



嘉陵江利泽航运枢纽施工期三期通航及施工截流试验

陈 凯¹, 倪志辉², 彭小情³

(1. 南京慧水软件科技有限公司, 江苏南京 210036; 2. 重庆交通大学, 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016;
3. 海盈生态环境研究院(南京)有限公司, 江苏南京 210009)

摘要: 为了保证利泽航运枢纽修建阶段航道能够保证基本的安全通航功能, 根据利泽航运枢纽工程施工导截流 1:100 正态定床物理模型试验的成果, 从流速、流态、通航流量以及航行路线等角度分析施工导流期三期的通航水流条件以及围堰截流试验情况, 并得出截流时不同龙口宽度的计算参数。结果表明, 提出的施工三期导流围堰方案所得出的试验结果在流速、流态等水流条件方面均可较好地解决本枢纽工程的施工期通航问题。

关键词: 航运枢纽; 施工导流; 通航条件; 龙口宽度

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0119-07

Test of navigation and construction closure for third phase of Lize Navigation-Power Junction in Jialing River

CHEN Kai¹, NI Zhihui², PENG Xiaoqing³

(1. Nanjing Huishui Software Technology Co., Ltd., Nanjing 210036, China;

2. Southwestern Research Institute of Water Transportation Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

3. Haiying ECO Environment Institute(Nanjing) Co., Ltd., Nanjing 210009, China)

Abstract: To ensure the basic navigation function of the channel during the construction phase of Lize Navigation-Power Junction, according to the results of the 1:100 normal fixed bed physical model test for the construction diversion and closure of Lize Navigation-power Junction, we analyze the navigable flow conditions and cofferdam closure test in the third stage of construction diversion period from the perspectives of velocity, flow pattern, navigable flow and navigation route, and obtain the calculation parameters of different closure widths. The results show that the test results obtained from the proposed diversion cofferdam scheme for the third phase of construction can well solve the navigation problem during the construction period of this navigation-power junction in terms of flow velocity, flow pattern and other water conditions.

Keywords: navigation-power junction; construction diversion; navigation condition; closure width

枢纽建设施工导截流期间, 围堰等导流建筑物将束窄河段, 减小过水断面面积, 改变原始水流特性, 从而影响河段的行洪能力和通航水流条件。近年来, 已有不少学者对枢纽工程施工期通航水流条件进行研究, 如吕景洋等^[1]采用正态物理模型对依兰航电枢纽下坝线施工一期围堰及二

期通航水流条件进行试验研究, 结果表明, 施工一期围堰不仅壅高了上游水位, 同时改变了水流流速分布; 张公略等^[2]通过对富春江船闸扩建改造工程施工导流不同围堰布置和结构形式的综合比较, 提出采用土石过水围堰方案。另外, 还有一些学者也进行过该方面的研究^[3-10]。本文根据利

收稿日期: 2023-06-20

作者简介: 陈凯 (1991—), 男, 工程师, 从事河流海岸水动力学、环境及数值模拟方面的研究。

泽航运枢纽工程正态物理模型试验,详细分析施工期三期通航所存在的问题以及三期围堰截流试验结果,并且对各施工导截流期通航等问题提供了相关的参考指标。

1 工程概况

利泽航运枢纽属于综合利用航运枢纽工程,施工期长、施工布置复杂,施工过程包括4个枯水期和4个汛期,其中施工导流期四期不进行通航要求,本文主要从三期对施工期通航水流条件的影响进行研究。利泽航运枢纽地理位置及枢纽平面布置如图1、2所示。本枢纽工程采用的施工

