

苏州河河口水闸平面二维水流数值模拟

吴 卫¹ 季永兴² 王瑟澜³ 张景新¹ 刘 桦¹

(1. 上海交通大学船舶、海洋与建筑工程学院 , 上海 200030 ; 2. 上海市水务工程设计研究院 , 上海 200063 ;
3. 上海市苏州河综合整治建设有限公司 , 上海 200002)

摘要 :应用基于浅水方程的平面二维水流数学模型模拟水闸方案实施前后工程区流场的变化 ,为确定工程区的流场计算边界条件 ,建立苏州河和黄浦江流域的大模型和局部小模型 ,并对这 2 个模型进行率定。计算了包括 K100G1.0 等 4 种方案下各控制点的潮位过程线和流速过程线 ,以及控制断面的流量过程线 ,比较了不同底板高程和不同口门宽度对流场的影响。计算结果表明水闸方案 K100G1.0 是可行的。

关键词 苏州河水闸 ;流场 ;平面二维水流 ;数值模拟

中图分类号 :TV66 ;TV131.4 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2007)S1-0052-04

苏州河河口水闸工程位于金山路苏州河河口 ,是上海市水利工程建设总体规划的重要组成部分。由于工程区位于苏州河河口 ,与黄浦江相连 ,属感潮河段 ,可以采取工程措施依据潮位变化规律达到苏州河的调水要求。建设具有双向挡水功能的苏州河水闸将是一种科学、可行的工程方案。建成后的苏州河河口水闸既可为提高苏州河水位、改善水质和景观提供有效的服务 ,又可在发生内涝时从闸门顶排泄苏州河河水 ,降低市区(特别是苏州河沿岸)的防汛压力。

一般而言 ,带自由液面的地表水流动数学模型可分为基于圣维南方程的一维模型、基于水深积分方程的平面二维模型、基于侧向积分的剖面二维模型。一维模型和二维模型的数学提法相对较简单 ,且在一定程度上能反映河口与海岸基本流动规律 ,因此在 20 世纪七八十年代得到了广泛的研究和应用。文献 [1-3] 曾对平面二维模型进行了很好的总结。文献 [4] 对河口与海岸三维潮流数学模型进行了总结。本文将应用基于浅水方程的平面二维水流数学模型 ,模拟水闸方案实施前后工程区流场的变化。

1 平面二维水流数学模型的建立

1.1 基本考虑

湖泊、河口与近海等地表水运动数值模拟一般采用浅水方程 ,该方程的推导基于以下基本假定 :

① 计算域的水平尺度远大于垂直尺度 ,这意味着垂向的动量方程退化为静压关系 ,可以认为垂向的加速度与重力加速度相比可以忽略 ,即满足所谓的浅水假定。② 底部边界采用可滑移边界条件。③ 采用雷诺平均的 N-S 方程 ,其中的雷诺应力与雷诺平均流量通过湍流闭合模式相联系。④ 垂向涡黏性系数通过 $k-\epsilon$ 湍流模式来确定 ,水平向涡黏性系数由 Smagorinsky 亚格子模型计算得到。⑤ 湍流的动能和能量耗散在自由面和底部边界上 ,满足对数分布规律。⑥ 涡黏性是各向异性的 ,一般而言 ,水平向涡黏性系数远大于垂向涡黏性系数。⑦ 对于大尺度的流动模拟 ,忽略侧壁闭边界上的切向剪应力 ,即可自由滑移。⑧ 动边界的处理采用干湿判别法。⑨ 壁边界和底部边界为不可渗透边界。⑩ 采用曲线坐标系 ,以提供模型处理实际工程问题的能力。苏州河河口水闸数学模型的详细说明见文献 [4-6]。

1.2 计算模型的建立

为了模拟闸门、桥墩等水工结构物的影响 ,计算网格应具有足够的空间分辨率。对于大区域流场的数值计算 ,随着网格尺度的减小 ,计算工作量显著增加。对于本工程 ,前文建立的三维模型 [4-6] 退化至平面二维 ,本文选取了 2 个计算模型 ,大模型包括吴淞口至米市渡的黄浦江河段以及苏州河 ,见图 1 ;小模型选取苏州河附近的黄浦江河段 ,见图 2。大模型的吴淞口和米市渡开边界均采用实测水位边界 ,苏

