

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222458

洪潮双向水流作用下的急弯河段治理效果分析

李磊岩,包增军,何震洲

(浙江省钱塘江流域中心,浙江 杭州 310016)

摘要: 受洪潮水流交互作用的水域,水沙条件复杂,其弯道治理较一般河流难度更大,实施效果具有更多不确定性。为了解受洪、潮水双向水流作用下的急弯河段治理效果,以钱塘江河口闻家堰段弯道治理为例,在已实施完成的凹岸抛石护岸结合凸岸退堤切滩等综合治理措施的基础上,利用治理前后多年实测水文地形观测资料,综合分析了弯道治理工程实施前后的洪潮水流条件、深槽分布、冲刷高程、回淤速度等因素变化。结果表明,闻家堰段弯道治理后,其弯道效应大为减弱,水流条件得到改善,深槽分布向江中外移且最低冲刷高程抬高,治理取得了较好的成效,可为类似急弯治理工程提供借鉴。同时,还采用河相关系法和断面平均值统计法对工程实施后的平衡断面进行了预测分析,初步确定了河段清淤条件,可对后续工程的运行维护提供指导。

关键词: 洪潮水流;急弯河道;河道治理;深槽分布;回淤特征

中图分类号: TV856

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0141-04

1 概况

钱塘江河口径、潮流比值小,海域来沙多于陆域来沙,属典型的河口湾型^[1],通常表现为洪冲潮淤。闻家堰河段位于钱塘江河口河流近口段与河口段交接处,受洪潮水交互作用显著。由于该河段处于急弯河段,凸岸泥沙不断淤积形成明显突嘴,加之人为围垦影响,导致治理前在此处形成中心角 110° 、曲率半径约 $1\ 000\text{ m}$ 的急弯,过水断面比上游减少 40% ,不仅产生严重阻流,且使凹岸海塘受到极大的冲刷威胁,最大冲刷幅度达 14 m 以上。为解除该急弯河段的安全影响,1998~2006年该河段实施了全面治理。相对于单向流河流,洪潮水流交互作用水域的水沙运动复杂,治理过程中需充分关注其不同于一般河流的双向来流、来沙特点^[2]。弯道治理本身又受局部环流和横向输沙影响,使洪潮双向水流作用下的弯道治理难度更大,实施效果具有更多不确定性。而以往急弯河道治理多以无潮汐单一流向河流为主,治理方略上多采取抛石护岸、修筑丁坝或切滩等单一措施^[3-5],在分析方法上常以数值模拟和试验分析为主^[6-8]。本治理工程采取了抛石护岸结合退堤、切滩等综合措施,主要由三部分工程组成,

即:①凹岸海塘堤脚外 $30\sim 117\text{ m}$ 范围内抛 1.3 m 厚块石护脚结合塘身防渗加固;②凸岸拆除原围堤并在后方新建 3.0 km 海塘,退地还江面积 $24.1\times 10^4\text{ m}^2$;③退堤线外 $50\sim 200\text{ m}$ 范围内切滩至 $1.17\sim -3.83\text{ m}$ 高程。工程平面布置见图1,退堤、切滩断面见图2。分析治理工程实际效果不仅可对河段治理工程实践与运行维护具有重

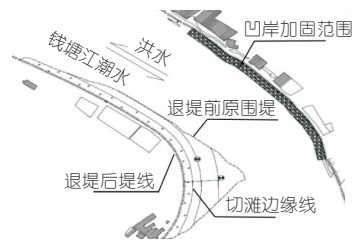


图1 治理工程平面布置图

Fig. 1 Layout of regulation project

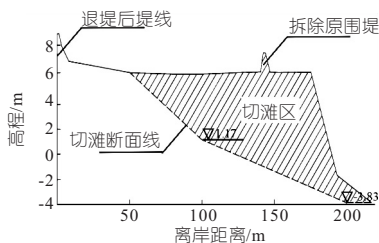


图2 退堤、切滩工程断面示意图

Fig. 2 Section sketch of dike-retreating and shoal-cutting project

收稿日期: 2022-11-21, 修回日期: 2023-01-02

基金项目: 浙江省水利厅科技计划项目(RC1203)