导流顺序为:三枯围右岸电站厂房及余下7.5孔闸,6孔闸过流;汛前修建厂房全年围堰,拆除三枯围堰;三汛厂房继续施工,12孔闸过流。



图1 利泽航运枢纽地理位置

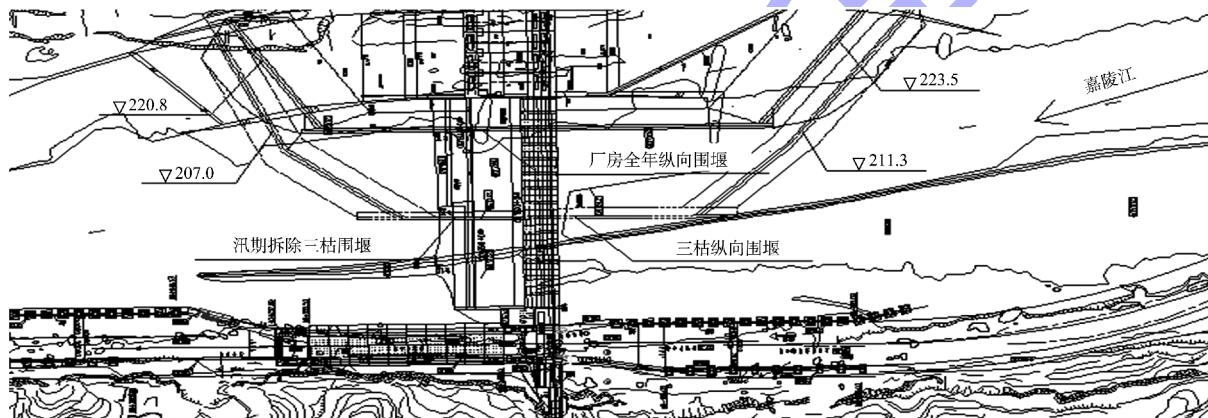


图2 利泽航运枢纽平面布置及施工期布置(单位: m)

本枢纽施工期推荐导流标准为:枯期围堰11—4月采用洪水标准为10 a一遇,相应设计流量 $Q=2\ 620\ m^3/s$;汛期导流流量采用洪水标准为全年10 a一遇,相应设计流量 $Q=20\ 500\ m^3/s$ 。

本航道施工期按单向控制性河段通航,其尺度为 $2.0\ m \times 30\ m \times 330\ m$ (水深×航宽×弯曲半径),按IV级航道标准,通航500 t机动驳,其尺度为 $8.0\ m \times (40\sim48)\ m \times 1.6\ m$ (宽×长×吃水)。

口门区通航水流条件标准为:上、下游引航道内及靠船墩附近纵向流速小于0.5 m/s,横向流速小于0.15 m/s,引航道口门区允许水流表面最大流速标准为: $v_{\text{横}} \leq 0.30\ m/s$ 、 $v_{\text{纵}} \leq 2.0\ m/s$ 、 $v_{\text{回流}} \leq 0.4\ m/s$ 。导航段宜为静水区。

2 模型设计及验证

2.1 模型设计

为满足研究内容要求,同时减小模型缩尺影响,使模型更能直观反映枢纽施工期的实际情况,按重力相似准则设计,采用正态实体模型。根据SL 155—2012《水工(常规)模型试验规程》^[11]要求,决定采用平面比尺 λ_l 和垂直比尺 λ_h 均为100的正态模型。模拟从距坝轴线以上1.7 km至坝轴线以下1.3 km全长约3.0 km的原型河道,分析研究各期围堰施工期工程河段的通航问题。模型其他比尺为:流速比尺 $\lambda_v=10$,流量比尺 $\lambda_Q=10$ 万,河床糙率比尺 $\lambda_n=2.15$,水流运动时间比尺 $\lambda_{tik}=10$ 。

