

泰州引江河高港二线船闸输水 系统布置及水力计算分析

刘本芹, 宣国祥

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 结合高港二线船闸工程具体条件,按照《船闸输水系统设计规范》的要求,研究确定了船闸短廊道和三角门门缝联合输水的输水系统型式及具体布置方案,计算分析了充泄水阀门开启方式,通过建立船闸联合输水数学模型计算了闸室输水水力特性.结果表明,确定的船闸输水系统布置及阀门开启方式是合适的,相关水力指标满足规范及设计要求;设计的消能工布置适合高港二线船闸工程特点,可获得较好的闸室水流条件;同时根据水力特性计算结果提出了阀门启闭系统设计建议.

关 键 词: 高港二线船闸; 输水系统; 水力计算

中图分类号: U641.3⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2012)04-0065-06

泰州引江河高港枢纽工程位于江苏省泰州市高港区境内的引江河引江入口处,距江边 1 300 m.高港二线船闸设计通航标准为双列 1+2×1 000 t 级船队,船队尺度为 160.0 m×10.8 m×2.0 m(长×宽×吃水);船闸规模为 230 m×23 m×4.0 m(长×宽×最小水深);设计上、下游通航水位组合分别为 3.00 ~ -0.50 m(水头 3.50 m),1.00 ~ 5.48 m(水头-4.48 m),0.50 ~ 2.50 m(水头-2.00 m);输水时间要求不超过 8 min.

高港枢纽工程为引水工程,船闸根据长江水位与引江河水位的不同而具有双向水头;船闸闸室采用三角门,船闸设计规模、通航标准以及相关水力指标与类似的船闸工程相比位居前列,输水系统布置难度较大.因此,在进行船闸输水系统布置和研究时,除确定合适的输水系统型式外,还必须设计合适的消能工来消能,使充水时闸室内水流条件满足通航安全要求,同时需要研究提出输水阀门的开启方式,以便满足输水时间的要求.

1 输水系统选型

高港二线船闸设计反向水头大于正向水头,对输水系统选型起控制作用.根据《船闸输水系统设计规范》(JTJ 306-2001)^[1],按设计输水时间 8 min 计算得出的输水系统选型系数为 3.78,该值大于 3.5,说明可采用集中输水系统方案.

考虑到高港二线船闸的闸室为三角闸室,而三角闸室挡水时的闸室启闭力较小,能在动水中启闭,在低水头船闸中可以利用三角闸室的门缝进行船闸的充泄水.为了充分利用三角门的这一特点,研究确定高港二线船闸的输水系统型式为短廊道和三角门门缝联合输水,即船闸输水初期通过布置在闸首的短廊道输水,随着输水过程的进展,当上下游水位差较小时逐渐开启三角门,此时由短廊道和三角门门缝共同输水,但需保证由三角门门缝输水产生的闸室断面最大平均流速满足规范要求.而为了克服集中输水系统船闸在水力特

收稿日期: 2011-11-12

作者简介: 刘本芹(1977-),女,山东蒙阴人,高级工程师,硕士,主要从事通航建筑物水力学研究.

E-mail: bqliu@nhri.cn

性方面的弱点,可通过在短廊道出口布置合适的消能工和确定合适的输水阀门开启速度来消减和控制充水过程中的波浪作用力和局部水流作用力。

2 输水系统及消能工布置

2.1 输水阀门处短廊道尺寸

在进行联合输水方式的水力计算时,首先需确定设置在闸首短廊道上的输水阀门尺寸。按规范,三角门门缝输水型式适用于闸室最大断面平均流速小于 0.25 m/s 和设计水头小于 4.0 m 的情形,水头在 1.4 m 以下可直接用三角门门缝输水^[1]。对比分析已有研究资料后确定开启三角门的水头为 0.40 m ,即:当上下游水位差 H_k 降低至 0.40 m 前由短廊道单独输水,上下游水位差 H_k 由 0.40 m 降至闸室内外水位齐平的这段时间由短廊道和三角门门缝共同输水^[2]。输水系统布置完成后再通过计算输水水力特性加以验证流速指标。

