



岷江老木孔航电枢纽工程施工期坝区 通航方案及通航水流条件研究

杜双全¹, 王云莉², 张有林¹, 严春浩², 向美焘², 刘亚辉²

(1. 四川岷江港航电开发有限责任公司, 四川 乐山 614000;

2. 重庆交通大学, 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 老木孔航电枢纽是岷江干流下游乐山—宜宾 162 km 河段近期开发 4 个航电梯级中的第 1 级, 其施工期的通航条件将直接关系到岷江乐山—宜宾段大件船舶运输。为保障施工期岷江航道畅通, 施工一期采用左岸扩挖明渠临时航道通航。采用水工物理模型试验与船模试验相结合的研究方法, 对施工一期第 1 个枯水期三江村左汉通航期枢纽坝区通航方案及通航水流条件进行系统研究, 提出左岸扩挖明渠疏浚、明渠进口段布置、明渠下游出口及连接段布置推荐方案, 以及相应的通航水流条件特征参数。结果表明: 老木孔枢纽施工期坝区推荐布置方案通航水流条件良好, 获得的最小和最大通航流量满足施工期通航要求。

关键词: 老木孔航电枢纽; 通航方案; 通航水流条件; 水工模型试验

中图分类号: U612.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0149-08

Navigation schemes and flow conditions in dam area of Laomukong navigation-power junction in Minjiang River during construction period

DU Shuangquan¹, WANG Yunli², ZHANG Youlin¹, YAN Chunhao², XIANG Meitao², LIU Yahui²

(1. Sichuan Minjiang Port Navigation Power Development Co., Ltd., Leshan 614000, China;

2. Chongqing Southwest Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: Laomukong navigation-power junction ranks the first among the four recently developed navigation-power junctions in the 162 km reach from Leshan to Yibin in the downstream Minjiang River. The navigation conditions during the construction period will directly affect the transportation of large ships in the reach. To ensure smooth shipping in Minjiang River during the construction period, the temporary open channel expanded at the left bank is available for navigation during construction period I. This paper adopts the method of combining hydraulic physical model tests with ship model tests to systematically study the navigation schemes and flow conditions in the dam area during the navigation period of the left branch of Sanjiang Village in the first dry season during construction period I. The paper also proposes the recommended schemes of expanding the open channel in the left bank for dredging, designing the inlet reach of the open channel, and arranging the downstream outlet of the open channel and connecting reach, as well as corresponding characteristic parameters of the navigation flow conditions. The results show that the recommended schemes for the dam area of Laomukong junction during the construction period ensure excellent navigation flow conditions, and the minimum and maximum navigation flows meet the navigation requirements during the construction period.

Keywords: Laomukong navigation-power junction; navigation scheme; navigation flow condition; hydraulic model test

收稿日期: 2022-10-13

作者简介: 杜双全 (1972—), 男, 高级工程师, 从事水运水电工程建设管理。

岷江老木孔航电枢纽工程位于四川省乐山市境内,是岷江干流下游(162 km)近期开发的4个航电梯级的第1级,坝址位于乐山市大渡河汇合口下游约12.3 km处,其下游与东风岩枢纽相衔接。老木孔枢纽是一座以航运为主、航电结合、兼顾防洪、供水、旅游和环保等综合利用的大型水利枢纽工程,主要由航电枢纽主体工程、库区防洪堤工程、涌斯江生态电站以及库区河道疏浚工程组成。

工程所在河段河床宽浅、汊濠纵横、洲岛遍

布、边滩发育、水流散乱、水浅槽窄,沿江两岸分布有较宽阔低矮的台地,见图1。坝址上游10 km内有老江坝、王坝子、中坝、中禾坝、黄泥坝、三江村等江心洲,水流被分为左、中、右共3汊,下游老木孔浅滩发育,同时河段上下游桥梁较多,包括连乐铁路九峰岷江大桥、乐自高速公路岷江大桥、乐宜高速公路岷江特大桥、成贵铁路桥等,尤其是下距坝址约为1.3 km处新建的成贵高铁岷江大桥成为异岸通航的重要制约因素。