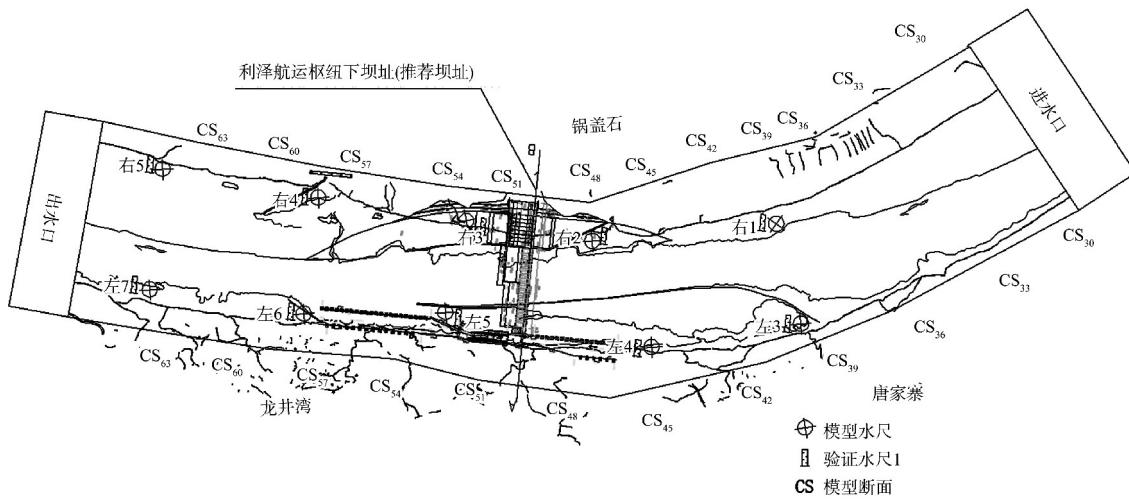
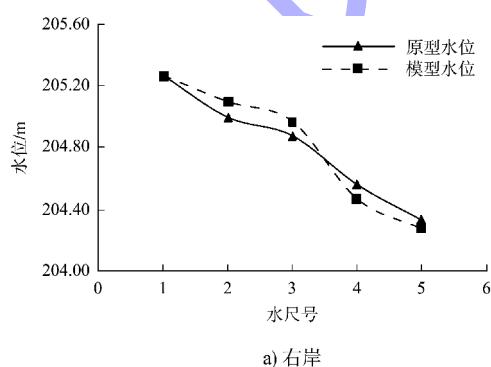


图3 利泽施工导流水工模型及观测水尺布置

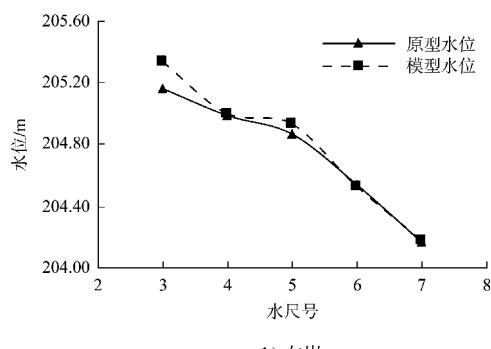
2.2 模型验证

2.2.1 水面线验证

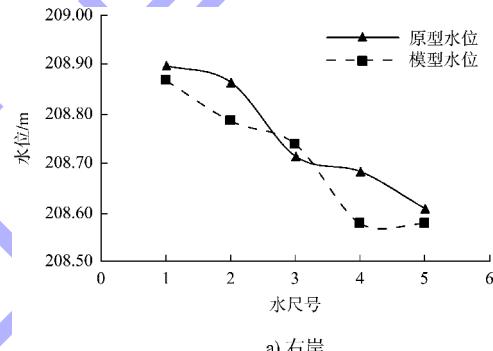
采用现场实测的 $Q=2\ 150\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q=5\ 150\text{ m}^3/\text{s}$ 各水尺断面水位资料进行验证, 并对模型水位与原型实测水位进行比较, 见图4、5。由图4、5的水位偏差值可见, 一般偏差均保持在 $\pm 0.1\text{ m}$ 以内, 最大偏差分别发生在左岸的3号水尺断面和右岸的4号水尺断面位置处, 此时实测值与模型值两者的差值分别为 0.12 和 0.06 m 。说明模型河道与原型河道基本上达到了阻力相似的要求。



