

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.06.013

南水北调中线工程典型倒虹吸进口上游垂向流速分布

付 辉, 郭新蕾, 杨开林, 郭永鑫, 王 涛

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 倒虹吸是输水工程中常见的水工建筑物, 研究倒虹吸进口上游的垂向流速分布是明晰其水力学性能的重要内容之一。以南水北调中线工程典型的唐河倒虹吸为研究对象, 通过水力学概化模型试验, 运用声学多普勒流速仪, 实测不同水深和流量组合工况下倒虹吸进口上游的垂向流速分布。试验结果表明, 受倒虹吸进口结构的影响, 上游垂向流速分布呈现出明显的顶部流速降低和底部流速增加的现象, 且淹没度越大、距离倒虹吸进口越近, 上述趋势越显著; 采用明渠对数型流速分布描述上述垂向流速分布时, 其计算误差呈抛物线型分布, 采用指数项修正后, 新的修正公式可用于计算倒虹吸进口上游垂向流速分布。

关键词: 倒虹吸; 流速分布; 模型试验; 误差分析; 输水工程

中图分类号: TV131 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2017)06-0922-08

倒虹吸由于其工程量少, 造价较低等优点, 是长距离明渠输水工程中运用较多的水工建筑物, 用于跨越河流、铁路、公路和桥梁等, 如南水北调中线总干渠由陶岔渠首到北拒马河沿线布置的倒虹吸超过100座。因此, 明晰倒虹吸进口上游的流速大小、分布等基本的水力学规律, 可为倒虹吸的优化设计和调度提供帮助。此外, 高纬度地区明渠输水工程普遍存在冰期输水的难题, 而流速是引发冰块下潜、堆积, 进而形成冰塞冰坝等冰情问题的直接驱动因素, 因此, 研究倒虹吸进口上游的垂向流速分布规律, 也可为拦冰索的外形设计和布设提供相应的科学依据, 降低倒虹吸发生冰塞险情的概率, 提高输水工程的冰期输水效率。

近年来, 由于国内长距离输水工程的大量建设和倒虹吸的广泛应用, 围绕倒虹吸的阻力系数、进水口的布置优化和漩涡防治以及过流能力变化等问题开展了研究。李娟等^[1]针对新疆某倒虹吸, 通过1:16的水工模型试验, 研究了倒虹吸的过流能力、水流流态和压力分布, 提出了倒虹吸进口段的优化方法。周赤等^[2]通过南水北调中线工程赵河倒虹吸水工模型试验, 给出了倒虹吸沿程和局部阻力损失系数。运新宝和于翠^[3]通过模型试验研究了南水北调中线天津干线瀑河倒虹吸进水口的流速分布和沿程的水位波动。王新中等^[4]分析了南水北调中线工程总干渠滹沱河、唐河和沙河北3个倒虹吸的布置, 重点研究了倒虹吸口门位置、宽度和壅水高度等。石俊营和田志中^[5]通过1:20的水工模型试验研究了南水北调中线总干渠淇河倒虹吸的进水口和倒虹吸管内的水流流态、流速分布以及明满流交替情况。国外由于新建输水工程很少, 因此, 有关倒虹吸相关问题的研究较少。Bajestan 和 Esfahani^[6]研究了倒虹吸运用时的泥沙淤积和水动力学条件; Diogo 和 Oliveira^[7]研究了倒虹吸沿程的总水头变化, 并与实测数据进行了对比。上述研究为倒虹吸的水力性能优化和安全运行调度提供了很大帮助, 但是针对倒虹吸进口的流速分布特性、流动阻力变化特性等基本水力学问题的研究尚不完善, 在倒虹吸上游流速分布问题的探讨上多集中于倒虹吸进口, 缺少倒虹吸进口上游

收稿日期: 2017-06-19; 网络出版时间: 2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20171115.1308.014.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401706); 国家自然科学基金资助项目(51679263)

作者简介: 付辉(1981—), 男, 安徽淮南人, 高级工程师, 主要从事水力学及冰工程相关研究。

E-mail: fuhui_iwahr@126.com

不同位置处的垂向流速分布特性分析和定量计算方法。本文以南水北调中线工程典型的唐河倒虹吸为原型, 通过水力学概化模型试验, 系统测量倒虹吸进口上游不同断面和水深处的流速值, 分析不同淹没水深下倒虹吸进口上游的垂向流速分布规律, 提出南水北调中线工程典型倒虹吸进口上游垂向流速分布的计算方法。