由于联合输水的水力计算十分复杂,文中计算时在水位差小于 0.40 m 的这段时间只考虑三角门门缝输水,对于短廊道输水部分由输水流量不均匀系数 β 加以调整^[3]。依据规范对三角门门缝输水规定的水力指标,针对正、反向最大水头运行工况,计算得出水位差 $H_k \leq 0.40 \text{ m}$ 时通过三角门门缝输水的时间 T_k 分别需满足 $T_k \geq 38 \text{ s}$ 和 $T_k \geq 28 \text{ s}$,因此要求 $H_k > 0.40 \text{ m}$ 时短廊道输水系统的输水时间 T_d 分别需满足下列条件:正向最大水头时 $T_d \leq T - T_k = 480 - 38 = 442 \text{ s}$,反向最大水头时 $T_d \leq T - T_k = 480 - 28 = 452 \text{ s}$ 。

而根据《船闸输水系统设计规范》及参考文献,可进一步推导出由初始水头降至 H_k 经短廊道输水所需时间 T_d 与阀门面积 ω 的关系^[3],即:

$$\omega = \frac{2C}{\mu T_d \sqrt{2g}} \left(\frac{1}{1 - (1 - \alpha)k_v} \sqrt{H} - \sqrt{H_k} \right) \quad (1)$$

式中: C 为计算闸室水域面积,对于高港二线船闸, $C = 23 \times 253 = 5\,819 \text{ m}^2$; H 为水头,正、反向最大水头分别为 3.50 和 4.48 m ; μ 为阀门全开时的流量系数,对比分析了采用类似输水系统布置的船闸物理模型试验资料,取高港二线船闸输水阀门全开时短廊道输水的流量系数为 0.73 ; α 为系数,查《船闸输水系统设计规范》中的表 3.3.2 得出 $\alpha = 0.55$; k_v 为阀门开启时间与输水时间之比,暂取 0.8 ; g 为重力加速度。

由上式计算得出短廊道输水阀门面积在正向最大水头时需满足 $\omega \geq 18.7 \text{ m}^2$,反向最大水头时需 $\omega \geq 21.3 \text{ m}^2$ 。考虑到该船闸不进行物理模型试验,且计算时相关系数为根据经验取值或暂定值,因此在上述水力计算出的最小允许值的基础上留有一定余地,确定短廊道输水阀门面积为 24.5 m^2 ,由此设计出两侧输水阀门处廊道断面尺寸均为 $3.5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ (宽×高)。

2.2 进、出水口及消能工布置

上闸首有短廊道侧面进、出水,出水口外设消力槛,进水口廊道底高程为 -5.60 m ,廊道顶高程 -2.10 m ;下闸首采用反向布置,以充分利用门库进行消能,其短廊道也有侧面进、出水,出水口外设消力槛,进水口廊道底高程为 -5.00 m ,廊道顶高程 -1.50 m 。上、下闸首输水系统布置见图 1。

为使船闸充水运行时闸室内获得较好的水流条件,对消能工型式及布置方案进行了详细的研究,在输水系统细部布置时采取了以下几点措施:①上闸首短廊道进、出水口外第一根消力槛底部布置 2 个高度为 0.80 m 的过水孔,使出水水流通过第一道消力槛后进一步向中心部位扩散,以减小出水口水面的壅高,下闸首由于受槛的高度限制未布置过水孔;②在两侧门库边墙内侧各布置一道高 0.75 m 的竖向鼻槛,以减少进入短廊道的水流,并可使短廊道外水流形成鼻槛消能,提高消能效果,也增大了消能水体,竖向鼻槛长度大于廊道高度 0.50 m 以上;③为了避免充水时出水水流对冲消能区临近船舶停泊处,在上、下闸首闸室侧的短廊道出口处布置了高度为 0.30 m 的竖向挡槛,从而进一步改善水流的平面分布。