作者简介 :吴卫(1962—) ,女 ,上海人 ,副教授 ,硕士 ,从事河口及近海工程教学与研究。 E-mail :www@sjtu.edu.cn

州河上游取恒定水位。采用吴淞基面为参考基面，建立苏州河与黄浦江的整体数学模型，即大模型，其

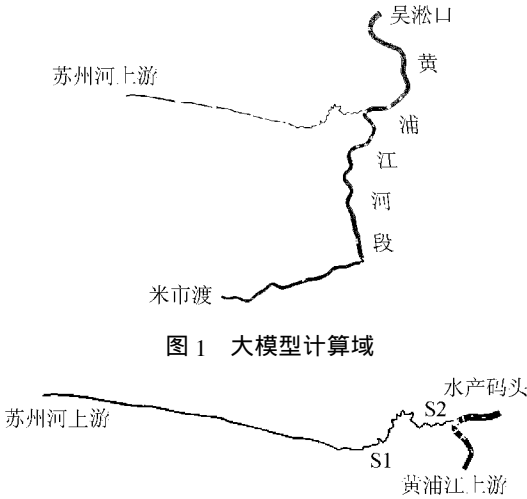


图1 大模型计算域

图2 小模型计算域

目的是为建立工程区的小模型提供开边界条件。采用小模型对各工程方案的流场进行数值模拟，重点讨论工程方案实施后苏州河与黄浦江水域的水位、流速的变化，评估工程效应，为确定工程总体方案提供科学依据。小模型的计算域包括从水产码头至中华造船厂的黄浦江河段及苏州河，见图2，黄浦江的上下游水位由大模型计算给出，苏州河上游取恒定水位。

1.3 模型率定

采用1984年和2002年的同步水文实测资料进行大模型的率定和验证。苏州河上游水位取2.5 m常水位，时间步长 $t = 3\text{ s}$ ，初始潮位取2.5 m，初始流速取0。率定结果表明，曼宁系数可以取0.24，紊动黏性系数 $\epsilon = 1\text{ m}^2/\text{s}$ 。图3和图4分别给出了大模型2002年10月的水位验证计算结果和黄浦公园站

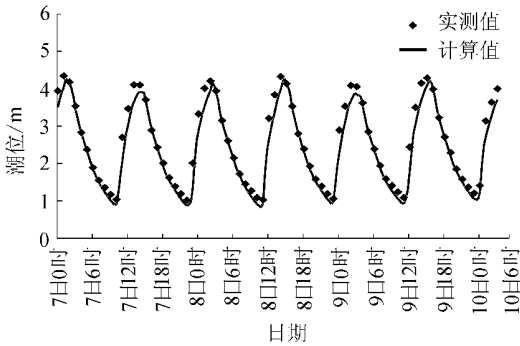


图3 大模型水位率定(黄浦公园站)

流速验证计算结果。计算结果表明本模型可应用于苏州河与黄浦江水域的水动力学模拟，为进一步的局部工程水域的水动力学数值模拟提供边界条件。

采用2002年的同步水文测验资料进行小模型的率定。苏州河上游水位取2.5 m常水位，时间步

长为 $t = 0.6\text{ s}$ ，初始潮位取2.5 m，初始流速取0。率定结果表明，曼宁系数可以取0.24，紊动黏性系数 $\epsilon = 1\text{ m}^2/\text{s}$ 。图5和图6分别给出了小模型2002年10月的水位验证计算结果和黄浦公园站流速验证计算结果。

模型计算中，控制点及控制断面的位置见图2和图7。

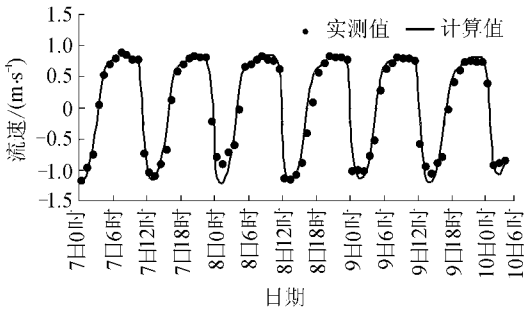


图4 大模型流速率定(黄浦公园站)