1 明渠垂向流速分布计算公式

天然河道紊流时均流速的分布已经开展了大量的研究, 得到了对数型、指数型、抛物线型和椭圆型等多种型式的垂向流速分布计算公式, 其中应用较多的是对数型和指数型。指数型流速分布公式经验性较强, 对数型流速分布公式的理论依据则较为充分。Keulegan^[8]将边界层对数流速分布引入到明渠流动中, Coles^[9]随后采用尾流函数进行修正, 此后很多学者也尝试对该公式开展进一步的修正或补充, 以适应不同的情况^[10-17]。

紊流时均流速对数型分布公式可写为^[18]

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{yu_*}{v}\right) + B \tag{1}$$

式中: y 为到渠底的距离; u 为 y 处的流速; v 为运动黏滞系数; κ 为卡门常数; B 为积分常数; u_* 为摩阻流速。

如果考虑二次流的影响, 则式(1)需要采用尾流函数进行修正^[9,18]:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{yu_*}{v}\right) + B + 2 \frac{\Pi}{\kappa} \sin^2\left(\frac{\pi y}{2h'}\right) \tag{2}$$

式中: Π 为尾流强度系数; h' 为最大流速位置处的水深。

使用尾流函数修正后, 式(2)虽然能够描述二次流带来的表面流速下降, 但在计算时会带来新的问题: 尾流函数的大小除了受到水深的影响之外, 也受到尾流强度系数 Π 的影响, 较大的 Π 值会有较大的尾流修正量, 而 Π 的值目前还没有成熟的办法确定, 这导致垂向流速分布公式中的待定参数有所增加, 给实际应用带来了困难。付辉等^[19]分析了对数型流速分布公式中卡门常数 κ 、积分常数 B 和尾流强度系数 Π 的取值范围及流速计算公式对这些参数的敏感性, 根据实测数据验证了在 κ 取 0.395, B 取 5.419 的情况下, 不包含尾流函数的对数型流速分布公式的计算值和实测值间的平均误差为 3.14%。

2 试验布置

试验布置如图 1 所示, 水槽总长 50 m, 净宽 0.8 m, 倒虹吸段长 6 m (图 1 中阴影部分), 采用方管设计,

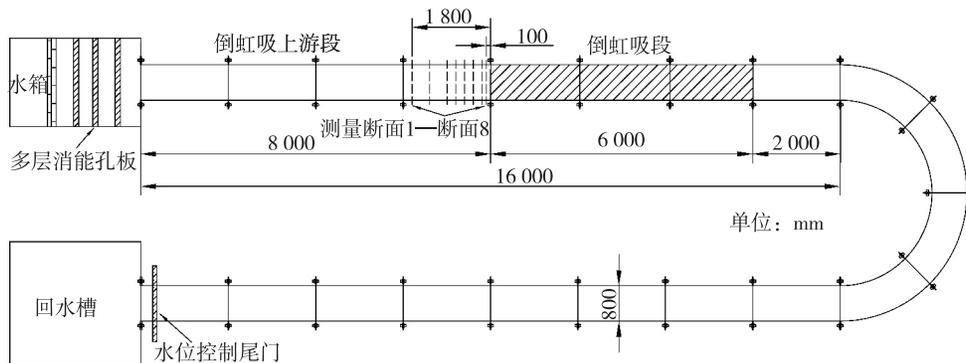


图 1 倒虹吸试验循环水槽布置简图

Fig. 1 Layout of inverted siphon model

倒虹吸上游段长 8 m, 流速测量设备采用 Nortek 三维多普勒流速仪, 精度为 0.5%, 测量时的采样频率为 200 Hz, 流量测量设备采用艾尔美特 IFM 电磁流量计, 精度为 0.3%。根据试验水槽的宽度, 选取模型比尺为 1:23.4。在上述比尺下, 倒虹吸进口高度 $H_2=0.244$ m(倒虹吸管的水平段根据实验室的尺寸进行了适当缩短), 倒虹吸进口如图 2 所示, H_1 为淹没水深, H_2 为倒虹吸进口高度, H 为总水深, V 为流速, x 为距倒虹吸进口的距离。