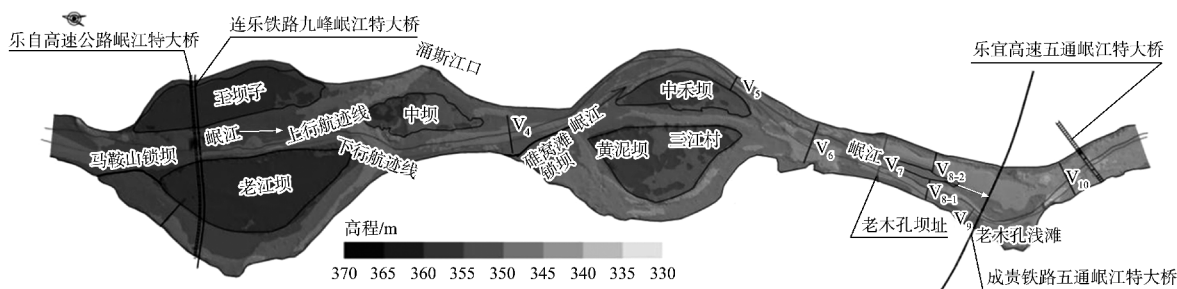


图1 老木孔航电枢纽坝址河段

1 工程概况

考虑工程的复杂性,老木孔航电枢纽主体工程采用分期导流的方式^[1],根据设计施工总体安排,主体工程分两期施工,历时约4 a。一期围右岸施工,施工时间约2 a,其中枯期围堰施工由左侧扩挖和疏浚后的河道导流;汛期拆除枯期围堰,由全年围堰左侧的8孔闸及左岸扩挖河道导流,全年由左岸扩挖河道通航。

为尽可能不断航、少断航、少碍航,尽快推动2022年汛后主河床截流,顺利实现一期截流目标,本文主要针对一期第1个枯水施工期(简称一期一枯,在2022年12月)通航期间,开展施工期围堰河段施工布置方案及通航水流条件研究,旨在因地制宜提出合理的施工期通航保障措施提供技术支撑,也为其他相似的上游宽浅、多汊弯曲及存在异岸通航的河道施工通航方案及水流条件研究提供参考。

根据岷江航道航运要求,工程区河段300吨级船舶通行较多,并考虑保障大件运输的需求,施工期设计代表船型为现行大件船舶。设计代表船型主尺度为68 m×12.8 m×1.8 m(船长×型宽×吃水),

船舶通航水流条件指标为流速不大于3.5 m/s、比降不大于3.5‰、断面系数不小于6。

根据围堰布置、水流条件特点以及下游衔接航道成贵铁路通航孔的位置,坝区围堰段分为左岸扩挖明渠上游进口段、纵向明渠段、围堰下游出口、连接段、老木孔滩等部分,见图2。

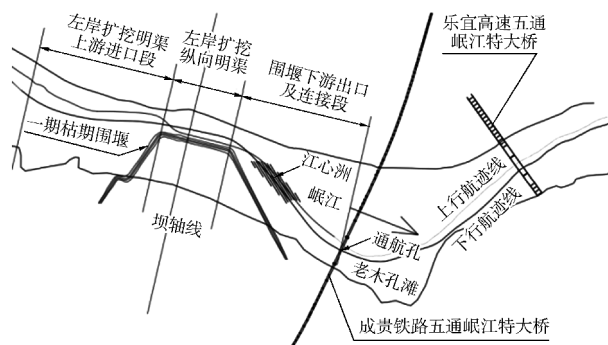


图2 坝区围堰布置河道分段及航线规划

2 模型设计与验证

考虑老木孔航电枢纽工程河段水沙运动比较复杂,确定模型范围为老木孔坝址上游约10.6 km(老江坝江心洲头上游约900 m)至老木孔坝址下游约3.4 km,模拟原型河道总长约14 km。模型按照重力相似准则设计,采用几何比尺为1:100

的正态模型。

船模几何比尺为 1:100, 时间比尺为 1:10, 速度比尺为 1:10, 排水量比尺为 1:100 万, 推力比尺为 1:100 万。以最大舵角不大于 25°、最小航速不小于 0.50 m/s 判别航行状态的优劣, 船模试验的航行参数劣于上列数值时, 则认为航道不安全。

水面线验证方面, 模型主要采用 2022 年 3 月实测枯水($Q=1\,300\text{ m}^3/\text{s}$)的水面线资料, 作为校核模型与原型河床阻力相似的依据, 最终经分析模型水位与原型水位差值多在 $\pm 0.1\text{ m}$ 以内(表 1), 符合相关规范要求。

表 1 $Q=1\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 实测与模型水位对比结果			
断面编号	原型水位/m	模型水位/m	水位差/m
V_4	349.08	349.18	0.10
V_5	344.94	344.93	-0.01
V_6	343.27	343.25	-0.02
V_7	342.93	343.08	0.15
V_{8-1}	342.24	342.25	0.01
V_{8-2}	342.18	342.17	-0.01
V_9	341.84	341.86	0.02
V_{10}	340.73	340.75	0.02

流速、流向验证方面, 根据 2022-02-12 在工程河段实测岷江流量 $1\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 时的流速、流向资料, 在模型上相同位置投放浮标, 观察浮标的运动轨迹, 并与原型比较。结果表明, 模型与原型浮标的运动轨迹相近、运动方向基本一致, 说明模型表流流向与原型相似性较好。

