



北江白石窑水利枢纽坝下变动回水区 航道整治试验研究*

费晓昕¹, 张绪进², 倪志辉², 杨文浩¹, 王明会¹

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 北江白石窑枢纽坝下变动回水区是北江中游重要的碍航浅滩。整治前, 航槽水浅, 船舶须减载或等水航行, 塞船现象常有发生, 维护水深仅在0.8~1.0 m, 甚至断航现象时有发生, 实施航道整治工程十分必要。为达到Ⅲ级航道标准, 本文在分析浅滩的演变特点基础上, 开发了河工模型, 充分利用前整治建筑物, 以因势利导为原则, 利用挖槽、整治丁坝和疏浚等工程措施, 对2个Ⅲ级航道整治方案进行对比分析, 提出整治方案。从分析结果来看, 此河段达到2.5 m×60 m的航道尺度是切实可行的。

关键词: 航道整治; 浅滩; 变动回水区; 回淤量

中图分类号: U 617.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0146-05

Model experiment on fluctuating backwater area under the dam of Beijiang Baishiyao water conservancy

FEI Xiao-xin¹, ZHANG Xu-jin², NI Zhi-hui², YANG Wen-hao¹, WANG Ming-hui¹

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. The Southwest Waterway Engineering Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: The fluctuating backwater area under the dam of Beijiang Baishiyao water conservancy is an important navigation obstacle shoal to the middle of North River. Before waterway regulation engineering, the depth of waterway is shallow, so ships must reduce the load or delay sailing. Ship jam often occurs and water depth keeps only between 0.8~1.0 m. Even suspension of shipping occurs from time to time, so waterway regulation engineering is necessary. In order to achieve Class-III channels, this paper analyzes the characters of the evolution of these shoals, develops a river work model, takes full advantage of the regulating structures and makes the best use of the general trend, and takes appropriate measures to analyze the two waterway regulation schemes of Class - III channels, then proposes regulation scheme. According to the analysis result, it is feasible for the reach to achieve the waterway scale of 2.5 m × 60 m.

Key words: waterway regulation engineering; shallow; fluctuating backwater area; sediment erosion and deposition regulation measure

北江是粤北地区与珠江三角河网的唯一水路通道, 沿江两岸聚集了众多的企业, 水运对于沿江企业以及广东省的发展都是至关重要的, 为当地经济文化的发展发挥了重大的作用。然而, 枢纽的建设以及过度采砂引发了如白石窑与飞来

峡之间回水不衔接、枢纽下泄流量不均衡致使的航道搁浅等碍航问题的出现^[1], 北江中游的V级(500吨级)航道标准远远不能满足航运的需要, 因此广东省交通运输厅组织开展了北江乌石至三水河口217 km河段的Ⅲ(1 000吨级)级航道整治

收稿日期: 2012-09-10

*基金项目: 2012年度省部共建水利水运工程教育部重点实验室暨国家内河航道整治工程技术研究中心开放基金(SLK2012A02)

作者简介: 费晓昕(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸及近海工程的研究。

工程的工作,航道尺度为 $2.5\text{ m} \times 60\text{ m} \times 330\text{ m}$ 。北江乌石至三水河口主要存在濠里枢纽坝下、白石窑枢纽坝下、飞来峡枢纽坝下3个浅段,白石窑坝下浅段是整治的难点。白石窑枢纽坝下19 km河道形式多样,特性迥异:有回水不衔接段、变动回水区段以及常年回水区(库尾浅段)。其中,变动回水区航道(观音岩至大罗肚)长4 km,此河段受上下游枢纽运行方式的影响,水位变化较大,低水时江心洲或礁石出露,航槽水浅,船舶须减载或等水航行,塞船现象常有发生,维护水深仅在 $0.8 \sim 1.0\text{ m}$,急需要对此河段进行航道整治工作,以使通航条件得以改善,达到设计航道尺度 $2.5\text{ m} \times 60\text{ m} \times 330\text{ m}$ 。本文就白石窑坝下变动回水区段的航道整治研究进行阐述。