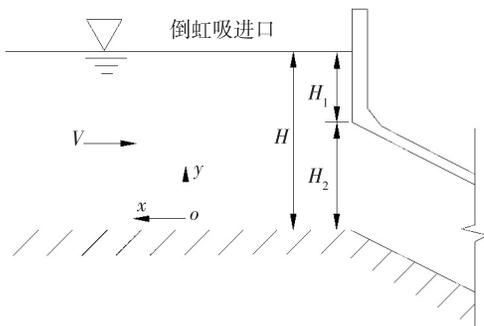


图 2 倒虹吸进口示意

Fig. 2 Entrance of inverted siphon

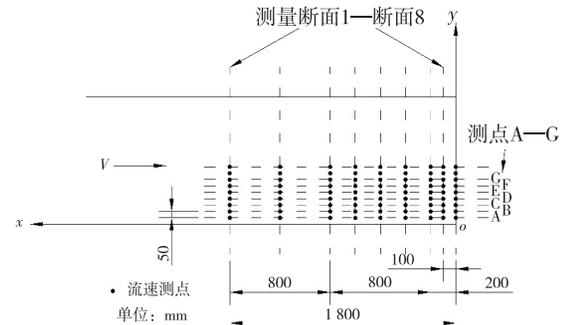


图 3 垂向测点布置

Fig. 3 Arrangement of vertical measuring points

试验共开展了 12 组工况(表 1), 淹没度 H_1/H 在 0.039~0.311 之间, 进口明流段雷诺数在 $1.3 \times 10^4 \sim 2.9 \times 10^4$ 之间, 弗劳德数在 0.061~0.091 之间, 上述试验工况覆盖了南水北调中线工程倒虹吸的正常运行工况。在流速测点的布置上, 水槽沿程距离倒虹吸进口 0.1 m、0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m、1.0 m、1.4 m 和 1.8 m 的位置设置 8 个测量断面, 分别记为断面 1—断面 8(图 1), 每条测线从底部间隔 5 cm 布置一个测点直至水面, 分别从水槽底部起记为测点 A, B, ..., 水面(图 3), 试验共测量流速值 1 680 个^[20]。

表 1 模型试验工况

Table 1 Experiment cases of the model

工况	水深 H/m	流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$	平均流速 $V/(m \cdot s^{-1})$	雷诺数 Re	弗劳德数 Fr	淹没度 H_1/H	工况	水深 H/m	流量 $Q/(L \cdot s^{-1})$	平均流速 $V/(m \cdot s^{-1})$	雷诺数 Re	弗劳德数 Fr	淹没度 H_1/H
1	0.254	19.6	0.096	1.3×10^4	0.061	0.04	7	0.304	31.0	0.127	1.9×10^4	0.074	0.20
2	0.264	21.3	0.101	1.4×10^4	0.063	0.08	8	0.309	34.4	0.139	2.1×10^4	0.080	0.21
3	0.279	26.1	0.117	1.7×10^4	0.071	0.13	9	0.314	29.3	0.117	1.8×10^4	0.067	0.22
4	0.284	23.0	0.101	1.5×10^4	0.061	0.14	10	0.324	41.1	0.159	2.5×10^4	0.089	0.25
5	0.289	28.3	0.122	1.8×10^4	0.072	0.16	11	0.334	39.5	0.148	2.4×10^4	0.082	0.27
6	0.294	28.3	0.120	1.8×10^4	0.071	0.17	12	0.354	49.7	0.175	2.9×10^4	0.094	0.31

3 垂向流速分布特点和计算误差分析

工况 2 和工况 12 两种不同淹没度下倒虹吸进口上游各测量断面的垂向流速分布分别如图 4 和图 5 所示。工况 2 的断面平均流速为 0.101 m/s, 底部流速和水面处的流速均在 0.100 m/s 左右, 淹没水深为 0.020 m ($H_1/H=0.076$), 淹没度很小, 倒虹吸进口的阻挡作用对垂向流速分布的影响较弱, 因此, 断面 1—断面 8 的垂向流速大小和分布基本一致, 均接近明渠。