断面流速分布验证方面, 根据 2022-03-01 的 ADCP 声学多普勒流速仪实测全河段 10 个控制断面流速分布资料进行验证。结果表明, 模型实测与原型河道实测典型断面流速分布规律基本一致。

船模几何尺度、形状、吃水和排水量都应 与实船相似; 运动速度及时间也应与实船相似; 同时也满足操纵性能相似。

3 设计方案

3.1 平面布置

一期一枯, 通过枯期围堰围右岸, 修建 8 孔泄洪冲沙闸、电站和船闸, 该围堰占据右岸河道

宽约 620 m, 导流与通航明渠缩窄至 320 m 左右 (过流断面宽度相对原河床缩窄了约 67%), 围堰顺河方向长约 826 m。一期一枯原设计方案围堰平面布置见图 3。

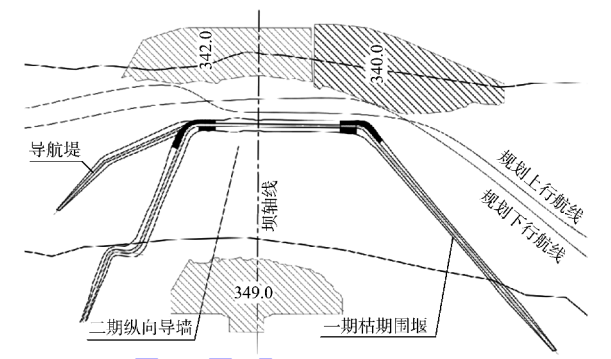


图 3 一期一枯原设计方案坝区围堰平面布置 (单位: m)

3.2 模型试验结果

3.2.1 明渠上游进口段通航水流条件

根据上游来流量 Q 为 737、2 500 m^3/s 试验工况的观测结果, 其中 $Q=737\text{ m}^3/\text{s}$ 为天然情况水位历时保证率 95% 下对应的流量 (即最小通航流量), $Q=2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 为枯期坝区明渠最大通航流量。在设计方案下, 一期枯期围堰修建以后, 围堰上游河段水位抬升幅值较大, 水面变缓, 航道内水深增加、比降减小、流速减小, 见表 2。通航水流条件较天然状况得到一定程度的改善。

表 2 明渠上游进口段通航水流条件					
流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	最大水位抬 升幅值/m	水面比降/ ‰		流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
		最大值	最大变化值	最大值	最大变化值
737	0.62	0.54	-0.77	1.63	-0.20
2 500	1.19	0.76	-1.00	2.13	-0.50

3.2.2 纵向明渠段的通航水流条件

施工期间, 左岸河槽疏浚以后, 枯期纵向围堰与左岸新建防洪堤之间的导流与通航明渠最大河床宽约 320 m, 过流断面宽度较现状条件缩窄了约 67%, 坝址河段过流能力大幅度降低。

根据试验工况观测结果, 枯期纵向围堰左侧导流与通航明渠内水面比降增加, 流速较大、水流较急, 见表 3。在 342 与 340 m 河床开挖高程平台衔接位置存在明显的跌水和急流流态, 通航水流条件较差。

表 3 纵向明渠段通航水流条件

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最大水位抬 升幅值/m	水面比降/ ‰		流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	
		最大值	最大变化值	最大值	最大变化值
737	0.27	1.61	0.90	3.20	1.98
2 500	0.76	2.38	1.31	3.67	1.66

3.2.3 围堰出口与下游连接段的通航条件

根据设计方案,一期施工期间上游船舶下行通过左岸导流明渠下行后,须从左岸逐渐过渡至右岸过成贵铁路桥后下行。同样,上行船舶过成贵铁路通航孔后须逐渐向右打舵驶入河道左岸施工导流明渠,然后通过坝址河段后上行逐渐向右打舵进入三江村左汊航道。

试验观测结果表明:在左岸施工导流明渠围堰出口下游至成贵铁路桥通航孔之间过渡水域内存在 1 个枯水江心洲,当上游来流量 $Q \leq 1\,500\text{ m}^3/\text{s}$,该江心洲未漫流,上游来流过左岸导流与通航明渠后沿河道左岸河槽下流,江心洲右岸河槽基本不过流,左岸施工导流明渠与成贵铁路桥通航孔之间无船舶航行通道;当 $Q=2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,该江心洲已淹没,但江洲面上水浅流急、航深不足、流态极差,不能作为船舶航行通道。