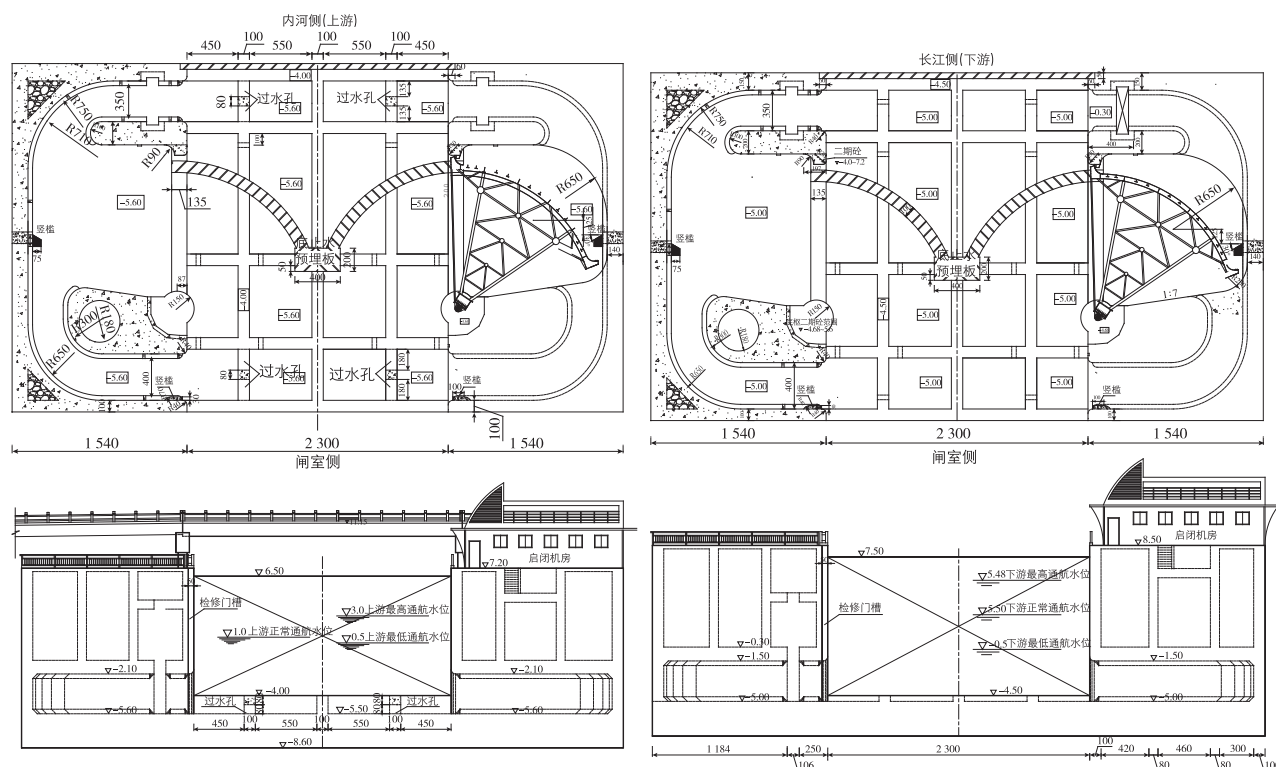


图1 高港二线船闸输水系统布置(单位:高程:m,其他:cm)

Fig. 1 Layout of the filling and emptying system for Gaogang second-line shiplock (unit: elevation:m, others: cm)

3 阀门开启方式研究

3.1 满足波浪力要求的充水阀门开启时间

对于采用集中输水系统的船闸,规范规定充水时受第一波浪力控制的输水阀门匀速全开时间^[1]为:

$$t_v = k_r \omega DW \sqrt{2gH} / [P_L(\omega_c - \chi)] \quad (2)$$

式中:波浪力系数 $D = [1 + 2a\sqrt{\alpha} + 4b(\sqrt{\alpha} - \alpha\beta)] / (1 + 2a)$; 系数 $a = l_B / l_C$, $b = l_H / l_C$; 断面系数 $\alpha = (\omega_c - \chi) / \omega_c$, $\beta = 4\sqrt{\alpha} / (1 + \sqrt{\alpha})^2$; 系数 k_r 对锐缘平面阀门可取值 0.725; P_L 为船舶允许纵向力,对 1 000 t 船舶, $P_L = 32$ kN; W 为船舶(队)排水量,按设计最大船队 $2 \times 1\,000$ t,取 $W = 2\,700$ t; ω_c 为闸室初始过水横断面面积,正向水头时为 $23 \times 4.0 = 92.0$ m²,反向水头时为 $23 \times 5.5 = 126.5$ m²; χ 为船舶浸水横断面面积,双列 $2 \times 1\,000$ t 船队时该值为 $10.8 \times 2.0 \times 2 = 43.2$ m²; l_C 为船队换算长度, $l_C = 2\,700 / (10.8 \times 2.0) = 125$ m; l_B 为船首离上闸首距离,取 6.0 m; l_H 为船尾离下闸首距离, $l_H = 230 - 6 - 125 = 99$ m。

