响航深变化，不影响此河段河势。

参考文献：

[1] 浙江省水利水电勘测设计院. 浙江省曹娥江大坝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.

[2] 王柏明, 史英标, 杨元平. 潮汐河口闸上河床演变对建闸的响应[J]. 水电能源科学, 2011, 29(5): 99-102.

[3] 吴修锋, 吴时强, 周杰. 曹娥江大坝闸上河道水流泥沙冲刷数值模拟计算[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2008(1): 96-100.

[4] 徐启航, 田进. 嘉陵江大桥桥区河段通航水流条件试验研究[J]. 水科学与工程技术, 2017(3): 87-90.

[5] 严军, 卓飞, 陈建, 等. 沙河京广铁路大桥河段通航水流条件数值模拟[J]. 黑龙江水利, 2015, 1(5): 1-7.

[6] 程文龙, 史英标, 吴修广. 河口水沙数学模型的并行化研究[J]. 人民长江, 2013, 44(15): 54-57.

[7] 宋立松. 钱塘江河口围垦回淤过程预测探讨[J]. 泥沙研究, 1999(3): 74-79.

(本文编辑 武亚庆)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费，所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。