

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.03.015

南水北调中线穿河倒虹吸口门位置及尺寸试验

王勤香¹ 朱鸿庆²

(1. 黄河水利职业技术学院水利系, 河南 开封 475001; 2. 开封市人防办公室, 河南 开封 475000)

摘要 采用动、定床相结合的变态河工模型试验, 对无工程和工程建设后倒虹吸口门不同布置方案的水位、流速、主流及冲淤情况等试验结果进行对比分析, 确定了南水北调中线安阳河倒虹吸工程行洪口门的位置和尺寸。结合其他南水北调中线倒虹吸工程口门布置情况, 研究了影响行洪口门位置、尺寸的主要因素, 认为深泓线是决定口门中心位置的最主要因素, 口门中心位置布置在深泓线处最佳, 最优口门尺寸应尽可能接近深泓带宽度。

关键词 倒虹吸; 行洪口门布置; 模型试验; 南水北调中线工程

中图分类号: TV672⁺.5 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2008)03-0062-04

Experimental study on position and size of flood discharge opening for inverted siphon in middle route of South-to-North Water Transfer Project//WANG Qin-xiang¹, ZHU Hong-qing²(1. Department of Water Conservancy, Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475001, China; 2. Civil Air Defense Agency of Kaifeng, Kaifeng 475000, China)

Abstract: Using a movable-bed distorted river engineering model, test results of different schemes for arrangement of the flood discharge opening are compared and analyzed, and the position and size of the flood discharge opening for an inverted siphon at Anyang River are determined from the aspect of engineering safety, investment and technology level. Based on consideration of other inverted siphons constructed in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project, main factors influencing the position and size of the flood discharge opening are discussed. It is pointed out that the optimal central position of the flood discharge opening is along the thalweg, and the optimal dimension should be as close to the width of the thalweg belt as possible.

Key words: inverted siphon; arrangement of flood discharge opening; model test; middle route of South-to-North Water Transfer Project

1 问题的提出

南水北调中线总干渠穿越海河流域的卫河、子牙河和大清河等水系, 大小交叉河道约 100 条, 其中有很多穿河交叉工程为倒虹吸工程, 倒虹吸工程修建后天然河道形成一行洪口门, 河道水流受口门影响将发生较大变化, 其上下游及建筑物附近河床也将相应调整。合理确定行洪口门的位置和尺寸, 弄清工程附近水流流态、流速分布以及河床冲淤变化, 分析工程修建后对河床稳定性及洪水水位的影响是穿河倒虹吸工程设计要考虑的问题, 其中行洪口门位置、尺寸的确定是工程设计首先要考虑的重要问题, 因为它们不仅关系到工程附近流态、流速、上游壅水、河床冲刷等问题, 还关系到建筑物的投资、安全和输水工程的正常运行。考虑到南水北调工程的重要性及穿河工程所在河段水流泥沙运动规律的复杂性, 行洪口门位置、尺寸的合理确定主要是通过相

对成熟的河工模型试验来分析研究。本文主要以较为典型的南水北调中线安阳河倒虹吸工程为例, 分析模型试验结果, 并结合其他南水北调倒虹吸穿河工程, 研究影响行洪口门位置、尺寸的主要因素。

2 安阳河倒虹吸行洪口门位置、尺寸的拟定

2.1 模型设计

2.1.1 模型设计方法

根据工程要求、试验场地及安阳河床沙组成, 采用动、定床相结合全沙变态河工模型, 河道洪水模拟满足重力相似准则, 兼顾紊动阻力相似准则, 控制几何比尺、流量比尺; 河床组成满足起动相似、悬移相似和河床变形相似准则, 控制粒径比尺和河床变形时间比尺^[1]。

安阳河河床中既有较细的相当于悬移质中的床沙质, 也有较粗的卵石推移质, 模型沙设计时既要考虑悬移相似又要考虑起动相似, 还要解决两者因相

似关系式不同而产生的矛盾。本模型沙设计时先根据场地条件定出水平比尺,然后在一定变率范围内以变率为变量确定出对应的垂直比尺,在此基础上按卵石推移质起动相似准则确定粒径比尺,再根据原型沙粒径及级配组成引用沉速判别数,考虑悬移相似,定出模型沙(选天然沙作为模型沙)级配组成及对应粒径比尺,最后调整变率使按卵石推移质起动相似确定的粒径比尺与按悬移相似计算的散体沙粒径比尺相一致,就可确定变率及其他模型比尺^[2]。