1 河道概况

白石窑枢纽和飞来峡枢纽均竣工于1999年,白石窑电站属于径流式电站,其下泄流量与天然流量基本相同,上游来流量 $Q > 3\ 860\text{ m}^3/\text{s}$ 时,停止发电,敞泄;流量 $Q \leq 3\ 860\text{ m}^3/\text{s}$ 时,上游水库水位按 $34.0 \sim 36.5\text{ m}$ 运行。电站调峰采用固定时程的运行方式,根据电站日调节调峰不稳定流计算成果,调峰时下游水位最大时涨幅 0.54 m ,最大时降幅 0.57 m ,断面最大日变幅 1.27 m 。飞来峡枢纽主要以防洪为主,同时兼有发电、航运、供水和改善生态环境等作用,是北江流域综合治理的关键工程。白石窑枢纽坝下河段于21世纪初进行了一系列的航道整治工程,布置了大量的丁坝,目前通航标准为内河V级航道标准。枢纽建成后,飞来峡枢纽正常蓄水位回水末端观音岩至常年回水末端的大罗肚之间为变动回水区,该段长4 km,河道顺直微弯。河段内有量水井、凤凰嘴和大罗肚3个浅滩:量水井位于CS65—CS70、凤凰嘴位于CS77—CS81、大罗肚位于CS85—CS90^[3](图1),受上、下两枢纽运行的影响,该河段具有水库与天然河道的双重特性,水沙条件复杂,河床冲淤交替。

研究河段地处亚热带,地表土壤主要是暗红壤及黄壤,植被以亚热带常绿阔叶林为主,

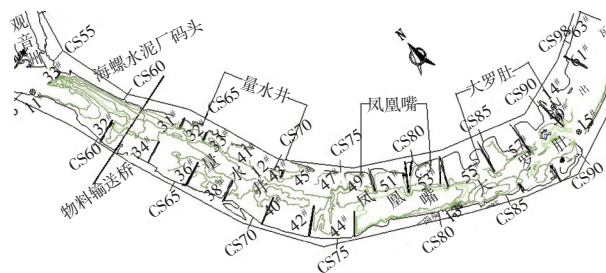


图1 变动回水区工程布置

植被覆盖良好,水土流失不严重,平均侵蚀模数小,河流含沙量较小,属于少沙河流,河床覆盖层以沙为主,间有卵石层,河床质中值粒径在 $0.3 \sim 0.81\text{ mm}$ 。该流域的泥沙主要来自武水、浈江以及沿程两岸汇入的泥沙,悬移质泥沙输移与来水相适应,洪水期同时也是泥沙输移较大的时期,输沙主要集中在汛期。汛期(4—9月)输沙量约占全年输沙量的92%左右。另外,本河段径流主要由降水形成,径流时空变化与降水时空变化基本一致,年内分配不均匀,丰枯流量相差较大,4—9月为流域丰水期,10月至翌年3月为流域枯水期^[2]。

2 河床演变

变动回水区水流动力特点是:当飞来峡枢纽腾空库容时,其水位最低,而相应的比降最大,流速最快。随着枢纽蓄水的增加,比降随之减小,流速变缓,水流挟沙能力也随之减弱,泥沙落淤。由于变动回水区多数时候都处于高水位、小流速状况,上游带来的泥沙无法冲刷,造成本段河床抬高,淤积成滩。

图2是回水变动区内部分典型断面2001—2011年间的地形纵向变化,主要表现为左冲右淤。另外,从平面位置来看,CS60—CS80 2011年深泓线较2001年深泓线有向右偏的趋势,CS80—CS90 2011年深泓线较2001年深泓线有向左偏的趋势(图3)。再从纵向变化来看,白石窑坝下至大罗肚河段普遍冲刷降低,降低幅度一般为 $1 \sim 2\text{ m}$ 。由此可见,经过原V级航道整治工程实施后,河床整体有所冲刷,浅滩发育比较稳定,但是,随着III级航道标准的提出,航道尺度大幅度提升,原先适应V级航道标准的整治建筑物已不能够满足维持拟定的挖槽后的III级航道标准,需要束窄部分