作者简介: 李磊岩(1977-),男,硕士、高级工程师,研究方向为河口治理, E-mail: 705766997@qq.com

要的指导意义,对于其他潮汐河口弯道综合治理和防汛措施拟定也具有较好的参考作用。为此,利用实测水文地形资料对本文工程治理前后的水沙变化和实施效果开展综合对比分析,并预测后续平衡断面,以期为工程维护管理和同类工程治理实践提供借鉴。

2 观测资料

主要采用治理前 2000 年 8 月 2~3 日开展的大潮期同步潮流观测资料和治理后 2010 年 7 月 10~11 日洪水期间及 2010 年 8 月 27 日大潮期 ADCP 全断面走航式潮流观测资料。地形观测资料主要利用 1954 年以来该弯道历次较大洪水下的实测水下地形图。

3 治理前后河段水流、深槽和回淤等因素变化

3.1 治理后流速变化

3.1.1 洪水条件下流速变化

2010 年 7 月 10~11 日($Q=11\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$)洪水期间,在河段上、中、下游分别布置了# 52、# 48、# 39 三个断面,进行了 ADCP 全断面走航式同步观测,对其横、垂向流速开展数据采集。根据采集的资料开展统计分析,得到的流速平面和断面分布见图 3。由图 3 可知,治理后的主流垂线平均流速大于 1.5 m/s 的范围主要分布在距凹岸 200~400 m 以外,其断面最大流速有极少部分在 2.0 m/s 左右,较前期论证中 $12\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 情况下的数模计算结果大 7.5%。虽然由于观测条件限制,治理前无洪水流速分布观测资料比对,但从治

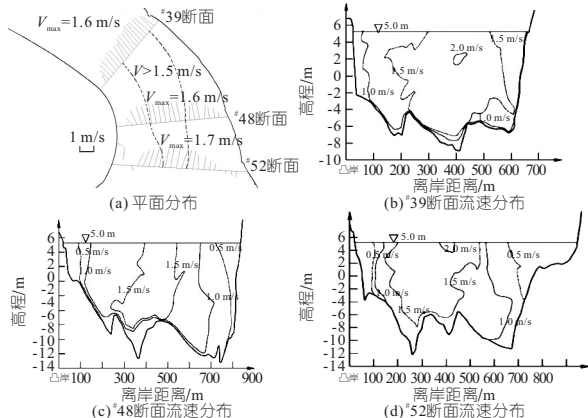


图 3 2010 年 7 月($Q=11\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$)洪水条件下流速统计分布

Fig. 3 Statistical distribution of flood velocity happened in July 2010($Q=11\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$)

理后的流速平面分布也可说明,凹岸近岸流速较河道中心流速小,凹岸堤前冲刷态势得到缓解,这与观测到的治理前后水下深槽位置变化也相吻合。

3.1.2 潮水条件下流速变化

治理前的 2000 年 8 月 2~3 日大潮期间,在弯道顶点断面进行了三个点位的同步垂线流速观测,将各时段流速观测结果绘于图 4(a)。由图 4(a)可知,治理前凸岸侧涨潮历时仅为 1 h,而江中和凹岸侧涨潮历时达 4 h,两者相差 3 倍之多,分析其原因主要是凸岸过于突出,使潮水受挤压后突然扩大产生回流区,从而造成回流淤积,扩大了弯道效应。为确定治理后潮水条件下的流速变化情况,2010 年 8 月 27 日大潮期间,在相同断面开展了 ADCP 全断面走航式同步流速观测,各时段流速观测结果见图 4(b)。由图 4(b)可知,治理后凸凹岸涨潮历时均接近 4 h,在全部涨落潮过程中回流现象未出现,说明治理后随凸岸过流断面和水深的加大,潮流挤压情况缓解,未形成回流淤积条件。同时根据观测,治理后的凸岸最大流速已达到江中流速的 62%,而治理前仅为 25%。表明通过治理,凸岸流速相比江中流速增加,流速分布趋于平衡,弯道效应降低。由全断面流速分布观测结果可知,实测涨急最大流速为 1.90 m/s,而落急最大流速为 1.03 m/s,两者相差达 1.84 倍,显示在如此大的潮流条件和潮波变形情况下,凸岸仍未产生回流。