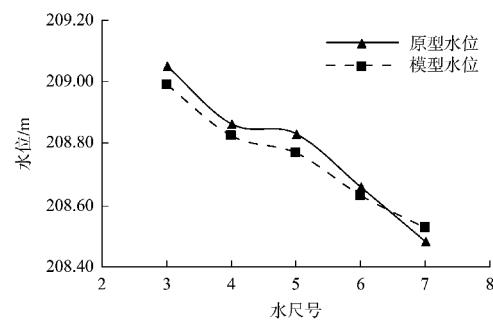
a) 右岸



b) 左岸

图4 $Q=2\ 150\text{ m}^3/\text{s}$ 时模型水面线验证

a) 右岸



b) 左岸

图5 $Q=5\ 150\text{ m}^3/\text{s}$ 时模型水面线验证

2.2.2 流速验证

采用现场实测的 $Q=2\ 500\text{ m}^3/\text{s}$ 各水尺断面流速资料进行验证, 并对模型流速与原型实测流速进行比较, 见图6。可以看出, CS_{48} 和 CS_{51} 测流断面两者的流速大小和分布, 以及最大值、最小值的位置均较为一致。各测点原型值与模型值差值最大为 0.1 m/s , 最小差值为 0.01 m/s 。且各测点流速的模型值与原型值之间的差值都在 $\pm 0.1\text{ m/s}$ 内, 相对偏差均在 $\pm 10\%$ 以内。可见模型

与原型实测资料吻合度相对较高。

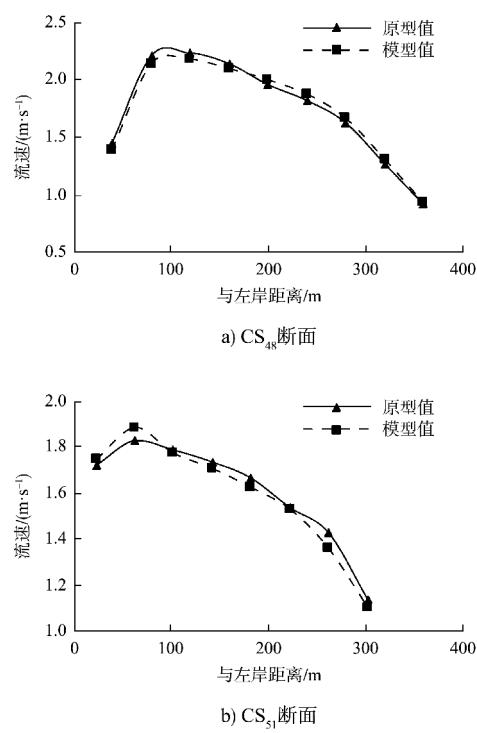


图 6 $Q=2500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时模型流速验证

3 三期围堰施工期通航水流条件

三期施工导流上引航道观测断面($S_1 \sim S_4$)布置见图 7。三期围堰施工试验工况见表 1。

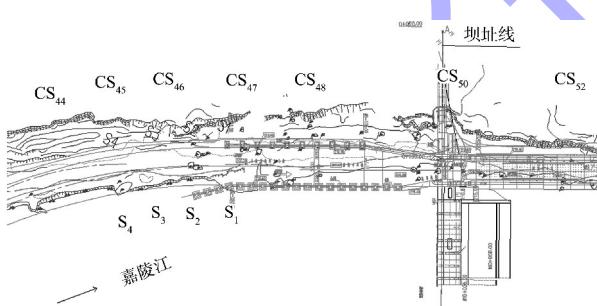


图 7 三期施工导流围堰布置

表 1 三期围堰施工期试验工况

流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	上游水位/m	下游水位/m
2 620	207.30	206.00
20 500	221.43	219.80

枯期左岸船闸通航, 利用已建成的 6 孔泄洪闸控制上游水位不低于 210.30 m(最低通航水位), 为此在模型上观测了 $1260 \sim 2620 \text{ m}^3/\text{s}$ 共 4 级流量船闸上、下引航道及口门区的流速分布及水流流态, 其中船闸上游引航道口门区及连接段流速见表 2。

