



蓄水初期犍为船闸下引航道及口门区泥沙淤积成因分析

程艳，吴礼国，李泳龙

(四川省交通勘察设计研究院有限公司，四川成都610017)

摘要：船闸的通航问题至关重要，泥沙淤积严重将会导致航道水深不足，影响通航。针对犍为船闸下引航道及口门区泥沙淤积问题，采用平面二维泥沙模型进行数值模拟，分析泥沙淤积成因，提出改善航道泥沙淤积的措施并加以验证。结果表明，受枢纽下游河床地形及引航道和口门区边界条件影响，形成大范围的回流，泥沙淤积范围和厚度较大；采取改善措施后泥沙淤积量明显减少。

关键词：犍为船闸；下引航道；口门区；泥沙淤积

中图分类号：U 641. 1

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)12-0038-05

Cause analysis of sediment deposition in lower approach channel and entrance area of Qianwei ship lock during initial impoundment period

CHENG Yan, WU Li-guo, LI Yong-long

(Sichuan Communication Surveying and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: The navigation problem of the ship lock is very important, but the serious sediment deposition will lead to the insufficient navigation depth of the channel and affect the navigation. In view of the problem of sediment deposition in the lower approach channel and entrance area of Qianwei ship lock, we use two-dimensional sediment model for numerical simulation, analyze the causes of sediment deposition, put forward and verify the measures of improving the channel sedimentation. The results show that affected the downstream riverbed topography and the boundary conditions of approach channel and entrance area, a wide range of backflow is formed, and the sediment deposition range and thickness are large. The sediment deposition is significantly reduced after taking the improvement measures.

Keywords: Qianwei ship lock; lower approach channel; entrance area; sediment deposition

岷江犍为船闸设计通航标准为Ⅲ级，可通行 2×1000 吨级船队，兼顾3000吨级单船，船闸有效尺度为 $200\text{ m} \times 34\text{ m} \times 4.5\text{ m}$ (长×宽×槛上水深)，下引航道宽66m，下引航道设计底高程为311.0m，口门区底高程为312.0m，船闸平面布置见图1。犍为船闸工程于2019年11月建成并试通航，在枢纽初期蓄水期，岷江遭遇

“8·18”洪水，五通桥水文站洪峰流量达 $3.8\text{ 万 m}^3/\text{s}$ ，洪水重现期为50a一遇，加之枢纽上游两岸岸坡坍塌和河床疏挖，大量泥沙随水流移动。洪水消退后，犍为船闸下引航道及口门区泥沙淤积严重，2020年10月对下引航道及口门区地形进行实测发现，泥沙平均淤积厚度约3m。

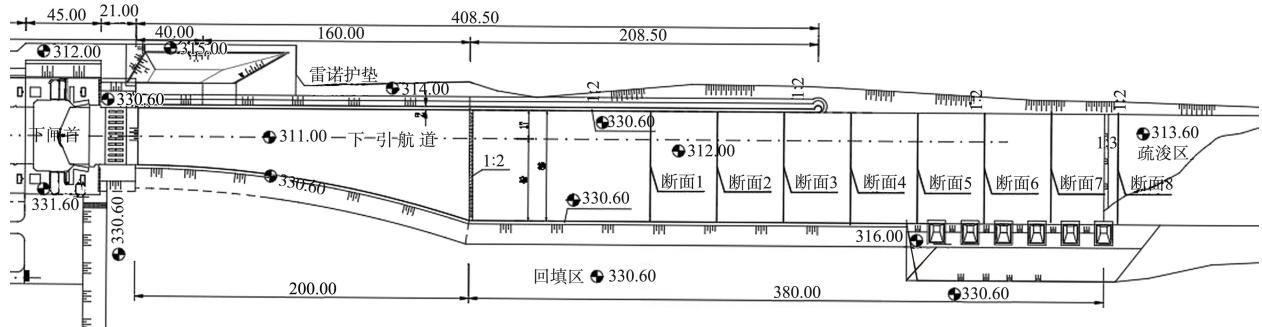


图 1 犍为船闸下引航道及口门区平面布置 (单位: m)

船闸引航道的布置合理性及畅通性是航运枢纽工程建设成败的重要指标。船闸引航道及口门区是河流流动水和引航道静水的交界区域, 此处因水流流态及断面的改变而产生回流, 水流挟带的泥沙通过水流的紊动扩散作用由主流区进入回流区不断落淤^[1]。而引航道泥沙不断淤积将导致航道水深不足, 影响通航, 解决引航道泥沙淤积是工程重要的技术问题之一^[2-3]。本文采用二维泥沙模型对蓄水初期犍为船闸下引航道及口门区泥沙淤积问题进行研究, 提出改善泥沙淤积的相关措施。