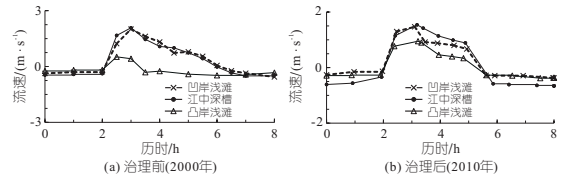


图 4 治理前、后大潮期断面流速变化过程

Fig. 4 Variation process of cross-sectional velocity before and after regulation during spring tide

3.2 治理后的深槽冲刷与分布特征

3.2.1 深槽分布特征

利用 1954~2011 年闻家堰弯道治理前后较大洪水的实测水下地形图,统计其深槽线平面分布情况,并基于治理前后的深槽线摆动范围(图 5)来判断治理后深槽分布的特征变化。由图 5 可看出,治理前弯道深槽摆动主要分布于近凹岸塘脚处到塘外 150 m 范围,而治理工程实施后,河段深槽摆动范围已外移至凹岸塘脚外 50~400 m,深槽向江中移动了 50~250 m,说明凸岸的人为围垦,对于天然稳定河相关系具有一定的影响,切滩后的河相关系较为稳定,使主流位置发生自然调整。深槽分布的这种变化特征与治理前的预

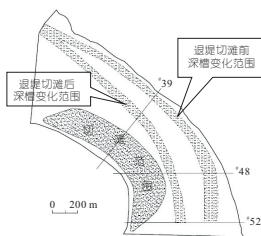


图 5 治理前后深槽线摆动变化范围比较
Fig. 5 Comparison of thalwegs migration range before and after regulation

测相一致, 且对于防止凹岸塘前滩地的冲刷具有重要作用, 可使凹岸海塘防冲保护态势得到明显缓解。

3.2.2 深槽冲刷深度

除深槽分布外, 深槽高程变化也是衡量治理效果的重要参数。因此, 选取典型年际洪水过后 2.5 km 弯道范围内的深泓线纵向高程进行汇总, 结果见图 6。由图 6 可知, 在治理前的 1954、1973、1989、1992、1997 年等 5 次洪水中, 弯道最低冲刷高程均在 -20 m 以下。而自切滩工程完成后, 在历次大洪水中, 河段内最低点均高于 -16 m。尤其是 1997 年“7.9”洪水最大流量 16 000 m³/s, 河段最低冲刷高程达 -26.6 m, 而与其流量相近的 2011 年 (Q_{max} = 17 000 m³/s), 其最低深泓高程仅为 -15 m 左右, 相比 1997 年冲刷减少了约 10 m。说明治理工程完成后, 不但主流位置发生调整, 且洪水期流速分布趋于均匀, 从而导致最低冲刷高程也发生明显抬升, 冲刷深度大为减少, 凹岸海塘的出险几率进一步降低。

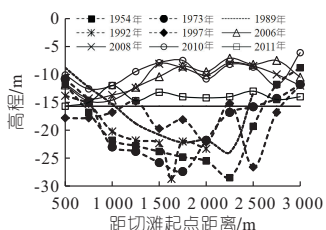


图 6 典型年际河段深泓线纵向高程变化
Fig. 6 Longitudinal elevation variation of thalwegs in typical years