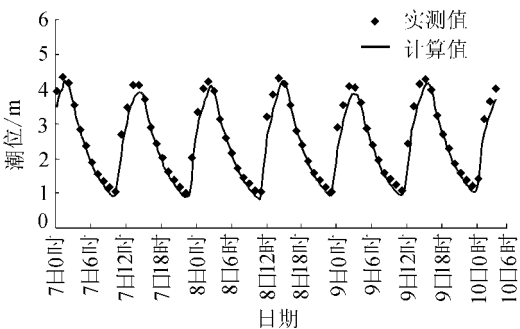


图5 小模型水位率定(黄浦公园站)

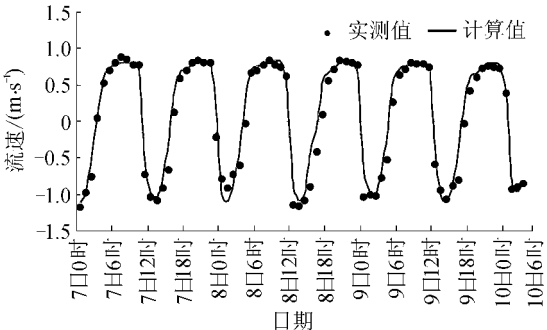


图6 小模型流速率定(黄浦公园站)

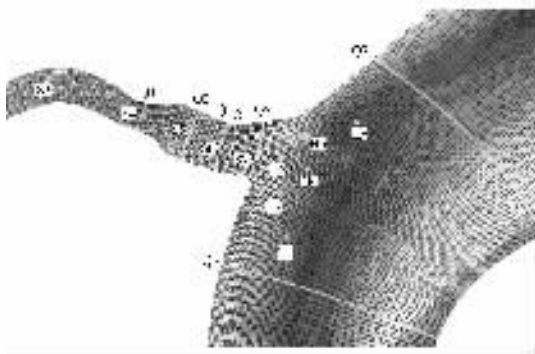


图7 输出控制点和控制断面位置

2 数值实验

2.1 计算工况

为了分析水闸底板高程和水闸口门宽度对水流条件的影响,重点比较 4 种方案的计算结果,见表 1。设方案 K0G0 为工程前工况,即自然条件下的河道形态。计算工程方案时,闸门平卧在河底。

表 1 计算工况

方案编号	闸门宽度/m	闸门底板高程/m
K100G1.0	100	-1.0
K100G1.5	100	-1.5
K100G2.0	100	-2.0
K85G1.5	85	-1.5

2.2 K100G1.5 方案计算结果

通过数值模拟,比较了工程建设前后各控制点潮位、流速和各控制断面流量变化过程,表 2 给出了高潮位、低潮位、落急流速和涨急流速的数值计算结果。从工程建设前后各控制点潮位过程线可以看出,苏州河上游高潮位基本不变,低潮位有所减小,差值沿苏州河上溯而减小。工程区及附近由于受黄浦江大水水位控制,潮位基本不变。黄浦江潮位不受工程影响。

工程建设前后各控制点流速过程线表明,苏州河上游(S1,S2,S3)落潮流速受工程影响流速略增加,涨潮流速基本不变。水闸工程附近(S4,S5)由于沿岸两侧浅滩疏浚,断面面积增加而流量变化不多,使主槽涨落潮流速明显减小(约 0.2~0.4 m/s)。水闸工程处(S6,S7)流速减小最大(落急时达 0.5 m/s),这是因为工程建设后此处河底沿河宽为平底,整个断面流速沿河宽分布基本均匀,与工程建设前相比没有明显的主槽流速。工程对黄浦江流速的影响仅限于近苏州河口处(H3),该处流速有所减小;落潮时,H5 处流速也略有减小。

比较工程建设前后各控制断面的流量过程线,可以看出,工程建设后苏州河下游的落急流量(除闸门位置处)略微增加,这是由于工程建设后苏州河口口疏浚使得断面拓宽,起到一定的引流作用,而闸门

处(Q4)的落急流量则略有减小;涨急流量基本不变,黄浦江各控制断面的涨落潮流量没有变化。

比较工程建设前后的落急流场图和涨急流场(图 8~9)可以看出,工程建设后苏州河口门附近两侧的浅滩已被疏浚,现有的落急水流归槽现象已不存在。涨落急流速方向与水闸断面轴线并未正交,夹角在 10°左右。