1 二维泥沙模型基本原理

河道水流一般可视为不可压缩牛顿流体, 其水流运动规律可用 Navier-Stokes 方程组描述, 对该方程进行时均化得其 Reynolds 形式, 包括质量守恒方程和动量守恒方程, 写成张量形式^[4]:

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{\mathbf{u}}'_i \bar{\mathbf{u}}'_j \right) + \mathbf{F}_i \quad (2)$$

式中: $\bar{\mathbf{u}}_i$ 为时均流速矢量; $\bar{\mathbf{u}}'_i$ 是脉动流速矢量; x_i, x_j 为直角坐标系中矢量坐标; t 为时间; \bar{p}_i 为时均压力; μ 为水流动力黏滞系数; ρ 为水密度; \mathbf{F}_i 为体积力; $\rho \bar{\mathbf{u}}'_i \bar{\mathbf{u}}'_j$ 为 Reynolds 紊动应力项。

从 Reynolds 方程出发, 考虑到工程所在河段水平尺度远大于垂直尺度, 水力参数在垂直方向的变化明显小于水平方向的变化, 可忽略垂向加速度, 设定压强服从静水分布; 不计垂直方向的流动时间和空间的微分, 将方程沿水深积分, 得

到平面二维的河道水流运动控制方程^[5]:

水流连续方程:

$$\frac{\partial Z_w}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} = q_m \quad (3)$$

水流动量方程:

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta q_1^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\beta q_1 q_2}{H} \right) + g H \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{H \partial p_a}{\rho \partial x} - \Omega q_2 + \frac{1}{\rho} \left[\tau_{bx} - \tau_{sx} - \frac{\partial (H \tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial (H \tau_{xy})}{\partial y} \right] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta q_1 q_2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\beta q_2^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + g H \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{H \partial p_a}{\rho \partial y} - \Omega q_1 + \frac{1}{\rho} \left[\tau_{by} - \tau_{sy} - \frac{\partial (H \tau_{yx})}{\partial x} - \frac{\partial (H \tau_{yy})}{\partial y} \right] = 0 \quad (5)$$

泥沙连续性方程:

$$(1 - \eta_s) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{s1}}{\partial x} + \frac{\partial q_{s2}}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

式中: Z_w 为水面高度; q_1 为 x 方向的单宽流量; q_2 为 y 方向的单宽流量; q_m 为单位面积的旁侧入流流量(为正)或出流流量(为负), 假定水流密度在整个模拟区域内保持不变^[6]; Z_b 为床面高度; H 为水深; β 为各向同性的动量修正系数; ρ 为水流密度; p_a 为水面大气压力; Ω 为科里奥利力参数; τ_{bx}, τ_{by} 分别为 x, y 方向的河床剪切应力; τ_{sx}, τ_{sy} 分别为 x, y 方向的表面风剪切应力; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$ 为由紊流引起的剪切应力; η_s 为床沙多孔性系数; q_{s1}, q_{s2} 分别为 x, y 方向上的泥沙全沙体积输沙率。本二维水流泥沙模型根据净冲刷量或淤积量将河床分流 2 层或 3 层, 最顶层为活动层, 在冲淤过程中一直存在。活动层的厚度保持不变, 当淤积发生时, 泥沙加至活动层, 同时