表 2 枯期船闸上游引航道口门区及连接段流速

流量特征	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	上游水位/m	断面	流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		
				纵向	横向	回流
枯期观测 最低流量	1 260	210.3	S_1	0	0	0
			S_2	0	0	0
			S_3	0	0	0
			S_4	0	0	0
枯期观测 流量 1	1 690	210.3	S_1	0	0	0
			S_2	0.56	0	0
			S_3	0.48	0.03	0
			S_4	0.54	0.03	0
枯期观测 流量 2	1 960	210.3	S_1	0	0	0
			S_2	0.65	0.03	0
			S_3	0.45	0.03	0
			S_4	0.51	0.03	0
枯期设计 流量	2 620	210.3	S_1	0	0	0
			S_2	0.72	0.04	0
			S_3	0.68	0.04	0
			S_4	0.70	0.04	0

由表 2 可知, 在 $Q \leq 2620 \text{ m}^3/\text{s}$ 的各级流量下, 泄洪闸控制开启, 坝前水位保持最低通航水位 210.30 m, 由于上游来流量相对较小, 船闸上引航道口门区及连接段水面平缓, 流速较小, 无回流、泡水、漩水等不良流态; 在 $Q = 2620 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 船闸上游引航道口门区最大流速只有 0.72 m/s 。船舶可以安全通过。船闸下引航道口门区基本为静流区, 有较好的水流条件供船舶通行。

汛期共观测了 6750 、 9000 和 $10600 \text{ m}^3/\text{s}$ 共 3 级流量情况下, 船闸上下引航道及口门区的水位、比降、流速分布及水流流态, 其中船闸上游引航道口门区及连接段流速见表 3。可以看出, 当上游来流量 $Q = 6750 \text{ m}^3/\text{s}$ 、全闸敞泄时, 上引航道口门区最大纵向流速 1.15 m/s , 最大横向流速 0.11 m/s , 无回流; 当 $Q = 9000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上引航道口门区最大纵向流速 1.72 m/s , 最大横向流速 0.15 m/s , 无回流; 当 $Q = 10600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上引航道口门区最大纵向流速 1.85 m/s , 最大横向流速 0.16 m/s , 无回流。由此可以看出, 在各级流量下, 船闸上引航道口门区的水流条件均较好, 水面平缓、流速较小且无回流产生。

表3 汛期船闸上游引航道口门区及连接段流速

流量特征	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	断面	流速/($m \cdot s^{-1}$)		
			纵向	横向	回流
枯期观测 最低流量	6 750	S_1	0	0	0
		S_2	1.24	0.11	0
		S_3	1.14	0.11	0
		S_4	1.15	0.10	0
枯期观测 流量	9 000	S_1	0	0	0
		S_2	1.52	0.13	0
		S_3	1.74	0.15	0
		S_4	1.72	0.15	0
汛期最高 通航流量	10 600	S_1	0	0	0
		S_2	1.80	0.16	0
		S_3	1.85	0.16	0
		S_4	1.69	0.15	0

船闸下引航道口门区基本都为静流区,仅在当 $Q=10 600 m^3/s$ 时,下引航道口门区最大纵向流速 $1.12 m/s$,最大横向流速为 $0 m/s$ 且无回流产生。

4 施工截流水力学试验

根据水文资料分析和施工进度计划安排,本工程三期枯水右岸围堰计划于第3年11月中旬截流,根据SL 30—2017《水利水电工程施工组织设计规范》^[12]规定,截流标准采用截流时段内重现期5~10 a的月或旬平均流量,设计采用11月10 a一遇月平均流量,相应设计流量 $Q=1 500 m^3/s$ 。由于截流前混凝土纵向围堰已形成,左岸无施工道路至混凝土纵向围堰,故只能从右岸单向进占,截流材料及戗堤进占材料均由右岸提供。截流采用单戗立堵、右岸进占的截流方式。

三期三枯右岸围堰采用从右岸单戗堤方式进占,试验观测了 $1 260$ 、 $1 500$ 、 $1 690$ 、 $1 960$ 和 $2 620 m^3/s$ 5 级流量下进占过程龙口及堤头附近的水位、流速和流态。