工况 12 的断面平均流速为 0.175 m/s, 淹没水深为 0.110 m ($H_1/H=0.311$), 淹没度较大, 倒虹吸进口的阻挡作用使得断面 1—断面 2 与断面 3—断面 8 的垂向流速分布差别较大。断面 1 呈现出明显的顶部流速降低和底部流速增加, 其水面处流速为 0.150 m/s, 比平均流速低 15.3%, 底部流速为 0.224 m/s, 比平均流速高 26.6%。断面 2 的底部流速为 0.192 m/s, 水面处的流速分布为 0.183 m/s, 接近断面平均流速。断面

3—断面 8 的垂向流速分布基本相同, 底部流速为 0.120 m/s 左右, 水面处的流速约为 0.180 m/s, 垂向流速分布曲线接近明渠。

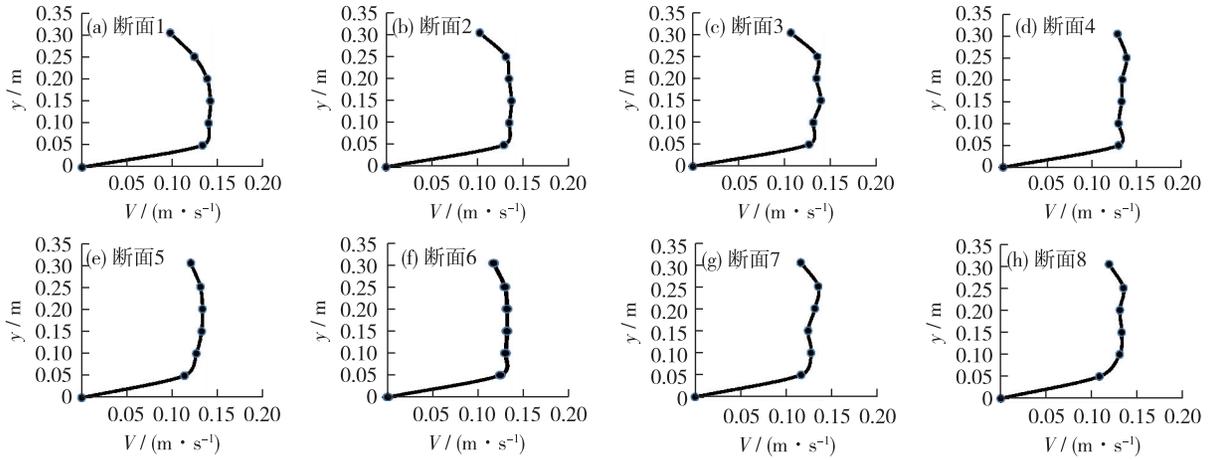


图 4 工况 2 断面 1—断面 8 的垂向流速分布

Fig. 4 Vertical velocity distribution from section 1 to section 8 for case 2

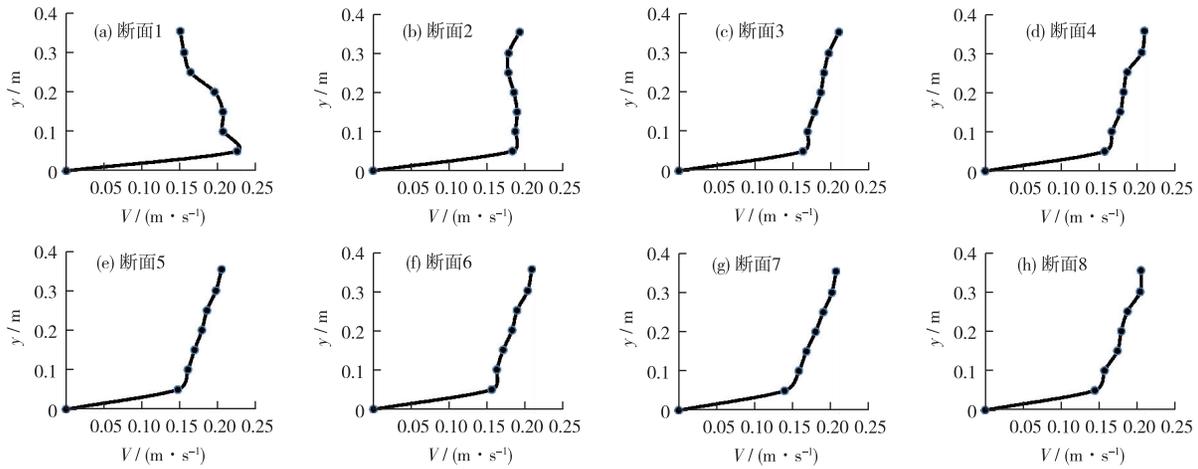


图 5 工况 12 断面 1—断面 8 的垂向流速分布

Fig. 5 Vertical velocity distribution from section 1 to section 8 for case 12

12 组工况总体的测量结果表明: 当淹没水深较小时, 倒虹吸进口阻挡作用的影响较弱, 断面 1—断面 8 的垂向流速分布接近对数型流速分布曲线; 随着淹没水深增大, 倒虹吸进口的阻挡作用逐渐增强, 断面 1 的流速分布呈现明显的上部流速降低和底部流速增大。采用式(1)以及参考文献[19]提出的参数 κ 、 B 的取值方法计算断面 1—断面 8 的垂向流速, 所有工况下实测值与计算值之间的平均误差见表 2。