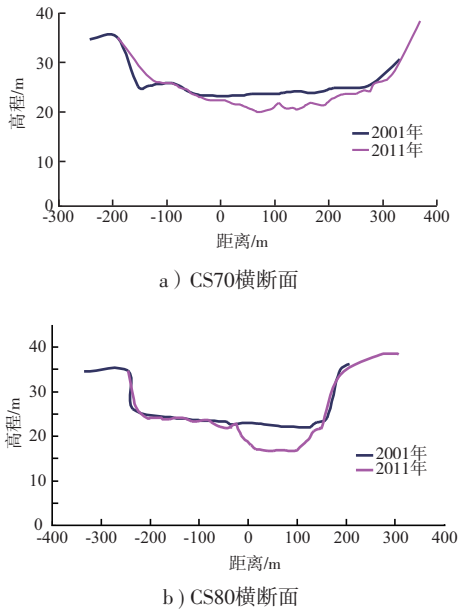


图2 典型断面地形纵向变化

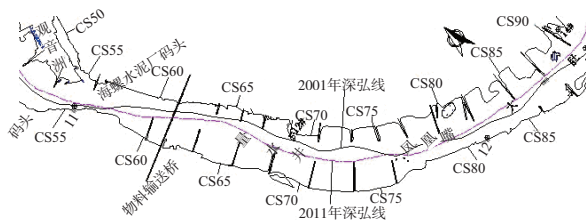


图3 深泓线平面位置变化

整治线宽度，以利于水流冲刷河床，保持2.5 m航深，因此，需优化整治建筑物的布置。

3 模型设计及验证

为保证模型几何相似，阻力相似和水流运动相似，根据试验场地大小和模型枯水浅区最小水深要求、模型加糙等条件，选定定床模型的平面比尺 $\lambda_L=150$ ，垂直比尺 $\lambda_h=60$ ，模型变率为 $\eta=2.5$ ，流量比尺 $\lambda_Q=69\ 713.70$ ，糙率比尺 $\lambda_n=1.25$ ，水流时间比尺 $\lambda_t=19.36^{[4]}$ 。动床模型采用相同的几何比尺，同时为满足泥沙起动相似、挟沙相似和河床变形相似，选取专门制备的中值粒径为 $d_{50}=0.24\text{ mm}$ ，密度 1.16 t/m^3 ，干密度 0.69 t/m^3 的合成塑料沙，确定各项比尺要素如下：泥沙粒径比尺 $\lambda_d=2.29$ 、推移质单宽输沙率比尺 $\lambda_{gb}=18$ 、推移质泥沙的冲淤时间比尺 $\lambda_{t2}=800$ 。模型建成后对其瞬时水面线、流速分布、流向和2011年9月6日—2011年12月20日河床冲淤演变过程、终止地形进行了验

证。验证结果表明：定床模型和动床模型的相似性均满足规范要求。

4 定床模型试验

4.1 整治思路及参数

根据白石窑枢纽坝下回水变动区河段的水沙特性、浅滩成因、演变规律及整治要求，为适应航道建设迫切提高航道等级的需要，拟定其整治思路为在该河段历次整治的基础上，采用挖槽、疏浚和筑坝相结合措施，优化整治线型，完善丁坝布置，加固稳定边滩，缩窄整治线宽度和提高整治水位，以增强输沙能力，减少泥沙回淤，维持航槽稳定^[5]。主要整治参数如下：1) 整治流量 $500\text{ m}^3/\text{s}$ ；2) 整治水位，设计水位上 $1.0\sim 1.5\text{ m}$ （设计水位： 23.82 m ）；3) 整治线宽度 $140\sim 150\text{ m}$ 。