2.1.2 模型场地布置及模型验证

模型平面布置如图 1 所示,其中 A 区为进水池;B1、B2、B3 为定床区;C1、C2、C3 为动床区;D 区为退水池,图中“600”表示最终推荐方案的口门中心距左导线的距离 l 为 600 m,图中主流线为天然无交叉工程(简称无工程,下同)情况下的主流线。

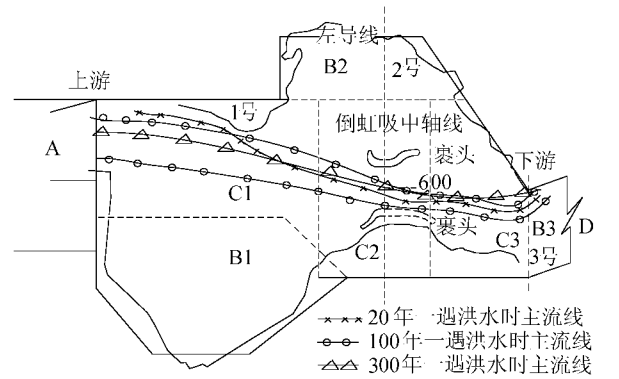


图 1 模型平面布置

根据研究河段的历史洪水调查及推算资料,从洪水水位、流速及冲淤变化等方面进行模型验证。洪水水位方面,采用 1982 年 8 月洪水调查洪痕对物理模型进行洪水水位验证,洪痕点 1 号、2 号和 3 号(图 1)的模型观测水位分别为 85.58 m、85.24 m、85.16 m,洪痕高程分别为 85.46 m、85.38 m、85.33 m,相对误差分别为 0.14%、-0.16% 和 -0.20%,洪水淹没情况与调查情况基本一致。流速方面,各频率洪水(20 年一遇、100 年一遇、300 年一遇)倒虹吸轴线处测算断面平均流速与对应无工程河段调洪验算流速相对误差分别为 0.00%、-2.50% 和 -0.96%。

表 1 不同布设方案河势情况

方案	B/m	l/m	口门位置	口门处河势变化
0	195	550	偏左	流态紊乱,弯道横比降很大,左岸严重壅水,洪水不能通畅下泄。
1	195	650	偏右	流态平稳,弯道横比降不明显,工程阻水较弱,出流平顺,流速分布与天然情况相差不大,河床以淤积为主。
2	165	650	偏右	右岸裹头处有回流,弯道横比降不明显,工程有一定阻水,出流基本平顺,流速分布基本接近天然情况流速分布,河床以冲刷为主。
3	135	650	偏右	左右岸裹头处有回流,有明显的弯道横比降,工程阻水严重,出流不平顺,流速分布明显大于天然情况流速分布,河床普遍冲刷。
4	165	600	适中	流态很平稳,几乎没有弯道横比降,工程阻水不明显,出流平顺,流速分布与天然情况接近,河床冲淤变化不大。

注:口门处的高程为设计河底高程; B 为口门宽度; l 为口门中心与左导线的距离。

误差均小于 $\pm 5\%$ 。冲淤变化方面,无工程 300 年一遇洪水时,模型与原型河床冲淤变化不但在定性上相符合,在定量上也基本相似。

2.2 行洪口门位置的确定

对无工程河道进行模型试验,通过观测河势找出主流带、主流线、深泓带及深泓线的范围和位置,据此确定行洪口门位置。

a. 主流带、主流线位置的确定。由模型平面图(图 1)及无工程情况倒虹吸口门附近垂线平均流速分布(图 2)可以看出:主流宽度随流量的增大而增大,小洪水主流带宽 150 m 左右,大洪水主流带宽约 200 m,不同频率洪水主流带位置在距左导线 550 ~ 750 m 范围内;主流线变化符合小水坐弯、大水走直的特点,主流线沿流程呈从左向右发展的趋势,不同频率洪水主流线位置不定,但在距左导线 600 m 处主流线出现次数较多。