重新计算活动层中泥沙级配，将与淤积等量的泥沙从活动层中扣除，然后加入活动层下部的淤积层。

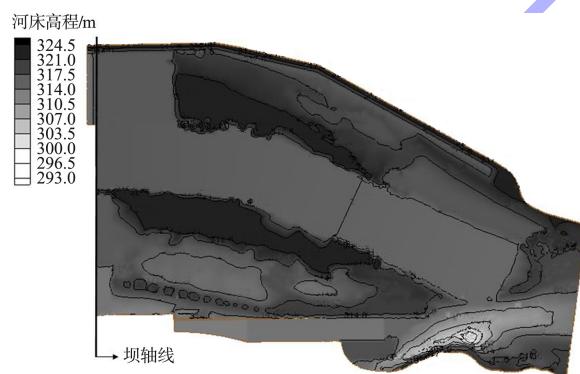
2 计算方法及过程

犍为枢纽初期蓄水期，船闸下引航道及口门区泥沙淤积严重，下游河床未完全清理至设计高程且靠船墩岸侧未回填至设计高程，因此根据实

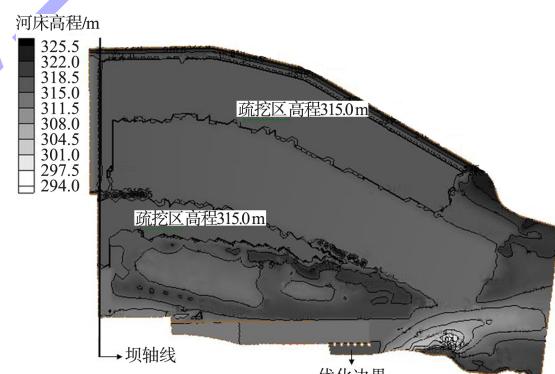
际河床地形及边界条件，建立方案1，模拟不同流量下下引航道及口门区的泥沙淤积过程；根据方案1的水流条件和泥沙淤积过程，将下游河床全部清理至设计高程，建立方案2；在方案2的基础上，将靠船墩岸侧区域回填至设计高程，建立方案3。上述每种方案选定3个流量级模拟泥沙冲淤过程。拟定的计算方案见表1，3个方案的模型边界和地形见图2。

表1 二维水流泥沙模型计算方案

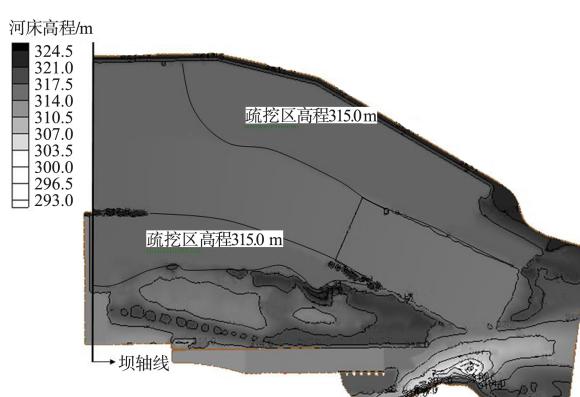
方案	流量/(万 $m^3 \cdot s^{-1}$)	计算条件及内容
1	1.10	地形及边界为初期蓄水期的现状地形，选用1个控泄条件下的流量和2个敞泄条件下的流量；下游水位边界采用枢纽下游河段天然水位-流量关系确定
	2.44	
	4.36	
2	1.10	地形及边界是在方案1基础上将下游河床清理至设计范围和高程，选用1个控泄条件下的流量和2个敞泄条件下的流量；下游水位边界采用枢纽下游河段天然水位-流量关系确定
	2.44	
	4.36	
3	1.10	地形及边界是在方案2基础上将下引航道靠船墩右岸回填至设计高程，选用1个控泄条件下的流量和2个敞泄条件下的流量；下游水位边界采用枢纽下游河段天然水位-流量关系确定
	2.44	
	4.36	



a) 方案1



c) 方案3



b) 方案2

图2 3个方案的模型枢纽下游地形及边界条件

犍为航运枢纽初期蓄水期，上下游河床因疏挖扰动较大，加之上游岸坡工程的实施，河道中产生大量泥沙^[7]，造成初期蓄水期泥沙含量较天然情况大。天然情况岷江犍为枢纽坝址处无悬移质和推移质泥沙颗粒级配的实测资料，根据设计报告，悬移质级配选用高场水文站近年来的资料进行分析，悬移质中值粒径为0.0199 mm，平均粒径为0.052 mm。推移质泥沙资料根据犍为枢纽坝址附近河段现场取样分析，中值粒径为52.8 mm，

平均粒径为 60.9 mm, 犍为坝址处多年平均含沙量为 667 g/m³, 多年平均悬移质沙量为 5 264 万 t, 推移质输沙量为 27 万 t。

3 研究结果及分析

3.1 方案 1 下引航道及口门区泥沙冲淤过程

为分析犍为船闸下引航道及口门区的泥沙冲淤过程, 在下引航道及口门区选取 8 个断面, 对比各方案条件下的泥沙冲淤情况, 断面布置位置见图 1, 泥沙参数参照天然情况下犍为枢纽坝址处泥沙资料。