4.2 整治方案试验

模型试验以2011年9月地形为初始地形，进行了天然状态下 $Q=98, 500, 1\ 000, 2\ 000, 3\ 000, 4\ 990$ 和 $6\ 740\text{ m}^3/\text{s}$ 共7级流量的流速、水位和流态观测。结果表明，整治前白石窑枢纽坝下游河段中、枯水期水流动力轴线基本与河道深泓线一致，洪水期水流动力轴线取直，逐渐向河心偏移。试验河段水流基本平稳，无明显碍航的泡漩、水埂等，流态良好，但是当 $Q=98, 500, 1\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 时，CS65—CS70断面之间水流流速较大，并伴有横流。

整治方案 I：设计航道尺度为 $2.5\text{ m}\times 60\text{ m}\times 330\text{ m}$ ，为扩宽船舶适航水域，增强航道适应性，试验河段挖槽宽度由 60 m 增加至 80 m ，顺应深泓线变化布置挖槽。为保证 2.5 m 航深，挖槽底高程选取 21.32 m 。由于历次整治的丁坝群布置在此河段上已经比较完善，为保证输送桥下以及凤凰嘴河段水流束水攻沙和挖槽的稳定性，提高水流挟沙力，此方案河段丁坝布置仍基本保持现有格局，仅分别对 $34^\#$ 、 $36^\#$ 、 $50^\#$ 、 $51^\#$ 、 $53^\#$ 丁坝加长 $10, 10, 14, 15, 25\text{ m}$ ，并调整坝头高程为 24.98 m （图4）。

整治方案 II：取河段挖槽宽度为设计航道尺度 60 m 。其余参数均与方案 I 相同。

方案 I、II 均观测了 $98, 500, 1\ 000, 2\ 000, 3\ 000, 4\ 990$ 和 $6\ 740\text{ m}^3/\text{s}$ 共7级流量的水位、比

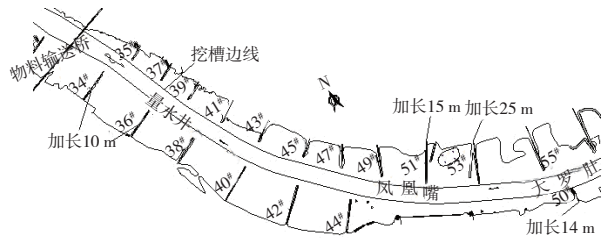


图4 方案 I 平面布置

降、流速和流向。方案 I 中: $Q=98 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 挖槽平均流速和比降变化均不大; $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 航槽流速为 $0.7 \sim 1.4 \text{ m/s}$, 与整治前相比流速变化幅度为 $-0.06 \sim 0.04 \text{ m/s}$; 水面比降较整治前减小 $0.01\% \sim 0.09\%$, 河段(水尺 12[#]~14[#])水位较工程前减小 0.02 m 左右。 $Q=1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时流速较整治前变幅为 $-0.04 \sim 0.05 \text{ m/s}$, 水面比降较整治前减小 0.04% 左右; 随着枢纽下泄流量的增加, 整治工程对流速、水位、比降的影响逐渐减小, 整治前后试验河段的水位、比降逐渐接近。方案 II 除流量为 500 和 $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的航槽流速比方案 I 稍大之外, 试验结果相似。

通过对两方案整治前后水流动力轴线、主流方向、挖槽流速及输沙能力变化等方面的分析可见, 整治后河段中、枯水期水流动力轴线与挖槽走向基本一致, 顺直段主流方向与挖槽轴线夹角较小, 当 $Q=98 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 航槽流速有所增加, 利于航行。其余流量流速和流态均比整治前好转, 例如, 整治前 CS65—CS70 之间存在的大水流流速以及横流, 经整治后, 横流消失, 但是流速仍然较前后相邻河段稍大。整治流量时, 河段内航槽流