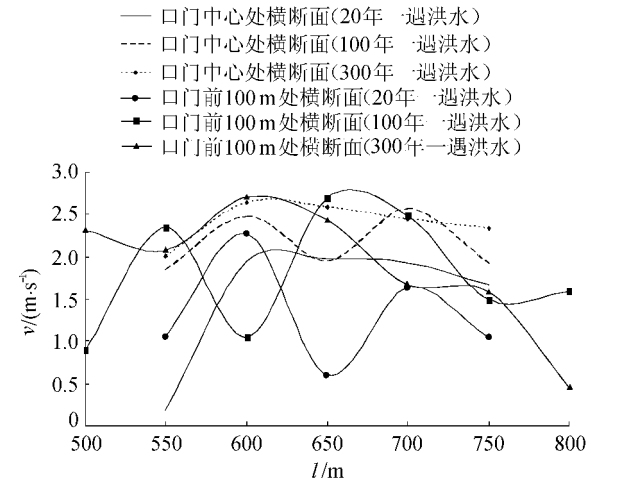


图 2 行洪口门附近不同频率洪水垂线平均流速分布

b. 深泓带、深泓线位置的确定。由倒虹吸轴线附近河谷横断面(图 3)可以得出:倒虹吸轴线附近深泓带宽度约为 180 m,深泓带距左导线 520 ~ 700 m,深泓线距左导线 600 m。

c. 口门位置的确定。根据主流线、深泓线位置,进行了几种不同布设方案的模型试验,表 1 为 300 年一遇洪水时不同方案的河势情况。通过对不

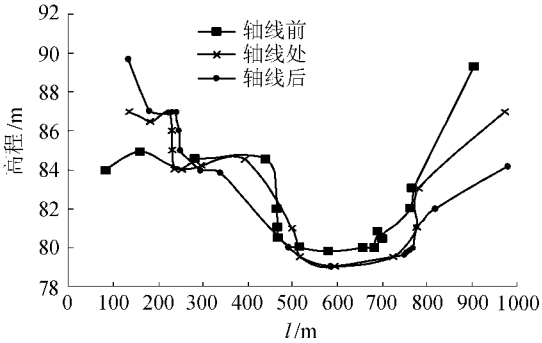


图3 倒虹吸轴线附近河谷横断面

同方案试验结果的比较分析,最终选取距左导线600 m处为最优口门位置。

2.3 行洪口门尺寸的确定

安阳河倒虹吸工程设计口门尺寸有方案1(口门宽195 m)、方案2(口门宽165 m)和方案3(口门宽135 m)3组方案,设计埋深3.5 m。通过观测分析无工程情况下和不同方案下的水位、主流、冲淤变化等试验结果,以确定行洪口门尺寸^[3]。

2.3.1 水位

目前在工程设计中常用下列公式^[4]计算口门上游壅水情况：

$$\Delta z = \zeta (v_m^2 - v_0^2)$$
$$L = 2\Delta z / i$$

式中： ζ 为水流阻力系数,根据修建工程阻断流量与设计流量的比值查有关表格确定,这里取0.05; v_m 为倒虹吸轴线处断面平均流速,m/s; v_0 为口门上游河道断面平均流速,m/s; Δz 为口门上游最大壅水高度,m; L 为壅水范围,m; i 为河道比降。表2为不同口门尺寸壅水情况量测值及理论计算值,由表2可知方案3最大壅水高度量测值大于理论计算出的允许最大壅水高度,其壅水范围、壅水高度明显大于其他2个方案。

表2 不同口门尺寸壅水情况

方案	L	$\Delta z/m$	
		量测值	计算值
1	300	0.17	0.20
2	452	0.25	0.22
3	750	0.37	0.30

2.3.2 主流

小洪水时,除方案3裹头略微阻水,其他2个方案口门宽度大于主流带宽,过流能力能够满足要求;大洪水时,方案3口门宽度远小于主流带宽,主流不能通畅下泄,影响泄流,方案2口门宽度小于主流带宽,主流基本平顺,方案1口门宽度略小于主流带宽度,主流平顺,方案1和方案2过流能力均可以满足要求。

2.3.3 冲淤情况

表3反映了300年一遇大洪水时不同布设方案行洪口门处河床冲淤变化。由表3可以看出:口门处河床高程为原河道天然高程(平均80 m)时,3种工程布设方案河床普遍冲刷,其中方案3冲刷最严重,方案1以冲刷为主,稍有淤积,各种方案最大冲刷深度均大于天然无工程情况。当行洪口门处高程为设计河底高程(77 m)时,因口门处河底高程降低,平均流速减小,除方案3普遍冲刷外,方案1、方案2冲淤变化较小。