3.3 治理后的回淤速度及平衡断面预测

3.3.1 回淤速度分析

切滩完成前后在弯道水域进行了多年固定断面监测, 以获取切滩回淤情况。利用监测到的实测资料, 统计切滩部位上、中、下游 (# 52、# 48、# 39) 三个代表断面的大潮高潮位以下面积变化, 统计结果见表 1。由表 1 可知, 2006 年 2 月切滩完成后, 三个断面平均扩大了 3 333 m², 至 2011 年 7 月仍扩大 2 443 m²。其间, 在经历了 2006~2009 年四个枯水年和 2010~2011 年两个丰水

表 1 弯道代表断面面积变化统计

Tab. 1 Statistical of fixed-section area in bend m²

测图时间	上游断面 (# 52)		中间断面 (# 48)		下游断面 (# 39)	
	面积	面积差	面积	面积差	面积	面积差
2003 年 7 月	7 120		6 650		5 250	
2006 年 2 月	10 870	3 750	10 500	3 850	7 650	2 400
2006 年 7 月	10 120	-750	11 500	1 000	7 125	-525
2008 年 7 月	9 500	-620	12 800	1 300	7 000	-500
2009 年 10 月	8 750	-750	9 500	-3 300	6 500	-125
2010 年 3 月	9 000	250	9 250	-250	6 700	200
2010 年 7 月	9 250	250	9 000	-250	6 500	-200
2011 年 7 月	9 750	500	9 100	100	7 500	1 000
合计		2 630		2 450		2 250

年, 与切滩初期相比总计回淤 890 m², 回淤量占切滩量的 26.7%, 平均回淤速度为 148 m²/年, 回淤量值不大, 切滩效果较为显著, 这与切滩后潮流流速分布变化特征表现一致。

3.3.2 平衡断面预测分析

(1) 河相关系法。韩曾萃等^[9]根据钱塘江、曹娥江等国内外 12 条潮汐河口资料, 求得经验河相关系式并经详细验证, 计算平均误差在 10% 左右。计算关系式为:

$$A = 4.7Q_e^{0.9}/S^{-0.2} \quad (1)$$

$$Q_e = (W_f + Q_0 T)/T_e \quad (2)$$

式中, A 为半潮水位下的河道断面面积; Q_e 为多年平均落潮流量; S 为落潮平均含沙量; W_f 为年平均潮差对应的涨潮潮量; Q₀ 为多年平均径流量; T 为一个潮周历时; T_e 为平均落潮历时。

利用式(1), 依据相关实测和统计资料^[10], W_f 取闻家堰水文站年平均潮差 (0.98 m) 下的涨潮潮量 30 × 10⁶ m³, 河段多年平均径流量为 1 140 m³/s, 平均落潮历时为 37 720 s, 平均潮差下实测落潮含沙量为 0.07 kg/m³。经计算, 该河段半潮水位下平衡断面面积 A 约为 7 500 m²。

(2) 断面平均值统计方法。在河段下游闻家堰以下 2~8 km 无支流汇入的顺直河段内, 对已掌握的 10 个断面进行统计计算, 结果见表 2。由表 2 可知, 该河段半潮水位下断面面积总均值为 7 220 m², 与河相关系理论计算结果接近。

表 2 下游顺直河段半潮水位下断面面积情况统计

Tab. 2 Statistical of cross-section area under semi-tidal level in downstream straight reach

断面	1977 年		1999 年	
	3 月面积/m ²	7 月面积/m ²	3 月面积/m ²	7 月面积/m ²
1	7 010	5 880	6 550	6 270
2	5 420	6 160	6 220	6 620
3	7 850	8 860	8 470	8 660
4	8 100	8 720	8 026	9 640
5	6 630	7 710	6 930	8 400
6	6 170	7 100	5 940	7 950
7	5 980	6 550	6 270	7 880
平均	6 740	7 300	6 920	7 910