速均大于泥沙止动流速, 且不低于整治前流速, 有利于减少泥沙回淤, 维持航槽的基本稳定。若仅对定床试验进行分析, 考虑到经济效益, 偏向于方案 II。

5 动床模型试验

动床试验进行了包括丰水、中水和少水年在内的长系列年河床冲淤试验, 选用的 3 个典型年的水沙系列资料为: 丰水年(摘自原珠委科研所动床模型试验报告)、中水年(2010 年)和少水年(2011 年)。试验以少水年—丰水年—中水年进行河床冲淤试验。观测河段的冲淤过程、冲淤分布、冲淤数量及冲淤厚度等, 为掌握工程后的河床演变规律, 分析整治效果, 优化整治方案提供依据。

动床方案 I: 1) 以定床方案 I 为基础, 按平顺微弯、与中、枯水水流动力轴线基本一致的原则布置整治线, 整治线以外河床同定床模型, 整治线以内充填模型沙恢复地形, 挖槽断面尺度为 $2.5 \text{ m} \times 80 \text{ m}$ 。2) 为满足海螺水泥厂物料输送桥双孔通航的需要, 在定床方案 I 的基础上将输送桥桥区河段挖槽宽度由 80 m 增加至 115 m (图 5)。

试验表明: 经丰水、中水、少水等 3 个典型年连续放水试验, 该河段加长的丁坝束窄河槽对泥沙冲淤的影响是显著的, 34[#]、36[#] 坝下游 620 m 以及 51[#]、53[#] 坝下游 600 m 河槽河床均表现为冲刷, 挖槽能够保持航道设计所要求水深, 除个别浅滩达不到设计航道要求, 其余部分均能达到设计要求, 挖槽总回淤量约为 3 万 m^3 , 各滩淤积情况见表 1。

表1 挖槽回淤情况

方案	浅滩	淤积部位	淤积量/ 万 m^3	浅段长度/ m	最小航道宽度/ m
方案 I	量水井	挖槽左、右两侧	0.73		70
	凤凰嘴	挖槽左侧	0.97	460	40
	大罗肚	凸岸边滩、挖槽左侧	0.78	710	45
方案 II	量水井	挖槽左、右两侧	0.49	393	50
	凤凰嘴	挖槽左侧	0.83	515	33
	大罗肚	凸岸边滩、挖槽左侧	0.41	210	45

注: 以上结论由于模型制作和测量误差以及换算等因素, 可能导致淤积结果的不精确或者偏差是不可避免的, 因此只作借鉴, 具体河段淤积量还要待整治工程完成之后具体计算。

1) 量水井浅段: 淤沙集中分布在航道加宽段左、右两侧挖槽边沿, 淤后该处最小航道宽度约 70 m 左右, 满足航道尺度要求。

2) 凤凰嘴浅段: 航槽位于过渡段浅区, 整

治后挖槽左侧发生回淤, 使最小航道宽度缩窄到 40 m , 浅段长 460 m 左右。

3) 大罗肚浅段: 该滩位于弯道顶点附近, 受弯道环流影响凸岸边滩淤积明显, 其淤积体伸入

航槽，致使航宽缩窄，淤积后最小航宽约45 m，浅段长约710 m。

动床方案Ⅱ：由动床方案Ⅰ泥沙冲淤试验可见，整治后，挖槽回淤速度较快、回淤量较大。其原因可能与挖槽宽度较大，流速降低较多有关。动床方案Ⅱ以定床方案Ⅱ为基础，整治线选取同动床方案Ⅰ，挖槽断面尺度为2.5 m × 60 m，以增强水流输沙能力，减少泥沙回淤，维持航槽的稳定。另外，为满足海螺水泥厂物料输送桥双孔通航的需要，将其在输送桥桥区河段挖槽宽度扩宽至84 m（图5）。