方案 1 根据初期蓄水期的实际地形和边界资料建立模型, 其模拟结果表明, 在上述 3 种流量级下, 船闸下引航道及口门区回流范围较大, 模拟流量下最大回流区域平行船闸轴线方向长约 350 m, 垂直船闸轴线方向长约 160 m, 引航道及口门区有一定的泥沙淤积。由表 2 可看出, 当 $Q=1.10$ 万 m³/s 时, 布置断面最大淤积厚度为 0.253 m; 当 $Q=2.44$ 万 m³/s 时, 布置断面最大淤积厚度为 0.327 m; 当 $Q=4.36$ 万 m³/s 时, 布置断面最大淤积厚度为 0.697 m。在上述 3 种流量下, 船闸下引航道及口门区都发生一定厚度的泥沙淤积。流量越大, 挟沙能力越强, 受地形及边界条件的影响回流范围较大, 淤积厚度相应越大。

表 2 下引航道及口门区泥沙淤积成果

流量/ (万 m ³ ·s ⁻¹)	方案	测点最 大流速/ (m·s ⁻¹)	最大淤积 厚度/m	平均淤 积厚度/ m
1.10	1	1.947	0.253	0.148
	2	1.823	0.192	0.121
	3	1.795	0.094	0.053
	1 与 2 的差值	0.124	0.061	0.027
	1 与 3 的差值	0.152	0.159	0.121
2.44	1	3.422	0.327	0.242
	2	3.337	0.242	0.195
	3	3.289	0.175	0.128
	1 与 2 的差值	0.085	0.085	0.047
	1 与 3 的差值	0.133	0.152	0.114
4.36	1	4.817	0.697	0.510
	2	4.778	0.494	0.356
	3	4.747	0.315	0.223
	1 与 2 的差值	0.039	0.203	0.154
	1 与 3 的差值	0.070	0.382	0.287

3.2 方案 2 下引航道及口门区泥沙冲淤过程

方案 2 是在方案 1 的基础上将下游河床清理至设计高程。模拟结果表明, 在上述 3 种流量级及对应的运行方式下, 船闸下引航道及口门区回流范围较方案 1 减小, 模拟流量下最大回流区域平行船闸轴线方向长约 310 m, 垂直船闸轴线方向长约 140 m, 引航道及口门区同样有一定的泥沙淤积。由表 2 可看出, 当 $Q=1.10$ 万 m³/s 时, 布置断面最大淤积厚度为 0.192 m; 当 $Q=2.44$ 万 m³/s 时, 布置断面最大淤积厚度为 0.242 m; 当 $Q=4.36$ 万 m³/s 时, 布置断面最大淤积厚度为 0.494 m。同样, 在上述 3 种流量下, 船闸下引航道及口门区发生一定厚度的淤积, 但相比于方案 1 的淤积厚度有所减小。

3.3 方案 3 下引航道及口门区泥沙冲淤过程

方案 3 是在方案 2 的基础上将靠船墩岸侧区域回填至设计高程。模拟结果表明, 在上述 3 种流量级及对应的运行方式下, 船闸下引航道及口门区回流范围较方案 1 大幅减小, 模拟流量下最大回流区域平行船闸轴线方向长约 250 m, 垂直船闸轴线方向长约 50 m; 引航道及口门区的泥沙淤积也较方案 1 减少。由表 2 可看出, 当 $Q=1.10$ 万 m³/s 时, 布置断面最大淤积厚度为 0.094 m; 当 $Q=2.44$ 万 m³/s 时, 布置断面最大淤积厚度为 0.175 m; 当 $Q=4.36$ 万 m³/s 时, 布置断面最大淤积厚度为 0.315 m。相比于方案 1, 泥沙淤积的范围及厚度都有所减小, 因此提出的方案 3 在改善下引航道及口门区的泥沙淤积是可行的。但引航道及口门区为水流的动静交界区域, 此处因水流流态的改变及断面的改变而产生回流, 泥沙的淤积不可避免。

3.4 综合分析

由 3 种方案的船闸下引航道及口门区的泥沙淤积结果可知, 流量越大, 流速越快, 水流挟沙能力越强, 引航道及口门区的回流范围越大, 泥沙淤积的范围和厚度也相应增大^[8]。相同流量下 3 种方案的典型断面淤积厚度对比见图 3。可以看出, 当 $Q=1.10$ 万 m³/s 时, 方案 2 比方案 1 的平均淤积厚度减小 0.027 m, 方案 3 比方案 1 的平均