综合两种平衡断面预测结果,采用河相关系数法确定本河段的平衡断面面积为 $7\,500\text{ m}^2$,考虑到水文年有丰、平、枯的年际变化和年内季节变化,相应河床也会自动调节容量,如果出现连续若干年其半潮水位下代表断面面积小于 $7\,500\text{ m}^2$,则需考虑进行疏浚以减小连续回淤影响,此原则可作为今后河道清淤维护的依据。

4 结论

a. 通过抛石护岸结合退堤、切滩等综合措施的实施,位于河口洪潮交互作用区的闻家堰弯道,其流速分布趋于均匀,回流区消失,弯道效应大为减弱,进而改善弯道深槽分布,最低冲刷高程抬高,且有效控制了回淤速度,治理取得了较好的成效。

b. 对洪潮水双向水流影响下,采取弯道退堤切滩措施,应重点针对双向流的流速分布、环流作用等水流条件的改善,减弱弯道效应的动力因素,可取得较好的治理效果。

c. 在有效改善水流条件的前提下,可综合考虑凸岸退堤切滩与凹岸堤脚抛石等加固措施的结合,以提高治理工程的经济技术可行性。

d. 治理工程实施后,应及时开展必要的观测,做好治理效果的跟踪和回淤分析,并预测平衡断面,指导治理后的运行维护,持续保持治理效果。

参考文献:

- [1] 周志德,乔彭年. 潮汐河口分类的探讨[J]. 泥沙研究,1982(2):52-59.
- [2] 熊绍隆. 潮汐河口河床演变与治理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [3] 郭洪峰,张素娜. 黄河下游弯道治理方法探讨[J]. 人民黄河,2020,42(2):53-55.
- [4] 徐永年,梁志勇,王向东,等. 长江九江河段河床演变与崩岸问题研究[J]. 泥沙研究,2001,8(4):41-45.
- [5] 胡建平. 澜沧江弯道浅滩整治技术分析[J]. 水运工程,2008(9):118-120.
- [6] 杨玲霞,张银华,吴建平,等. 改善弯道急流流态的试验研究[J]. 中国农村水利水电,2006(7):77-79.
- [7] 姚仕明,赵占超,渠庚,等. 弯曲河道水流泥沙运动研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(6):73-79.
- [8] LORENZO BEGNUDELLI, ALESSANDRO VALIANI, BRETT F SANDERS. A balanced treatment of secondary currents, turbulence and dispersion in a depth-integrated hydrodynamic and bed deformation model for channel bends[J]. Advances in water resources,2010,33(1):17-33.
- [9] 韩曾萃,符宁平,徐有成. 河口河相关系及其受人类活动的影响[J]. 水利水运工程学报,2001,3(1):30-37.
- [10] 韩曾萃,戴泽衡,李光炳,等. 钱塘江河口治理开发[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

Effect Analysis of Sharp-bend Reach Regulation Affected by Bi-directional Flow Due to Flood and Tide

LI Lei-yan, BAO Zeng-jun, HE Zhen-zhou

(Qiantang River Basin Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310016, China)

Abstract: Water and sediment conditions are complicated in waters affected by the interaction of flood and tide. Therefore, the bend regulation in these waters is more difficult and its effect is more uncertain than that of ordinary rivers. This paper aims at the above problems by taking the treatment project of Wenjiayan bend as an example, which lies in Qiantang estuary. This treatment project consisted of the riprap protection at concave bank and retreating dike at the opposite bank combine with the shoal-cutting measure. Based on the observed hydrology and topography data for years, the variation of flow conditions, deep channel distribution, scouring elevation and siltation velocity before and after the project was analyzed. The results show that the bend effect is greatly weakened and flow conditions are improved after the treatment. Meanwhile, the deep channel in the bend reach moves from the foot of the dike to middle. These results can provide reference for measures to similar sharp-bend treatment. Meanwhile, the balance section area after the project implementation was predicted through the methods of river correlation coefficient method and section average statistics. The dredging conditions of the reach were determined, which can provide guidance to operation and maintenance for the subsequent project.

Key words: flood and tide flow; sharply curved channel; river regulation; talweg distribution; siltation characteristic