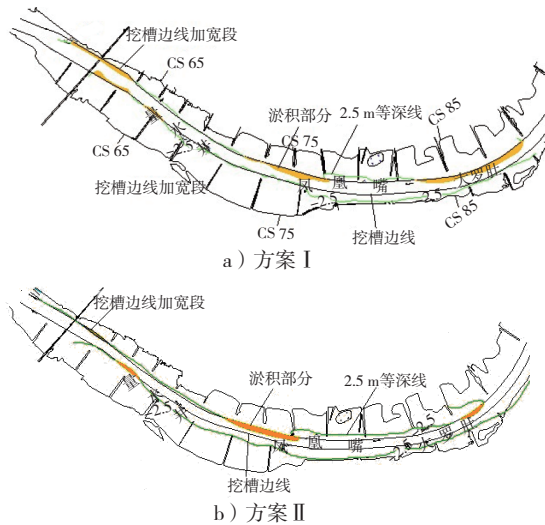


图5 动床冲淤分布

试验表明：该方案虽将挖槽宽度较方案Ⅰ缩窄20 m，但试验河段的水沙条件、冲淤特性和演变规律基本未变，其挖槽回淤部位与动床方案Ⅰ相近，即泥沙仍在量水井、凤凰嘴、大罗肚淤积，34#、36#坝下游680 m以及51#、53#坝下游1 200 m河槽河床表现为冲刷(表1)。

图5是方案Ⅰ、Ⅱ的动床冲淤分布图，由图5及表1看出，方案Ⅱ泥沙淤积分布范围较小，淤积量相对也较少。

6 结语

1) 试验河段（观音岩—大罗肚）处于飞来峡水库变动回水区，高水位时，受水库壅水影响，水流平缓泥沙落淤，加上北江枯水流量小，输沙能力弱，河床以淤积为主，且呈累积性淤积态势。

2) 整治前航道条件不理想，严重阻碍了两江

沿岸的发展。整治后，从分析结果来看，此河段（除个别浅滩外）达到60 m航宽的整治效果是切实可行的，满足Ⅲ级航道设计要求。整治后，水流动力轴线变化不大、航槽流速与整治前相近，流态有所改善，量水井、凤凰嘴和大罗肚这3个浅滩有不同程度的回淤，尤其是海螺水泥厂物料输送桥桥区加宽段、凤凰嘴及大罗肚浅段淤积较明显，上述3段淤积后的最小航道宽度分别为50，33和45 m。

3) 在水流结构、河床冲淤验证相似的基础上并考虑回水变动区上游的回水不衔接段和下游的常年回水区整治结果，经分析比较，从技术、经济等多方面综合比选认为，选择动床方案Ⅱ比较经济可行，即现阶段先按2.5 m × 60 m × 330 m考虑，以后视情况再作调整。

4) 不管是哪个方案，整治后增幅有限的航槽流速都不能避免挖槽回淤，整治前后河道的水沙条件、冲淤规律都基本未变。有鉴于此，为确保北江航运的正常进行，必要的清淤机具、设备，组织好的人力、物力是必须的，还要加强原型观测，制定清淤预案，及时清除淤沙，确保航道畅通^[6]。

5) 为确保河段航道整治的效果，建议工程实施后，加强对工程区河段河床冲淤变化的观测和分析工作，加强采砂管理，避免因无序采砂再度导致新的航道问题。

参考文献：

- [1] 覃益官, 林明超, 李俊娜. 北江（乌石至三水河口段）提升至Ⅲ级航道整治难点分析及整治措施探讨[J]. 人民珠江, 2010(3): 16-18.
- [2] 何晓辉, 吴丙贵. 北江（乌石至三水河口）段整治工程预可行性研究[R]. 广东: 广东省综合交通勘察设计院有限公司, 2011.
- [3] 杜宗伟, 倪志辉. 北江白石窑河段航道整治物理模型报告[R]. 天津: 重庆西南水运工程科学研究所, 2012.
- [4] JTJ 312—2003 航道整治工程技术规范[S].
- [5] 王相国, 于广年. 黄河上游李家峡水库变动回水区航道整治试验研究[J]. 水道港口, 2004(3): 82-85.
- [6] 庞雪松, 潘荣友, 曹民雄, 等. 长洲枢纽回水区汇流河段羊栏滩航道整治研究[J]. 水运工程, 2012(1): 132-137.

（本文编辑 郭雪珍）