3.2.4 老木孔滩河段通航条件

老木孔滩位于成贵铁路桥通航孔下游 300~600 m,滩段长度约为 300 m。试验结果表明,当上游来流量 $Q \leq 2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,在设计方案河道左岸扩挖明渠出口至右岸下游成贵铁路桥通航孔之间的船舶航行通道上,江心洲不过流或者溢流较少,上游来流通过扩挖明渠后下泄至左岸河槽,成贵铁路桥下游老木孔滩河段分流较小,导致老木孔滩河段航道水位下降了约 0.24 m,水深不足,通航条件变差。

4 优化方案研究

试验研究结果表明,在设计方案下,河道左岸枯期围堰左侧扩挖明渠内水位较现状条件有所升高,流速增大,比降大,在开挖高程为 342 和 340 m 位置附近存在跌水和急流,通航水流条件较差;同时枯期围堰下游江心洲阻断了左岸围堰出口与右岸成贵铁路桥通航孔之间的航行通道;成

贵铁路大桥下游老木孔滩段枯期最大水位下降了 0.24 m 左右,恶化了老木孔滩现有的通航条件。

针对上述试验结果,并结合相关研究^[2-5],需要分别在左岸导流与通航明渠、围堰出口与下游连接段、上游导航堤等河段进行优化研究,进一步改善通航水流条件。

4.1 左岸导流与通航明渠通航条件优化方案

4.1.1 优化方案布置

针对不同的低槽疏浚宽度,模型分别进行了方案 1-1(低槽宽度约为 140 m),方案 1-2(低槽宽度约为 150 m)和方案 1-3(低槽宽度约为 180 m),优化方案布置见图 4。

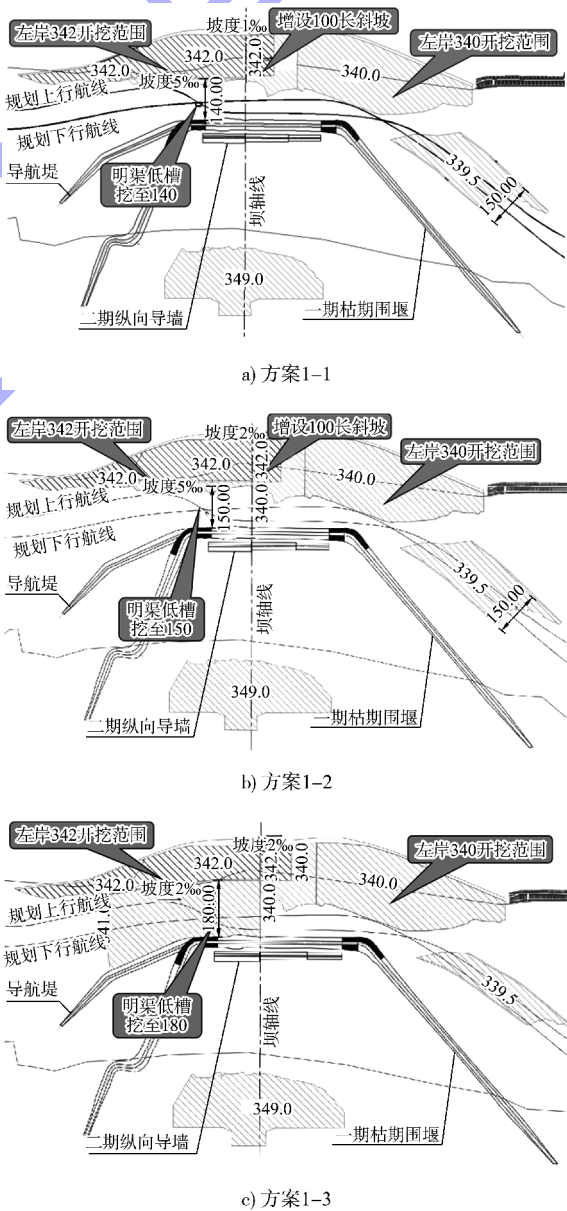
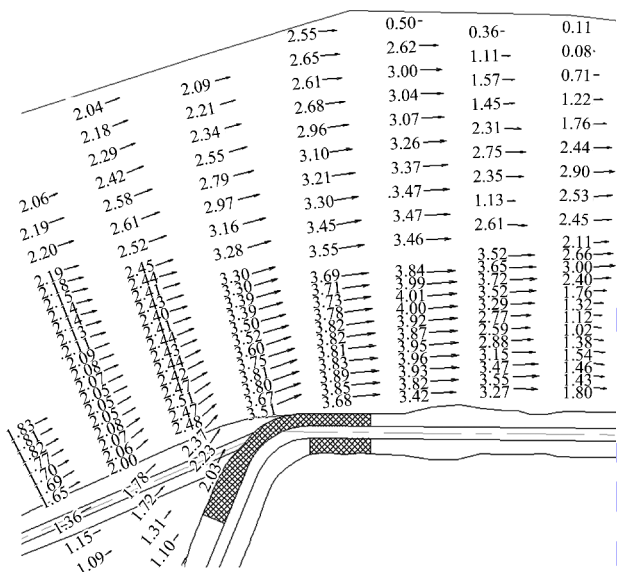