4.1 龙口水位观测

三期三枯下游横向围堰龙口宽度 30 、 60 、 $90 m$ 的上、下游水位及水位差见表4。

表4 三期三枯截流不同龙口宽度上、下游水位及水位差

流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	龙口 宽度/m	上游 水位/m	下游 水位/m	水位差/ m
1 260	30	204.57	203.99	0.58
	60	204.40	203.99	0.41
	90	204.22	204.00	0.22
1 500	30	204.84	204.23	0.61
	60	204.69	204.26	0.43
	90	204.62	204.29	0.33
1 690	30	205.16	204.41	0.75
	60	204.95	204.47	0.48
	90	204.83	204.48	0.35
1 960	30	205.28	204.60	0.68
	60	205.15	204.62	0.53
	90	205.00	204.67	0.33
2 620	30	206.69	205.56	1.13
	60	206.27	205.61	0.66
	90	206.11	205.68	0.43

由表4可以看出,当 $Q=1 500 m^3/s$ 时,龙口下游水位起伏不大,而当龙口宽度从 $90 m$ 逐渐缩窄至 $30 m$,龙口上游水位随着龙口宽度缩窄而呈线性增加。龙口宽度 $90 m$ 时,上游水位 $204.62 m$;龙口宽度缩窄至 $30 m$ 时,上游水位 $204.84 m$,较龙口宽度 $90 m$ 时增加了 $0.22 m$ 。由于下游水位基本保持不变,而上游水位随着龙口宽度减小而增加,龙口水位差也随着龙口宽度减小而增加。龙口宽度 $90 m$ 时,龙口水位差仅为 $0.33 m$;而当龙口宽度缩窄至 $30 m$ 时,龙口水位差陡增至 $0.61 m$,每当龙口宽度平均缩窄 $30 m$,龙口水位差增加 $0.15 m$ 。

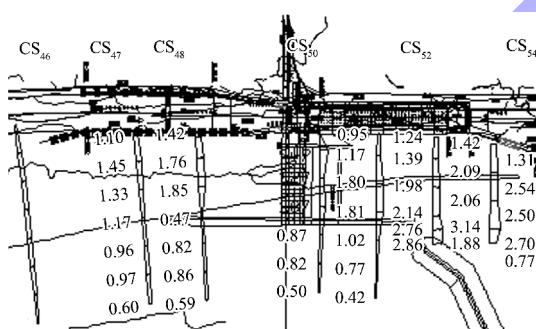
4.2 龙口流速观测

试验观测了三期三枯围堰截流过程不同龙口宽度情况下,龙口附近的流速、流态变化情况,龙口宽度 30 、 60 、 $90 m$ 的特征流速见表5,流速分布见图8。可以看出,三期三枯下游横向围堰在进占过程中,由于横向围堰与水流流向夹角达到 40° 左右,围堰堤头水流以挑流为主,过了龙口,堤头下游为缓流或微弱的回流。当围堰进占约 $220 m$,原河道主河槽基本被切断,大部分主流从泄洪闸下泄,堤头附近流速一般不超过 $3.0 m/s$ 。当截

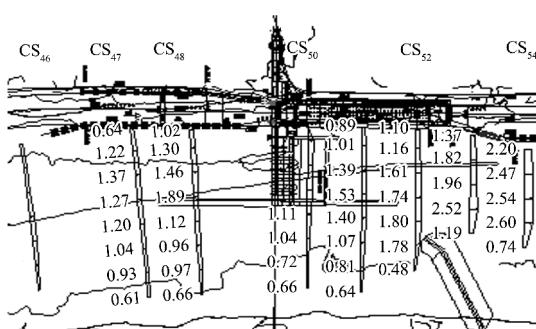
流进占至龙口宽度 60 m 时, 下游横向围堰与纵向围堰形成八字形状, 龙口上游水位壅高, 流速减缓, 水流进入龙口区后, 形成急流收缩, 过龙口后, 水流逐渐分散, 流速减缓。