计算得 $a = 0.048$, $b = 0.792$; 正向水头时 $\alpha = 0.530$, $\beta = 0.975$, 反向水头时 $\alpha = 0.658$, $\beta = 0.989$; 正向水头充水时双列船队的波浪力系数 $D = 1.587$, 相应的充水阀门全开时间约为 $t_v = 404$ s; 反向水头充水时则有 $D = 1.447$, $t_v = 244$ s。

3.2 满足波浪力要求的泄水阀门开启时间

泄水阀门开启方式主要控制因素为低水位一侧引航道的船舶停泊条件及流速条件。高港二线船闸上游引航道宽度为 61.5 m, 底高程为 -4.0 m (停船段); 下游引航道宽度为 63.5 m, 底高程为 -4.5 m。根据船闸泄水时引航道内停泊的船舶所受的波浪力简化计算公式 $P_L = k_r \beta \omega W \sqrt{2gH} / [t_v(\omega_n - \chi)]$, 可得 $t_v = k_r \beta \omega W \sqrt{2gH} / [P_L(\omega_n - \chi)]$, 其中: β 为经验系数, 随着输水阀门的开启及输水流量的增加其变化范围为 1.0 ~ 1.6, 此处计算时取最大值 1.6; ω_n 为低水位一侧的引航道过水横断面面积, 正向最大水头时为 $63.5 \times 4.0 = 254$ m², 反向最大水头时为

$61.5 \times 5.0 = 307.5 \text{ m}^2$; χ 为单列 $2 \times 1\,000 \text{ t}$ 船队在引航道内的船舶浸水横断面面积, 即 $10.8 \times 2.0 = 21.6 \text{ m}^2$. 计算得出正、反向最大水头时满足船舶系缆力要求的泄水阀门开启时间分别为 86 和 79 s.

另外,《船闸输水系统设计规范》规定下游引航道流速不应大于 $0.8 \sim 1.0 \text{ m/s}$ ^[1], 因此对于高港二线船闸, 泄水时引航道船舶所受波浪力不是泄水阀门开启方式的控制条件, 需考虑泄水时引航道内流速条件等各种因素后再确定.

3.3 阀门开启方式及速度的确定

由于船闸具有双向水头, 在综合考虑船舶停泊条件、输水时间要求、闸室及引航道水流条件等多种因素的前提下, 尽量简化阀门运行方式, 从而便于船闸运行及操作管理. 由此确定高港二线船闸上闸首不论正向水头充水还是反向水头泄水, 输水阀门开启时间均为 390 s; 下闸首不论正向水头泄水还是反向水头充水, 输水阀门开启时间均为 300 s.

4 输水水力特性

4.1 数学模型及计算参数

根据船闸输水原理及 Bernoulli 方程^[46], 可以写出描述单级船闸输水时的非恒定流方程组, 而三角门门缝输水的水流流态十分复杂, 美国通常采用的计算式为 $Q_k = \mu_d \omega_k \sqrt{2gh}$ ^[7], 其中 Q_k 为三角门门缝输水的流量; μ_d 为三角门门缝输水的流量系数, 此处依据美国的相关试验研究资料取 0.55; ω_k 为三角门门缝过水断面面积, 计算中取三角门匀速全开时间为 240 s; h 为门缝上下游水位差. 由此可建立短廊道与三角门门缝联合输水方式的船闸输水数学模型, 本文采用迭代和差分法求解, 从而计算船闸联合输水过程的水力特征值.

高港二线船闸具有双向水头, 研究确定的上、下闸首布置基本相同, 仅槛的高度及底高程有所差别, 因此上、下闸首输水系统的流量系数较为接近, 具体取值参考了采用类似输水系统型式船闸的物理模型试验研究资料^[8-10], 不同水头运行工况下数学模型计算特征参数见表 1.

表 1 数学模型计算特征参数

Tab. 1 Calculation parameters of mathematical model

水位组合/m	水头/m	充水阀门开启时间/s	泄水阀门开启时间/s	充水流量系数	泄水流量系数	三角门开启水头/m	三角门开启时间/s
3.00 ~ -0.50	正向 3.50	390	300	0.73	0.75	0.40	240
1.00 ~ 5.48	反向 4.48	300	390	0.73	0.75	0.40	240
0.50 ~ 2.50	反向 2.00	300	390	0.73	0.75	0.40	240

4.2 输水水力特性

计算得出不同运行工况的船闸充、泄水水力特征值见表 2, 典型水力特性曲线见图 2. 计算结果表明: 各种运行水头下, 输水时间满足设计不超过 8 min 的要求; 充水时闸室断面最大平均流速均小于 0.65 m/s , 满足规范布置简单消能工的流速指标; 泄水时引航道断面最大平均流速远小于 0.8 m/s , 满足规范要求; 三角门门缝输水产生的闸室断面最大平均流速小于 0.25 m/s , 满足规范要求. 经输水水力特征值的数模计算结果验证, 前述输水系统布置及确定的阀门开启方式是合适的.