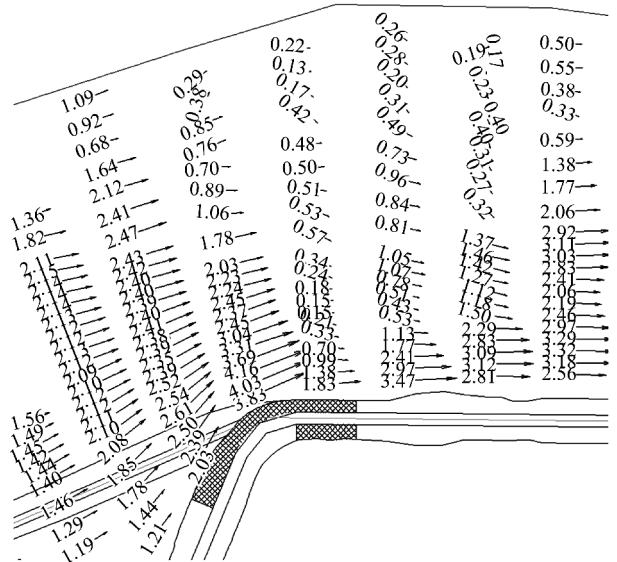
图 4 优化方案的围堰左岸导流与通航明渠布置 (单位: m)

4.1.2 通航水流条件

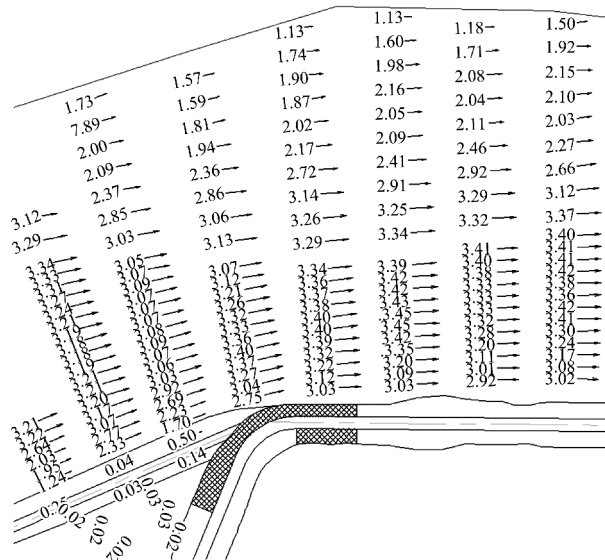
试验结果表明, 方案 1-3 在各级试验工况流量下, 堰左侧导流与通航明渠水流平顺, 流态较好; 在最大通航流量 $Q=2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 明渠进口围堰转角段流场见图 5。对比各方案结果, 在方案 1-3 条件下, 通航明渠内最大局部比降为 1.69‰ , 小于控制比降指标 3.5‰ , 最大流速 3.46 m/s , 小于控制流速指标值 3.5 m/s , 均满足工程河段比降和流速控制指标的要求。



a) 方案1-1



b) 方案1-2



c) 方案1-3

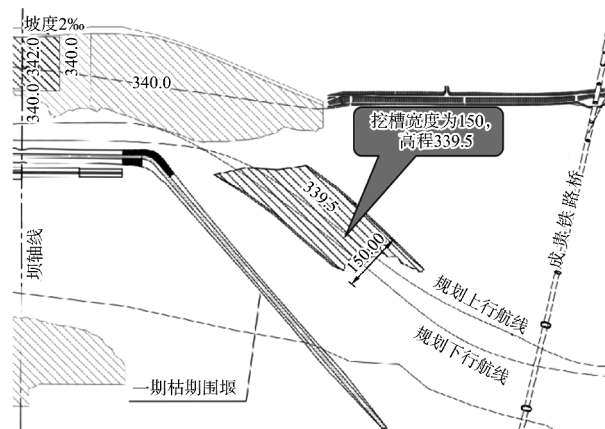
图5 $Q=2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 下各方案围堰左岸扩挖纵向明渠段流场分布 (单位: m/s)