由表 2 可见, 断面 1 实测值与计算值间的平均误差为 11.76%, 其中测点 A、B、F 和水面处的误差均大于 10%, 水面处误差为最大的 20.81%, 距水槽底部 0.2 m 处的测点 D 计算误差最小, 为 2.63%。断面 2 实测值与计算值间的平均误差降低到 5.74%, 其中

表 2 流速计算误差 %

Table 2 Calculation error of velocity

断面号	A	B	C	D	E	F	水面	平均值
断面 1	15.19	13.32	7.41	2.63	6.35	16.59	20.81	11.76
断面 2	7.84	7.93	3.79	1.24	3.35	6.15	9.88	5.74
断面 3	4.45	4.64	2.15	1.45	1.12	3.93	8.21	3.71
断面 4	6.69	4.78	2.10	1.61	1.92	5.75	4.95	3.97
断面 5	4.31	4.05	2.26	1.55	1.79	4.51	7.31	3.68
断面 6	3.95	4.03	1.93	1.85	1.54	6.53	7.25	3.87
断面 7	5.07	3.47	2.43	2.54	1.71	6.19	8.58	4.28
断面 8	4.35	4.07	2.52	3.21	2.55	6.44	8.64	4.54

水面处测点误差接近 10%，测点 A 的计算误差比水面处略小，为 7.84%，测点 D 的计算误差最小，为 1.24%。断面 3—断面 8 的实测值与计算值间的误差降至 4% 左右。这说明当距倒虹吸进口的距离超过断面 3 时，淹没水深对垂向流速分布的影响较弱。从更为详细的工况 2、工况 6、工况 9、工况 12 各测点实测值和计算值的误差对比图(图 6)也可以明显看到上述趋势：断面 1—断面 3 不同水深处的计算误差均逐渐缩小，断面 1 最大的计算误差达到 40%，而断面 3 处误差基本在 5% 以内。造成上述现象的原因是：倒虹吸进口是底部输水管和顶部挡墙的结构型式，水体流动过程中过水断面的形状和尺寸等边界条件发生突变，越接近倒虹吸进口，流线变化越剧烈，而断面 1 和断面 2 是距离倒虹吸进口最近的两个断面，因此，流线偏转剧烈，进而造成计算误差大(参见图 7)。