淤积厚度减小 0.121 m; 当 $Q = 2.44$ 万 m^3/s 时, 方案 2 比方案 1 的平均淤积厚度减小 0.047 m, 方案 3 比方案 1 的平均淤积厚度减小 0.114 m; 当 $Q = 4.36$ 万 m^3/s 时, 方案 2 比方案 1 的平均淤积厚度减小 0.154 m, 方案 3 比方案 1 的平均淤积厚度减小 0.287 m。因此, 键为枢纽下游河床地形及船闸下引航道和口门区的边界条件直接影响水流条件, 从而形成不同的回流范围, 造成不同程度的泥沙淤积, 良好的水流条件及较小范围的回流能有效预防泥沙淤积问题。

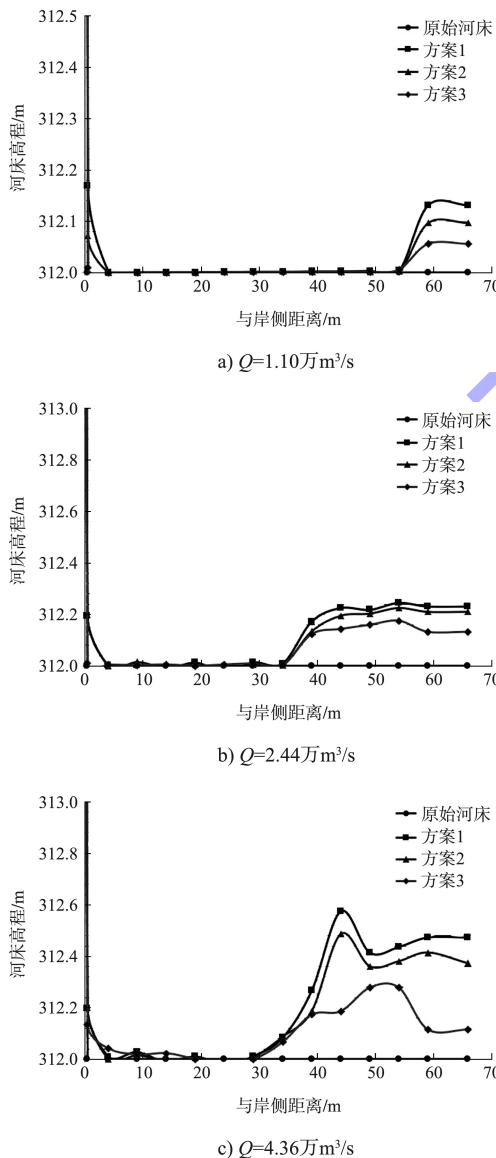


图 3 断面 7 的 3 种方案淤积对比

4 结论

1) 3 种方案的船闸下引航道及口门区泥沙冲淤结果表明, 方案 2 比方案 1 的泥沙淤积厚度小, 方案 3 比方案 2 的泥沙淤积厚度小, 方案 3 能较好地改善下引航道及口门区的泥沙淤积。

2) 键为枢纽下游河床地形及船闸下引航道和口门区的边界条件直接影响水流条件, 从而形成不同的回流范围, 造成不同程度的泥沙淤积, 良好的水流条件及较小范围的回流能有效地预防泥沙淤积。

3) 船闸下引航道及口门区为水流的动静交界区域, 水流流态及断面的改变产生回流, 泥沙的淤积不可避免。因此, 在枢纽工程建设中应采取物理模型优化下游河床高程和引航道及口门区的边界条件, 最大限度减少泥沙淤积问题, 同时定期对产生的淤积采取清除措施, 保证船舶顺利安全通航。

参考文献:

- [1] 董耀华, 徐海涛, 周银军. 韩国京仁阿拉航道泥沙技术咨询[J]. 中国水利, 2012(15): 55-58.
- [2] 元媛, 张小峰, 梅志宏, 等. 北本水电站下引航道泥沙冲淤数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2012(1): 39-42.
- [3] 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.
- [4] 孟雪峰. 云南水富港二期扩建工程通航研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [5] 宋禹辰. 温中坝河段卵石输移规律与航道治理对策研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [6] 周舟. 黄河中卫段航道整治参数的确定及数值模拟[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [7] 张海兵, 张勇. 浅析响水船闸下游引航道淤积及治理[J]. 江苏水利, 2005(2): 31.
- [8] 詹世富, 丁坚, 周晶晏. 贵港航运枢纽船闸引航道回淤试验研究[J], 河海大学学报(自然科学版), 1999(2): 81-85.

(本文编辑 王璁)