表 2 闸室输水时最大水力特性值

Tab. 2 Maximum hydraulic characters of lock during filling and emptying

工况	水头/m	阀门开启时间/s	输水时间/min	最大流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最大能量/ kW	最大比能/ ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	$v_{\max 1} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v_{\max 2} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
充水	正向 3.50	390	7.15	75	1 536	13.70	0.57	0.04
	反向 4.48	300	7.04	102	2 753	18.05	0.59	0.04
	反向 2.00	300	5.40	56	658	5.17	0.40	0.04
泄水	正向 3.50	300	6.49	86	/	/	0.39	/
	反向 4.48	390	7.73	91	/	/	0.33	/
	反向 2.00	390	6.04	49	/	/	0.18	/

注: $v_{\max 1}$ 充水指闸室断面最大平均流速, 泄水指下游引航道断面最大平均流速; $v_{\max 2}$ 为三角门门缝充水产生的闸室断面最大平均流速.

此外,正向最大水头以及反向常水头充水水力特性计算结果显示,短廊道输水阀门尚未开启完毕水位差 H_k 已降至0.40 m,此时三角闸门也开始开启;而反向常水头泄水运行时,输水结束后短廊道输水阀门尚未开启完毕.因此,建议设计部门在液压启闭机和电气系统设计中考虑上述短廊道输水阀门和三角闸门同时运行的情况,闸、阀门采用独立的启闭系统.

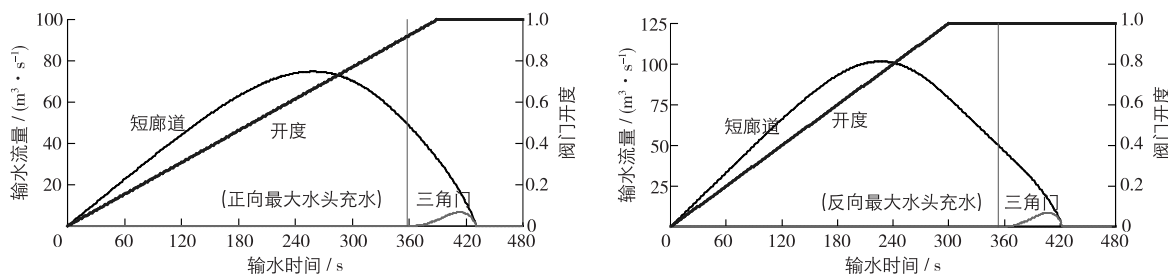


图2 典型水力特性曲线

Fig. 2 Typical hydraulic characteristic curves of lock during filling and emptying

5 结 语

(1)高港二线船闸具有双向水头,本文在分析国内部分集中输水系统船闸资料的基础上,通过水力计算分析并结合工程特点,研究确定采用短廊道和三角门门缝相结合的输水系统,并提出了输水系统具体布置,在消能工布置时研究了三项具体措施来保证闸室获得较好的水流条件.

(2)在综合考虑船舶停泊条件、输水时间要求、闸室及引航道水流条件以及便于船闸运行和操作管理等多种因素的前提下,研究确定了上、下闸首阀门开启方式;通过建立船闸联合输水数学模型,计算了不同运行工况的闸室输水水力特性,各项指标满足设计和规范要求.

(3)根据水力特性计算成果,正向最大水头充水和反向常水头充、泄水时,输水阀门尚未开启完毕三角门便已开始开启,提出了在液压启闭机和电气系统设计中考虑短廊道输水阀门和三角闸门同时运行的情况,闸、阀门采用独立的启闭系统.