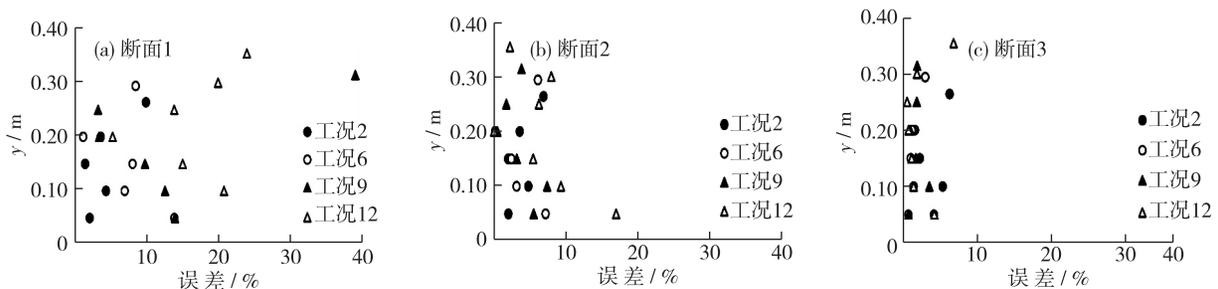


图 6 典型工况下各测点计算误差
Fig. 6 Calculation error of typical cases

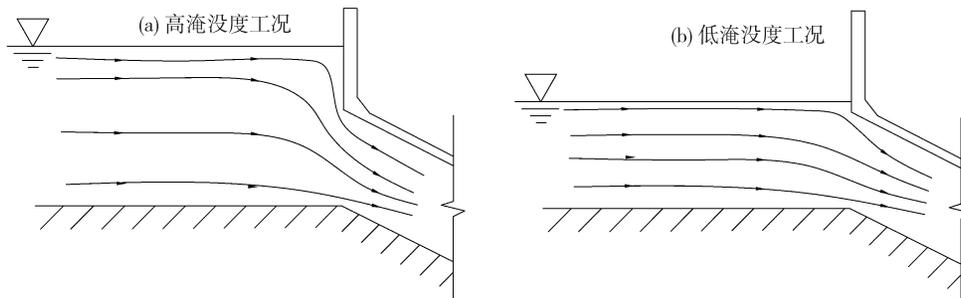


图 7 不同淹没度工况下的流线偏转
Fig. 7 Streamline deflection under different submerged depth

从垂向来看，所有断面水面处的计算误差明显大于测点 A，其中断面 1 处约大 6%，其余断面约大 3%，这其中有一个可能的原因是：倒虹吸进口的阻挡作用叠加二次流的影响，使得水面处的流速变化更加复杂，因此，采用式(1)计算时，计算值偏离实测值更大一些^[21-22]。

断面 1 是流速实测值与计算值差距最大的断面，将断面 1 在 12 组工况下各测点实测值与计算值之间的误差绘制成图 8，由图 8 可见，流速计算误差明显以距水槽底部 $y=0.2\text{ m}$ (测点 D) 处为对称轴成抛物线型分布，位置越偏向底部和水面，流速实测值与计算值之间的偏差越大。随着测量断面离倒虹吸进口越远(断面 2—断面 8)，实测值和计算值之间的误差越小，抛物线型的误差分布曲线越不明显。

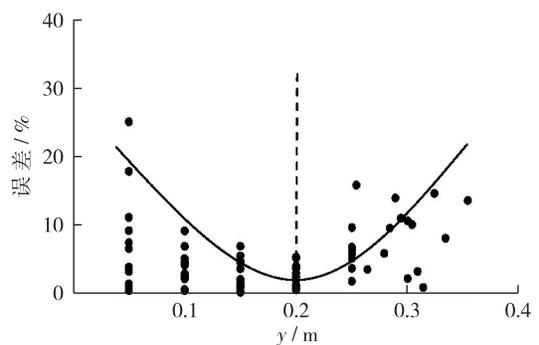


图 8 断面 1 计算误差分布
Fig. 8 Calculation error distribution of section 1

4 垂向流速分布计算

由上述分析可知, 垂向流速分布的实测值与式(1)计算值间误差最大的为断面 1(0.41 倍倒虹吸进水口高度 H_2) 处, 其次为断面 2(0.82 倍倒虹吸进水口高度 H_2) 处, 断面 3—断面 8 使用式(1)计算的误差在 4% 左右, 具有较好的计算精度。断面 1 和断面 2 的计算误差围绕 $y=0.2\text{ m}$ 基本成对称分布, 这说明倒虹吸进口的阻挡作用的分界线为 $y=0.2\text{ m}$, 即 $0.82H_2$ 处, 且使得水深大于 $0.82H_2$ 位置处的流速降低, 水深小于 $0.82H_2$ 位置处的流速增加。

为描述上述影响, 本文以对数型流速分布公式为基础, 提出了下式用于计算倒虹吸进口上游的垂向流速分布。

$$u = \left(\frac{y}{0.82H_2} \right)^{ab} \left(\frac{H-H_2}{H} \right) \left[\frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{yu_*}{v} \right) + B \right] \tag{3}$$