表 5 三期三枯截流过程龙口附近的特征流速

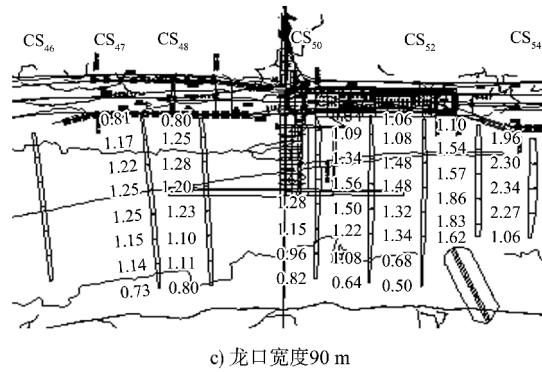
流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	龙口 宽度/m	水位 落差/m	最大流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1 260	30	0.58	2.81	2.51
	60	0.41	1.65	1.56
	90	0.22	1.55	1.48
1 500	30	0.61	2.86	2.59
	60	0.43	1.80	1.77
	90	0.33	1.48	1.38
1 690	30	0.75	3.34	2.90
	60	0.48	2.17	1.90
	90	0.35	1.72	1.65
1 960	30	0.68	3.42	2.85
	60	0.53	2.24	2.06
	90	0.33	1.90	1.69
2 620	30	1.13	3.57	2.83
	60	0.66	2.55	2.26
	90	0.43	2.08	1.94



a) 龙口宽度 30 m



b) 龙口宽度 60 m



c) 龙口宽度 90 m

图 8 龙口附近的流速分布 (单位: m/s)

由表 5 和图 8 可知, 设计流量 $Q=1 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 当龙口宽度分别为 90、60 和 30 m 时, 龙口断面最大流速分别为 1.48、1.80 和 2.86 m/s, 龙口断面靠近进占堤头处流速分别为 1.32、1.78 和 2.86 m/s, 说明当龙口宽度小于 30 m 时, 龙口断面的最大流速才贴近堤头。

4.3 截流参数计算

模型试验观测不同龙口宽度的水位比降和流速流态, 主要是为设计提供各种基础数据, 据此根据试验资料计算了龙口分流量、单宽流量、单宽功率和抛投材料粒径等参数。

龙口分流量计算公式为:

$$Q = \bar{v} A \quad (1)$$

式中: Q 为龙口过流量, m^3/s ; \bar{v} 为龙口断面平均流速, m/s ; A 为龙口过水面积, m^2 。

计算了截流中最为关注的最大单宽流量, 计算公式为:

$$q_{\max} = \bar{v}_{\max} h \quad (2)$$

式中: q_{\max} 为最大单宽流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; \bar{v}_{\max} 为最大垂向平均流速, 由于三期三枯截流时龙口水深较小, 从偏于安全的角度, 取实测断面最大流速, m/s ; h 为龙口水深, m 。

最大单宽功率计算公式为:

$$N = \rho_w q \Delta z \quad (3)$$

式中: N 为最大单宽功率, $\text{t} \cdot \text{m}/(\text{s} \cdot \text{m})$; ρ_w 为水的密度, t/m^3 ; q 为最大单宽流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; Δz 为龙口水位落差, m 。

截流设计中常用的伊兹巴斯公式为:

$$\bar{v} = K \sqrt{2g \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} d} \quad (4)$$

抛投材料粒径可根据式(4)得到:

$$d = \frac{\rho_w}{2g(\rho_s - \rho_w)} \cdot \frac{\bar{v}^2}{K^2} \quad (5)$$

表 6 $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时三期三枯截流不同龙口宽度相关参数的计算结果

龙口宽度/m	分流量/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})	分流比/%	最大单宽流量/[\text{m}^3 \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}]	最大单宽功率/[\text{t} \cdot \text{m} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}]	抛料粒径/m
30	389	25.94	14.30	9.01	0.247
60	524	34.94	8.87	3.37	0.116
90	616	41.07	7.34	2.42	0.070