因此, 建议以方案 1-3 作为一期一枯三江村左汊通航阶段的围堰左岸明渠通航方案。

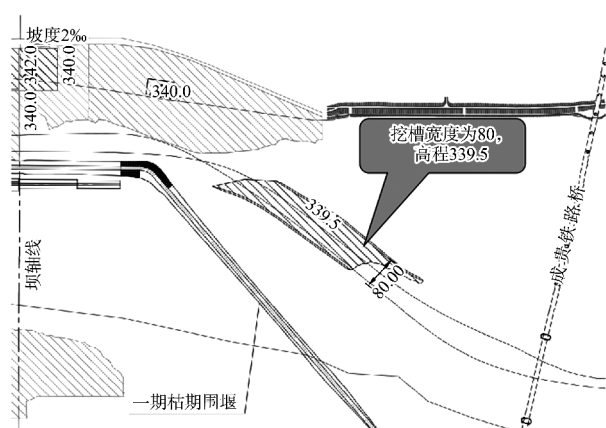
4.2 围堰出口与下游连接段的通航条件优化方案

4.2.1 优化方案布置

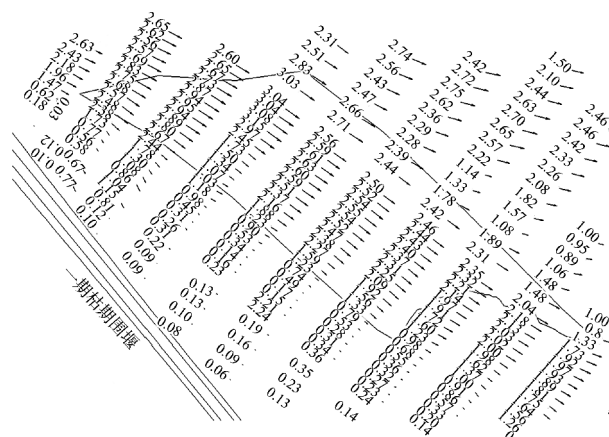
针对枯期围堰下游江心洲阻断了左岸围堰出口与右岸成贵铁路桥通航孔之间的航行通道问题, 通过模型试验对挖槽的线型布置、宽度和槽底高程等进行优化, 方案 2-1 为挖槽宽度 150 m , 高程 339.5 m ; 方案 2-2 为挖槽宽度 80 m , 高程 339.5 m ; 方案 2-3 为挖槽宽度 120 m , 高程 $339.0\sim 339.5\text{ m}$ 。优化方案布置见图 6。



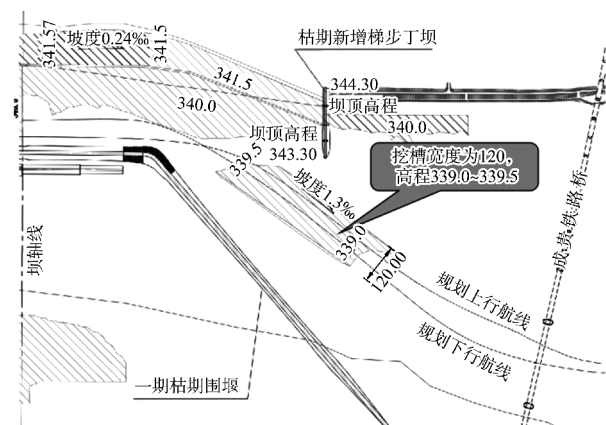
a) 方案2-1



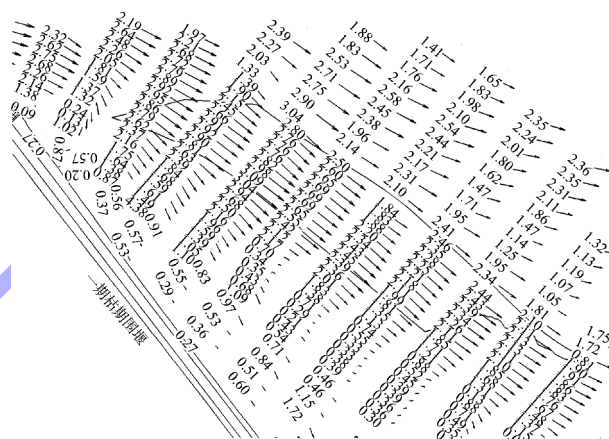
b) 方案2-2



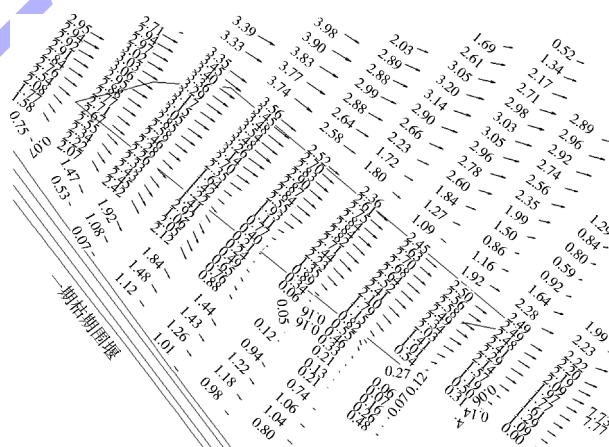
a) 方案2-1



c) 方案2-3



b) 方案2-2



c) 方案2-3

图6 围堰出口下游与右岸成贵铁路桥通航孔之间
船舶航行通道开挖方案 (单位: m)