通过以上比较分析,结合300年一遇洪水时不同方案河势情况,从防洪、冲淤、经济等方面综合考虑确定最优口门宽度为165 m。

表3 不同布设方案行洪口门轴线处河床冲淤深度 m

测点位置	方案1		方案2		方案3		天然无工程
	①	②	①	②	①	②	
左2	-3.48	0.25	-3.76	0.91	-4.61	-0.39	-1.47
左1	-0.58	0.20	-1.81	-0.16	-2.71	-0.09	-1.83
中点	-0.32	-0.05	-1.18	-0.26	-2.03	-0.51	-2.10
右1	0.10	0.05	-0.54	-0.11	-1.49	-0.36	-1.81
右2	0.72	0.15	0.19	0.26	-0.66	-0.01	-0.78

注:①和②分别表示口门处高程为原河道高程和设计河底高程;测点沿轴线均匀布设;“-”表示冲刷。

3 影响行洪口门位置的主要因素

口门的位置决定了工程的安全性,还会影响上下游河势,因此非常重要。口门位置选择时既要考虑主流带范围、主流线位置,还要考虑深泓带范围、深泓线位置。从安阳河倒虹吸口门位置的确定过程可以看出:当口门中心位置距离左导线550 m时,仅考虑了小洪水时主流带及深泓带的位置,未考虑整个口门上游不同频率洪水时主流带的范围,更未考虑深泓线、主流线的位置,当大洪水来临时左岸壅水严重,不利于洪水通畅下泄。当口门中心位置距离左导线650 m时,基本上考虑了各频率洪水时主流线位置、主流带及深泓带范围,但未考虑深泓线的位置,倒虹吸轴线横断面处弯道横比降明显,左右岸水位落差大,口门处水流与裹头(尤其右岸裹头)分离现象明显,局部有明显回流,口门及上下游河势变化也较大。当口门中心位置距离左导线600 m时,既考虑了深泓线的位置又兼顾了不同频率洪水主流线位置,且口门位置在深泓带及不同频率洪水主流带的范围之内,倒虹吸轴线横断面处几乎没有横比降,水面很平稳,轴线处各频率洪水水位与无工程时的水位最大相差不大于0.1 m,倒虹吸轴线横断面处流速分布均匀,各频率洪水流速分布与无工程时流速分布很接近,水流比较顺畅,流态较为稳定;大洪水过后,在地形测量断面内(特别是轴线断面)的冲

刷量不大 ,冲刷深度也较小。

因此 ,影响行洪口门位置的主要因素是主流线、深泓线的位置以及主流带和深泓带的范围 ,并且深泓线位置是决定口门位置的最主要因素。南水北调中线的滹沱河倒虹吸工程 ,口门中心线布置在河道深泓线附近 ,沙河穿河工程口门选在河道中部偏右的主槽位置 ,唐河倒虹吸工程口门选在靠左岸天然河道的主槽位置^[5]。上述南水北调中线行洪口门位置布设都比较合理 ,两侧水流进入口门的流量和横向流速基本均衡 ,河道上下游河势变化较小。

4 影响行洪口门尺寸的主要因素

口门尺寸是决定工程投资大小及影响工程安全性的重要因素 ,口门尺寸会影响上游壅水范围、最高壅水位置及口门附近的冲淤情况。从安阳河倒虹吸口门尺寸的确定过程可以看出 :当口门宽度接近主流带、深泓带的宽度时 ,水流流态平稳 ,壅水范围小 ,壅水高度小于理论计算允许值 ,基本不淹没两岸村庄 ,河床冲淤变化小 ,工程很安全 ,但工程投资较大 ;当口门宽度远小于主流带、深泓带宽度时 ,工程投资减小但壅水高度大于理论计算值 ,壅水明显 ,壅水范围较大 ,两岸淹没面积增大 ,倒虹吸轴线处及下游冲刷现象严重 ,对工程安全不利 ;当口门宽度稍小于主流带、深泓带宽度时 ,可通过降低天然河底高程(安阳河倒虹吸处河底降低 3 m 左右) ,使工程建设后主河槽的过水面积接近天然河道主河槽的过水面积 ,这样既可以节省工程投资 ,又不至于使上下游河势变化较大 ,工程也较安全。