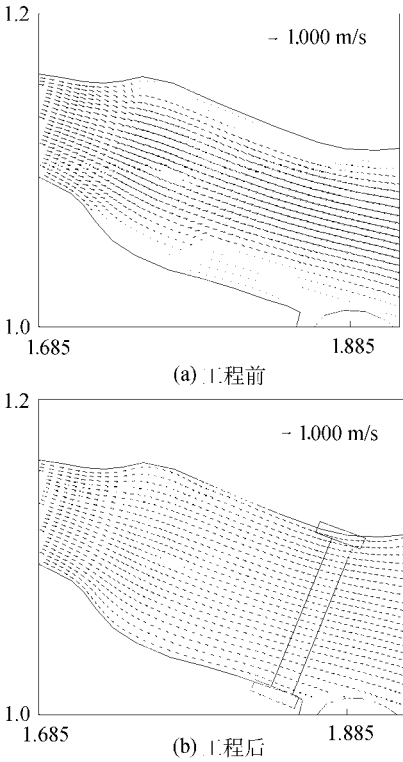


图 8 K100G1.5 方案工程前后落急流场

2.3 底板高程对流场的影响

通过比较口门宽度均为 100 m、底板高程不同的 3 种工况(方案 K100G1.0,K100G1.5 和 K100G2.0)的计算结果,分析底板高程对工程区水动力条件的影响。为了便于分析,以 K100G1.5 方案的涨急、落急流场为参照值,比较底板高程分别为 -1.0 m 和 -2.0 m 时流速的变化规律。结果表明,在口门宽度相同的情况下,底板高程从 -1.5 m 抬高到 -1.0 m,工程区大部分范围内流速可增大 0.15 m/s 左右,而涨急流速可增大 0.08~0.10 m/s,其原因是工程建

表 2 2002 年 10 月与千年一遇大潮工程建设前后潮位、流速比较

控制点	低潮位/m				高潮位/m				落急流速/(m·s) ⁻¹				涨急流速/(m·s) ⁻¹			
	2002 年 10 月		千年一遇大潮		2002 年 10 月		千年一遇大潮		2002 年 10 月		千年一遇大潮		2002 年 10 月		千年一遇大潮	
	工程前	工程后	工程前	工程后	工程前	工程后	工程前	工程后	工程前	工程后	工程前	工程后	工程前	工程后	工程前	工程后
S1	1.92	1.91	2.15	2.14	3.38	3.38	4.65	4.66	0.66	0.67	0.73	0.74	0.90	0.91	1.44	1.45
S2	1.00	0.94	1.07	0.99	3.87	3.88	5.53	5.54	0.58	0.60	0.70	0.73	0.66	0.66	1.02	1.03
S4	0.95	0.89	1.01	0.94	3.88	3.89	5.56	5.57	0.62	0.50	0.75	0.62	0.67	0.58	1.05	0.94
S6	0.90	0.89	0.95	0.94	3.89	3.90	5.59	5.59	0.85	0.37	1.01	0.45	0.56	0.41	0.81	0.63
H2	0.89	0.89	0.94	0.94	3.91	3.91	5.60	5.60	0.43	0.43	0.55	0.54	0.67	0.66	1.01	1.00
H3	0.89	0.89	0.94	0.94	3.91	3.91	5.60	5.60	0.44	0.29	0.55	0.35	0.48	0.48	0.77	0.77
H4	0.89	0.89	0.94	0.94	3.90	3.90	5.60	5.60	0.49	0.49	0.57	0.57	0.75	0.75	1.16	1.16
H5	0.89	0.89	0.94	0.94	3.90	3.90	5.60	5.60	0.44	0.38	0.53	0.48	0.51	0.51	0.82	0.81