4.2.2 通航水流条件

考虑到设计方案围堰左侧通航明渠内设计水深基本满足要求, 试验主要对最大通航流量 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 工况下的明渠通航水流条件进行试验观测, 结果见图7。可以看出, 相比较方案2-1与2-2, 方案2-3航槽方向与枯期下游围堰航槽宽度合适, 航槽与下游出口右侧深槽的衔接较为平顺。在方案2-3下, 当 $Q=2\,500\text{ m}^3/\text{s}$, 成贵铁路桥轴线3倍船长范围内, 水流流向与船模实测航迹线方向最大横向流速为 0.4 m/s 。因此, 建议以方案2-3为推荐方案。

图7 围堰出口与下游连接段开挖航行通道流场分布(单位: m/s)

4.3 明渠进口上游有无导航堤对比试验方案

4.3.1 优化方案布置

针对设计方案在枯期横向围堰上游设置导航堤, 考虑到该导航堤长度较长(约 500 m), 并在

汛期需要拆除, 汛后又需要恢复的特点, 从导流堤所起的作用考虑, 在围堰左侧明渠和围堰出口下游连接段航行通道推荐方案的基础上, 模型对其导航堤的长度进行优化, 对有无导航堤进行对比研究。

优化研究方案分别为方案 3-1(设计方案导航堤)、方案 3-2(导航堤缩短约 50 m)和方案 3-3(取消导航堤), 优化方案布置见图 8。

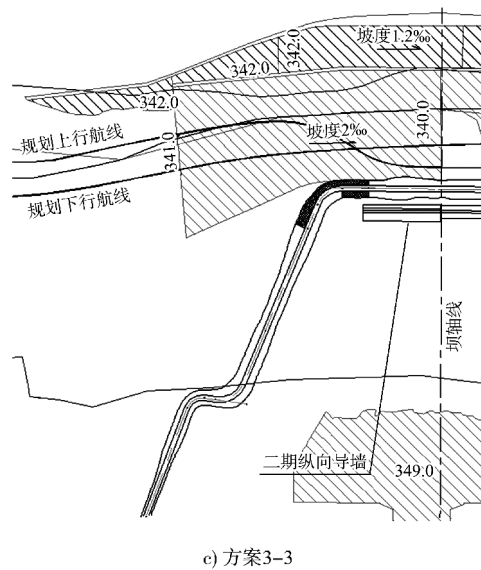
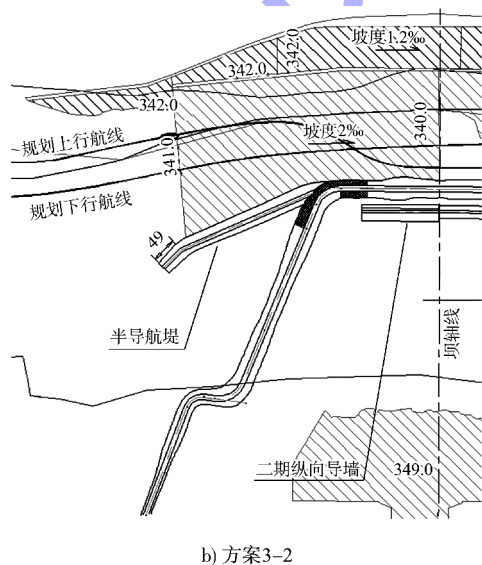
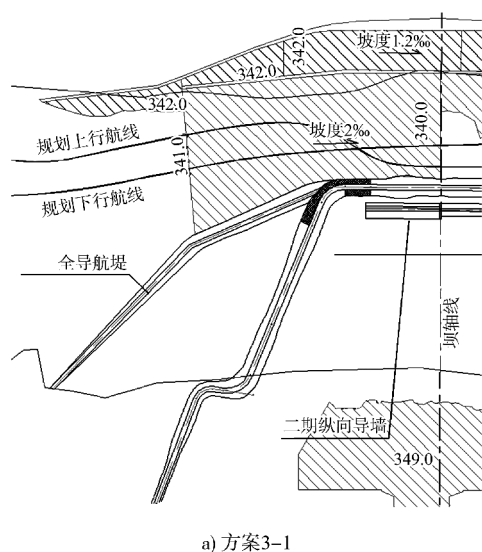


图8 一期围堰上游有无导航堤对比试验方案布置(单位: m)