参 考 文 献:

- [1] JTJ 306-2001, 船闸输水系统设计规范[S]. (JTJ 306-2001, Design code for filling and emptying system of shiplocks[S]. (in Chinese))
- [2] 刘本芹, 宣国祥. 泰州引江河第二期工程高港枢纽二线船闸输水系统布置及水力计算分析报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010. (LIU Ben-qin, XUAN Guo-xiang. Layout and hydraulic computational analyses report of the filling and emptying system of Gaogang second-line shiplock on Yinjiang River in Taizhou City[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010. (in Chinese))
- [3] 刘本芹, 宣国祥, 李中华. 船闸短廊道和三角门门缝联合输水的水力计算[J]. 水道港口, 2008(4): 278-282. (LIU Ben-qin, XUAN Guo-xiang, LI Zhong-hua. Hydraulic calculations of the lock short culvert associated with sector gate gap filling and emptying [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2008(4): 278-282. (in Chinese))
- [4] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (WANG Zuo-gao. Design of shiplocks[M]. Beijing: China Water Power Press, 1992. (in Chinese))
- [5] 德乌斯 N M. 通航船闸[M]. 陈士荫, 金煜, 译. 大连: 大连理工大学出版社, 1988. (DEWUSI N M. Navigation Lock [M]. CHEN Shi-yin, JIN Yu. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1988. (in Chinese))
- [6] 须清华, 张瑞凯. 通航建筑物应用基础研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (XU Qing-hua, ZHANG Rui-kai. Application basic research of navigation structure[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1999. (in Chinese))
- [7] EM1110-2-1604, Hydraulic design of navigation locks[S].
- [8] 刘本芹, 宣国祥. 芜申运河杨家湾船闸输水系统水力计算及模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008.

- (LIU Ben-qin, XUAN Guo-xiang. Hydraulic calculations and physical model experiment study of Yangjiawan shiplock's filling and emptying system on Wushen Canal[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [9] 刘本芹, 宣国祥, 宗慕伟. 施桥三线船闸输水系统水力计算及模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008. (LIU Ben-qin, XUAN Guo-xiang, ZONG Mu-wei. Hydraulic calculations and physical model experiment study of the Shiqiao third line shiplock's filling and emptying system[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [10] 刘本芹, 宣国祥, 宗慕伟. 芜申运河下坝二线船闸输水系统水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008. (LIU Ben-qin, XUAN Guo-xiang, ZONG Mu-wei. Hydraulic model experiment study of the Xiaba second line shiplock's filling and emptying system on Wushen Canal[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))

Layout and hydraulic analyses of the filling and emptying system of Gaogang second-line shiplock on the Yinjiang River

LIU Ben-qin, XUAN Guo-xiang

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Key Laboratory of Navigation Structures, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: According to the specific characteristics of the Gaogang second-line shiplock and the *Design Code for Filling and Emptying System of Shiplocks*, the lock's short culvert associated with sector gate gap filling and emptying system is adopted and the detailed layout has been analyzed and determined. At the same time, the valves' opening modes are calculated. The hydraulic characteristics during lock filling and emptying are calculated through the lock filling and emptying mathematical model. The calculated results indicate that the dimensions of the filling and emptying system and the valves' opening modes are appropriate and the hydraulic characteristics can meet the relevant requirements of the code and the design. The suggested dissipation type is suitable for the Gaogang second-line shiplock and preferable flow condition may be obtained in the lock chamber. Furthermore, the design proposal for the open-close system of the valve and the gate is put forward in the study.

Key words: Gaogang second-line shiplock; filling and emptying system; hydraulic calculation

“重庆市中小河流水文监测系统”在重庆特大暴雨汛情监测中发挥了重要作用

2012 年 7 月 18 日,《江苏省中小河流水文监测系统报讯通信系统》项目合同签订仪式在南自所举行. 江苏省水文水资源勘测局局长长春松、水利部南从重庆市防汛抗旱指挥部办公室获悉,2012 年 7 月 21 日 8 时至 22 日 13 时,重庆市渝西部分区县出现强降雨天气过程,其中,潼南、大足、荣昌、永川、铜梁、璧山、江津等 7 个区县达到大暴雨,最大雨量荣昌盘龙站为 327.5 毫米. 南自所正在实施的“重庆市中小河流水文监测系统”在重庆这次特大暴雨汛情监测中发挥了重要作用.

上述 7 个区县都均布设了系统监测站点,已建的 68 个监测站点,其中包括这次特大暴雨影响最严重的荣昌县的 28 个监测站点都是今年抢在汛期前完成的,这些站点工作正常,特大暴雨发生时都及时发回了数据,为重庆市防汛预警决策提供了有效的技术支持.

目前南自所科研人员正冒着酷暑坚守在现场的各站点,为该系统保驾护航,确保汛期安全渡过.

摘自南京水利科学研究院网站