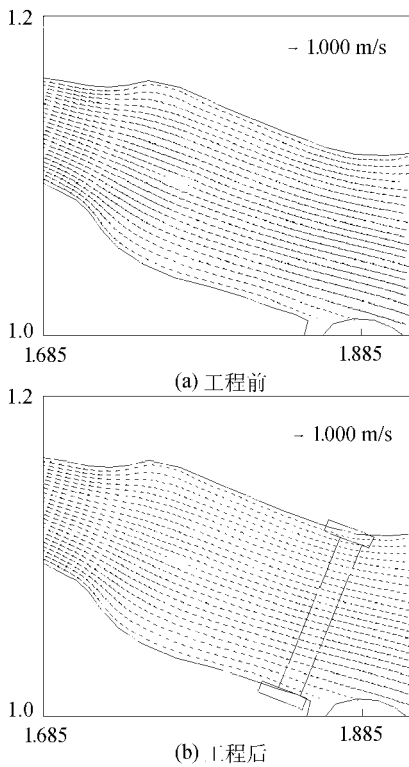


图9 K100G1.5方案工程建设前后涨急流场

设后工程区的浅滩被疏浚至与底板高程相当的高程,K100G1.0方案的过水断面小于K100G1.5的过水断面,使得垂线平均流速有所增大。与K100G1.5方案相比,K100G2.0方案的涨急、落急流速均有所减小。综合分析以上结果,可以发现当底板高程从-2.0m上抬到-1.0m时,工程区的涨急、落急流速均增大,其中落急流速增大较大,可达0.20m/s。

为了进一步分析底板高程对泥沙冲淤趋势的影响,比较了-2.0m底板高程与-1.0m底板高程2种方案的落急床面应力差值及涨急床面应力差值的分布,结果表明,当底板高程抬高时,床面应力有明显的增大。

2.4 闸门宽度的影响

为了分析苏州河口闸门宽度的影响,这里比较底板高程均为-1.5m,闸门宽度分别为100m和85m的2种工况,即方案K100G1.5和K85G1.5。计算结果表明,口门缩窄后,主槽流速增大;两侧墩台的上、下游在涨潮和落潮时均出现回流区,流速减小。目前苏州河河口两侧已淤浅,缩窄至85m的方案对现状水动力条件影响较弱。

2.5 水文条件的影响

将千年一遇大潮与2002年10月大潮条件下工程建设前后潮位与流速的比较列于表2。由表2可知,与2002年10月的大潮相比,千年一遇大潮条件下方案K100G1.5对流场的影响范围一致,工程建设前后的潮位、流速变化规律也基本一致。

3 结 论

基于平面二维水动力学数学模型,本文对苏州河水闸的4种工程方案进行了数值模拟,得到以下结论:

a. 对100m闸门宽度、-1.5m底板高程的工程方案(K100G1.5),苏州河上游高潮位基本不变,低潮位有所减小,向上游沿程递减;水闸工程附近水域的水位受黄浦江大水体水位控制基本不变;黄浦江潮位基本不受工程影响。苏州河上游落潮流速略有增加,涨潮流速基本不变;水闸工程附近流量变化不大,主槽涨落潮流速明显减小;水闸工程处流速减小达到最大;工程对黄浦江流速的影响仅限于近苏州河口处,流速有所减小。黄浦江各控制断面的涨落潮流量没有变化。该工程方案是可行的,但由于工程区河道被均匀化,主流流速降低,对工程区的泥沙淤积分布会有影响。

b. 底板高程从-2.0m变化到-1.0m时(K100G1.0),工程区涨急流速、落急流速均呈增大的趋势,对缓解水闸的局部泥沙淤积是有利的。

c. 85m口门宽度工程方案(加两侧浅滩疏浚)对苏州河河口流态的影响大于100m口门宽度工程方案,主流区流速增大,但在两侧墩台处有明显的回流。考虑到苏州河河口两侧已有明显的淤积体存在,若采用85m口门宽度工程方案(不进行浅滩疏浚)对现状流场的影响比100m口门宽度的工程方案(加疏浚)的影响弱,且可降低水闸的造价。

d. 千年一遇大潮条件下,各工程方案对工程区流场的影响规律与2002年10月大潮计算结果基本一致。

参考文献:

- [1] ABBOTT M B. Computational hydraulics: element of the theory of free surface flows [M]. London: Pitman Publishing Limited, 1979.
- [2] ABBOTT M B. Range of tidal flow modeling [J]. J of Hydraulic Engineering, 1997, 123(4): 255-277.
- [3] STELLING G S. On the construction of computational method for shallow water flow problem [J]. Rijkswaterat Communication, 1984, 35.
- [4] 刘桦,何友声. 河口三维流动数学模型研究进展 [J]. 海洋工程, 2000, 18(2): 87-93.
- [5] 刘桦,吴卫,何友声,等. 长江口水环境数值模拟研究: 水动力数值模拟 [J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2000(1): 17-30.
- [6] 张景新. 河口海岸潮流、波浪、泥沙数学模型研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2005.

(收稿日期 2007-01-15 编辑 骆超)