4.3.2 通航水流条件

根据模型观测, 在一期枯期通航期间, 枯期横向围堰上游设置全导航堤, 导航堤长度减小(约 50 m)和取消导航堤, 对围堰左侧通航明渠内上游段右侧围堰转角下游附近的最大流速值和明渠内水面比降有一定程度的影响, 影响程度随上游来流量的增加而增大。

当上游来流量 $Q=2\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 围堰上游有无导航堤工况明渠内流速最大增加值约为 $0.2\ \text{m/s}$, 且仅限于局部区域(明渠上段围堰转角下游约 150 m, 围堰左侧约 100 m 范围), 见表 4; 不同方案明渠内平均水面比降变化不明显(图 9)。因此, 鉴于围堰上游导航堤作用不明显, 建议取消围堰上游导堤。

表4 明渠上游一期围堰转角附近流速

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	方案 3-1	方案 3-2	方案 3-3
737	2.10	2.11	2.08
2 500	3.45	3.48	3.60

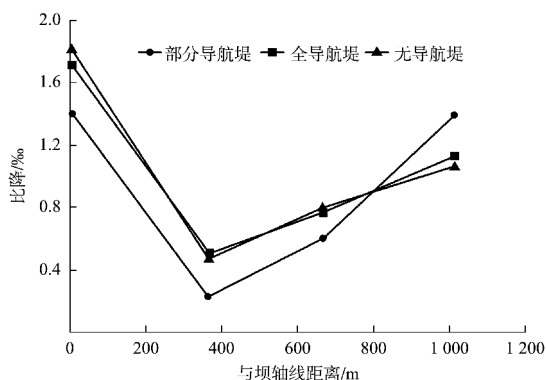


图9 航槽宽度约120 m、 $Q=2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时
不同布置方案下的明渠水位比降变化

5 船模试验结果

对于施工导流明渠河段,大件货船在流量1 200和 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 的试验工况下,船舶上行的最小航速均高于船模试验最低航速安全限值(0.50 m/s),船舶上行和下行的最大舵角均低于试验安全舵角限值(25°),船舶可以自航上下行通过岷江老木孔航电枢纽施工导流与施工期(一期枯期)施工导流明渠河段,满足通航要求。

对于明渠下游桥区河段,大件货船在流量 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 的试验工况下,船舶上行的最小航速均高于船模试验最低航速安全限值(0.50 m/s)。由于桥区河段航道为弯道浅滩航段,船舶上、下行通过桥区均须操大舵,船舶可以自航上下行通过岷江老木孔航电枢纽施工导流明渠至下游桥区河段。

6 结论

1) 对于围堰左岸扩挖明渠布置,宜采用低、高槽复式航槽断面布置形式,同时避免开挖成平台形式,导致不同高程平台衔接断面处形成跌水,

使得明渠比降大、流速大,通航流态差;为满足航深及通航流量要求,以低槽宽度为180 m的明渠航槽布置为推荐方案。

2) 对于围堰明渠出口至成贵铁路桥通航孔之间连接段开挖航槽布置,连接段航槽开挖高程应确保设计流量的最小水深为1.8 m,同时考虑挖槽的分流不会恶化成贵铁路桥下游老木孔滩段航道通航水流条件,因此以槽宽为120 m、高程339.0~339.5 m方案为挖槽推荐方案。

3) 模型研究结果表明,相对于有导航堤方案,无围堰上游导航堤条件下,围堰上游转角处流速最大增加值小于 0.2 m/s ,且限于围堰上游转角挑流的局部范围,水面比降无明显变化;上行船舶均可避开围堰上游转角挑流大流速区域。鉴于围堰上游导航堤作用不明显,建议取消围堰上游导航堤。

参考文献:

- [1] 重庆西南水运工程科学研究所. 岷江老木孔航电枢纽工程施工导流与施工期通航水工模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2022.
- [2] 冯吉新. 大藤峡水利枢纽工程施工期通航设计[J]. 东北水利水电, 2018, 36(10): 14-15, 42.
- [3] 张信伟, 孙保虎, 胡峰军, 等. 汉江雅口航运枢纽工程施工期通航研究[J]. 水运工程, 2020(12): 155-160, 171.
- [4] 周敬林, 周定科, 邓方明. 岷江东风岩航电枢纽工程施工期通航研究[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(5): 255-257.
- [5] 尹崇清, 刘峰钻, 张湛, 等. 岷江龙溪口航电枢纽施工期通航问题试验研究[J]. 水运工程, 2013(1): 114-120.

(本文编辑 王璁)

征订通知

2024年《水运工程》杂志征订工作已经开始,请登录《水运工程》杂志官方网站: www.sygcc.com.cn 首页下载中心下载“2024年《水运工程》征订通知单”,有关要求和反馈信息一应俱全。

《水运工程》编辑部