由表 6 可见, 当龙口宽度 90 m 时, 龙口分流量为 $616 \text{ m}^3/\text{s}$, 占全部流量的 41.07%, 最大单宽流量为 $7.34 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$, 抛投材料平均粒径需要 0.07 m; 当龙口宽度缩窄至 60 m 时, 龙口分流量为 $524 \text{ m}^3/\text{s}$, 占全部流量的 34.94%, 最大单宽流量增至 $8.87 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$, 抛投材料平均粒径需要 0.116 m; 当龙口宽度缩窄至 30 m 时, 龙口分流量为 $389 \text{ m}^3/\text{s}$, 占全部流量的 25.94%, 最大单宽流量增至 $14.30 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$, 抛投材料平均粒径需要 0.247 m, 该粒径为三期三枯截流中所需粒径的最大值。

5 结论

1) 模型试验通过水面线和流速验证, 结果表明: 水位偏差总体保持在 $\pm 0.1 \text{ m}$ 以内, 流速偏差在 $\pm 0.1 \text{ m/s}$ 内, 相对偏差均在 $\pm 10\%$ 以内, 满足相似性要求。

2) 通过试验结果可知, 三枯船闸上引航道口门区最大流速 0.72 m/s ; 三汛各级流量下, 船闸上引航道口门区的水流条件均较好, $v_{\text{横}} \leq 0.30 \text{ m/s}$ 、 $v_{\text{纵}} \leq 2.0 \text{ m/s}$, 水面平缓且无回流产生。因此当 $Q < 10600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 船舶可安全通过。

3) 三期三枯右岸围堰截流试验表明, 设计截流流量 $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ 情况下, 当龙口宽度大于 60 m 时, 龙口落差和流速相对较小, 截流戗堤难度相对较小; 当龙口宽度为 30 m 时, 龙口水位落差为 0.63 m , 龙口过流量为 $389 \text{ m}^3/\text{s}$, 断面最大流

式中: d 为抛投材料平均粒径, m; ρ_w 、 ρ_s 为水、抛投材料密度, t/m^3 , ρ_s 取 $2.6 \text{ t}/\text{m}^3$; K 为稳定系数, 本文取 0.93。

根据上述方法计算得到三期三枯围堰截流设计流量下相关参数见表 6。

速为 2.86 m/s , 所需抛投材料最大粒径为 0.247 m 。

参考文献:

- [1] 吕景洋, 王义安, 于广年. 松花江依兰航电枢纽施工期通航条件研究[J]. 水道港口, 2010, 31(6): 604-608.
- [2] 张公略, 孙国洪. 富春江船闸扩建改造工程施工导流及围堰方案论证[J]. 水运工程, 2014(10): 115-120.
- [3] 李焱, 周华兴, 郑宝友. 那吉航运枢纽施工导流模型试验研究[J]. 水道港口, 2004(3): 145-149.
- [4] 赵仓龙. 桥梁主通航孔施工期通航方案及保障措施[J]. 水运工程, 2014(7): 127-131.
- [5] 赵立民, 杨海宁, 庞兆金, 等. 黄河龙口水利枢纽施工导流与进度控制[J]. 水利水电工程设计, 2011, 30(2): 20-22.
- [6] 陈野鹰, 崇晓雯, 彭凯. 水口坝下水位治理工程施工期通航研究[J]. 水运工程, 2012(1): 83-87.
- [7] 刘晓平, 田辉, 蒋明峰, 等. 长沙综合枢纽施工导流方案优化[J]. 水利水运工程学报, 2013(4): 91-94.
- [8] 蒋明峰, 李帆, 刘方舟, 等. 长沙综合枢纽三期施工导流及通航模型试验研究[J]. 水道港口, 2013, 34(3): 243-247.
- [9] 郑守仁, 王世华, 夏仲平, 等. 导流截流及围堰工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [10] 李军. 株洲航电枢纽施工导流及水流控制[J]. 水运工程, 2007(6): 56-61.
- [11] 南京水利科学研究院. 水工(常规)模型试验规程: SL 155—2012[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [12] 中水东北勘测设计研究有限责任公司. 水利水电工程施工组织设计规范: SL 303—2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.

(本文编辑 王璁)