因此 ,影响行洪口门尺寸的主要因素是主流带、深泓带的宽度 ,其他类似的南水北调倒虹吸工程也可以说明这一点。南水北调中线滹沱河倒虹吸工程、沙河渠道倒虹吸工程 ,推荐口门宽度分别为 2000 m 和 1000 m ,口门宽度与深泓带宽度相当^[6] ,南水北调中线沧河渠道倒虹吸工程 ,推荐口门宽度为 670 m ,而沧河交叉断面处河道宽约 930 m ,主河槽宽约 700 m ,口门尺寸略小于主河槽宽度^[7]。以上工程推荐口门宽度 ,在经济、工程技术、防洪安全等方面均能满足要求 ,为最优口门尺寸。

5 结 语

影响行洪口门位置的主要因素是主流线、深泓线的位置以及主流带、深泓带的范围 ,影响行洪口门尺寸的主要因素是主流带、深泓带的宽度。口门中心位置布置在深泓线处最佳 ,行洪口门宽度接近主流带、深泓带(主河槽)的宽度最好。当主流带、深泓带位置不一致时 ,口门位置选择主要考虑深泓线的

位置和深泓带的范围 ,同时尽可能兼顾主流线的位置和主流带的范围。口门位置尽可能既在深泓带的范围内又在主流带的范围之内 ;口门宽度尽可能接近主河槽的宽度 ,使横向流速基本均衡 ,减小口门处左右岸水位差及上游壅水高度。若口门宽度小于主河槽的宽度 ,可通过降低无工程时河底高程 ,使工程建设后主河槽的过水面积接近无工程河道主河槽的过水面积 ,这样既可节省工程投资 ,又不至于使上下游河势变化较大。

参考文献 :

[1] 谢鉴衡.河流模拟[M].北京:水利电力出版社,1990.
[2] 沙玉清.泥沙运动力学引论[M].北京:中国工业出版社,1965.
[3] 谢鉴衡.河流泥沙工程学:下册[M].北京:水利出版社,1982.
[4] 叶镇国.桥涵水文水力学[M].北京:人民交通出版社,2003 284-295.
[5] 王新中,戴梅,肖立新.南水北调中线总干渠穿河倒虹吸河工模拟及优化设计[J].水科学与工程技术,2006(5):37-41.
[6] 马宝祥,陈卫国,袁浩,等.滹沱河倒虹吸行洪口门宽度的方案论证[J].水利水电技术,2005,36(4):44-45.
[7] 王建华.沧河渠道倒虹吸工程行洪口门宽度试验研究[J].南水北调与水利科技,2006,4(5):20-23.

(收稿日期 2007-05-14 编辑 骆超)

·小资料·

2007 年我国电力建设中的几件大事

- a. 据中国电力企业联合会发布的统计资料,截至 2007 年底,我国电力装机容量已达 7.13 亿 kW,仅次于美国,居世界第二位。
- b. 2007 年三峡右岸电站又有 7 台机组先后投入运行,加上左岸电站原已投入的 14 台机组,共投入 21 台机组,总装机容量已达 1470 万 kW,成为目前世界上装机容量最大的水电站。
- c. 2007 年我国新增 4 台 100 万 kW 超超临界火电机组,它们是山东邹县电厂 8 号机组、浙江华能玉环电厂 3 号和 4 号机组以及江苏国电泰州电厂 1 号机组,从而使我国已投产的 100 万 kW 超超临界机组增加到 7 台。
- d. 2007 年 12 月我国新开工的特高压示范工程——从四川宜宾到上海南汇的 ±800 kV 直流输电线路,横跨了四川、重庆、湖南、湖北、安徽、浙江、江苏、上海 8 个省市,线路全长 2034 km,输电能力达 640 万 kW,是我国乃至世界输电距离最长、输电能力最强的输电线路,动态投资 180 亿元,计划 2010 年完工。
- e. 2007 年全国共关停小火电机组 553 台,总装机容量 1438 万 kW,超额完成了年度关停计划,为节能减排目标的实现起到了一定的作用。

(吴 高供稿)