式中: a 、 b 为系数。

式(3)通过在式(1)的基础上增加 $(y/0.82H_2)^{ab} \left(\frac{H-H_2}{H} \right)$ 指数项进行修正。其中 $y/(0.82H_2)$ 用于描述流速计算点的相对位置; $(H-H_2)/H$ 用于描述不同淹没深度的影响; 系数 a 描述流速计算点在对称点 $y=0.82H_2$ 上下位置变化的影响, 对于南水北调中线工程典型的倒虹吸, 当 $y > 0.82H_2$ 时, $a = -0.8$; 当 $y < 0.82H_2$ 时, $a = -1.6$; 当 $y = 0.82H_2$ 时, a 可取任意值, 式(3)回归到明渠对数型流速分布公式; $b = 0.41H_2/x$ 则用于描述测量断面距离倒虹吸进口位置的影响。

为验证计算精度, 采用式(3), 将断面 1 和断面 2 共 204 个垂向流速计算值与实测值进行了对比(图 9 和图 10), 结果表明: 经修正后, 对于断面 1 和断面 2, 式(3)的计算值与实测值之间的平均误差可分别降为 4.95% 和 3.69%, 远小于式(1)的计算误差 11.76% 和 5.74%。对于距倒虹吸进口的距离超过断面 2($0.82H_2$) 位置处的垂向流速分布, 则可采用明渠对数型流速分布公式计算, 其平均计算误差约为 4%。

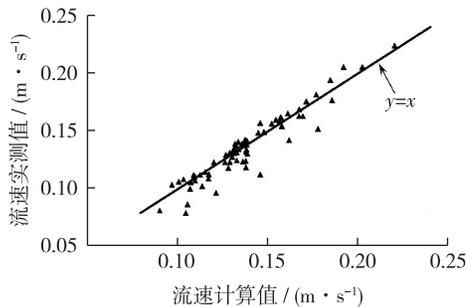


图 9 断面 1 计算值与实测值对比
Fig. 9 Comparison between calculated and measured results for section 1

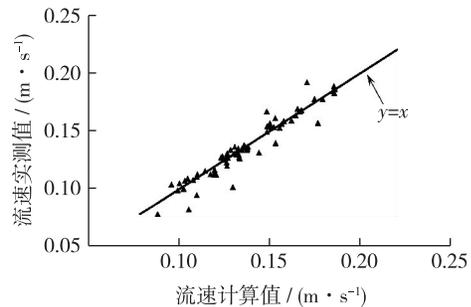


图 10 断面 2 计算值与实测值对比
Fig. 10 Comparison between calculated and measured results for section 2

5 结 论

(1) 受到倒虹吸进口顶部阻挡和底部过流的共同作用, 倒虹吸进口上游的垂向流速分布会出现明显的顶部流速降低和底部流速增加的现象, 且随着淹没度的增加上述现象越明显。

(2) 明渠对数型流速分布公式在计算倒虹吸进口上游的垂向流速分布时, 计算值与实测值之间的误差以距槽底 $y=0.82H_2$ 为对称轴呈抛物线型分布。

(3) 以对数型流速分布公式为基础, 通过增加指数项, 提出了用于计算倒虹吸进口上游垂向流速分布

的修正公式,经验证,提出的修正公式在计算断面 1($x=0.41H_2$)和断面 2($x=0.82H_2$)的垂向流速分布时的平均误差可分别由 11.76%和 5.74%降至 4.95%和 3.69%。

上述试验结果主要针对南水北调中线工程的倒虹吸结构型式,对于进口结构类似的其他输水工程倒虹吸也可提供参考;如进口结构型式变化较大,如倒虹吸管采用圆管设计时,相关系数的取值可能会略有变动,具体的变动大小和幅度还需系列试验进一步研究确定。

参考文献:

- [1] 李娟,韩明轩,牧振伟,等.倒虹吸工程水力学模型试验[J].南水北调与水利科技,2012,10(4):73-75.(LI J, HAN M X, MU Z W, et al. Model test on engineering hydraulics of inverted siphon[J]. South-to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(4): 73-75. (in Chinese))
- [2] 周赤,万里巍,何勇,等.南水北调中线工程倒虹吸管道水力学试验研究[J].长江科学院院报,2002,19(S1):8-10.(ZHOU C, WAN L W, HE Y, et al. Experimental study on flow characteristics in inverted siphon for diversion project from south to north China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(S1): 8-10. (in Chinese))
- [3] 运新宝,于翠.南水北调中线一期工程天津干线中瀑河倒虹吸水力计算及水工模型试验分析[J].海河水利,2011(4):41-45.(YUN X B, YU H. Hydraulic calculation and model test of Puhe inverted siphon for the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Haihe Water Resources, 2011(4): 41-45. (in Chinese))
- [4] 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,2006(S1):37-41.(WANG X Z, DAI M, XIAO L X. River model and optimum design of river inverted siphon for the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2006(S1): 37-41. (in Chinese))
- [5] 石俊营,田志中.南水北调中线总干渠淇河倒虹吸水力学模型试验研究[J].水利规划与设计,2006(1):45-48.(SHI J Y, TIAN Z Z. Hydraulic model test of Qihe inverted siphon for the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Planning and Design, 2006(1): 45-48. (in Chinese))
- [6] BAJETAN M S, ESFAHANI M N. Sediment flushing criteria from inverted siphon structures[J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 7(5): 695-702.
- [7] DIOGO A F, OLIVEIRA M C. A simplified approach for the computation of steady two-phase flow in inverted siphons[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 166: 294-308.
- [8] KEULEGAN G H. Laws of turbulent flow in open channels[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1938, 21(6): 707-741.
- [9] COLES D. The law of the wake in the turbulent boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1956, 1(2): 191-226.
- [10] 马殿光,董伟良,徐俊锋.沙波迎流面流速分布公式[J].水科学进展,2015,26(3):396-403.(MA D G, DONG W L, XU J F. Velocity distribution of nonuniform flow on the stoss side over dunes[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 396-403. (in Chinese))
- [11] 周建银,邵学军,假冬冬,等.弯道出流横向流速的衰减长度[J].水科学进展,2014,25(3):392-400.(ZHOU J Y, SHAO X J, JIA D D, et al. Attenuation length of transverse velocity in the outlet section of a bend[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 392-400. (in Chinese))
- [12] 赵明登,槐文信,李泰儒.明渠均匀流垂线流速分布规律研究[J].武汉大学学报(工学版),2010,43(5):554-557.(ZHAO M D, HUAI W X, LI T R. Study of velocity profile of uniform flow in open channels[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(5): 554-557. (in Chinese))
- [13] ABSI R. An ordinary differential equation for velocity distribution and dip-phenomenon in open channel flows[J]. Journal of Hydraulic Research, 2011, 49(1): 82-89.
- [14] KUNDU S, GHOSHAL K. An explicit model for concentration distribution using biquadratic-log-wake law in an open channel flow[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2013, 6(3): 339-350.
- [15] 卢金友,詹义正,赵根生,等.河道中受侧壁影响的断面流速分布规律研究[J].水利学报,2012,43(6):645-652.(LU J Y, ZAN Y Z, ZHAO G S, et al. Study on cross sectional velocity distribution affected by sidewall in river channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(6): 645-652. (in Chinese))

- [16] 吴永妍,陈永灿,刘昭伟.明渠收缩过渡段流速分布及紊动特性试验[J].水科学进展,2017,28(3):346-355.(WU Y Y, CHEN Y C, LIU Z W. Experimental study on velocity profile and turbulence characteristics in open channel contractions[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(3): 346-355. (in Chinese))
- [17] 包为民,周俊伟,江鹏,等.水位流速耦合演算模型研究[J].水科学进展,2015,26(6):795-800.(BAO W M, ZHOU J W, JIANG P, et al. Study of water-level and flow velocity coupled routing model [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 795-800. (in Chinese))
- [18] 刘春晶,李丹勋,王兴奎.明渠均匀流的摩阻流速及流速分布[J],水利学报,2005,36(8):1-8.(LIU C J, LI D X, WANG X K. Experimental study on friction velocity and velocity profile of open channel flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(8): 1-8. (in Chinese))
- [19] 付辉,杨开林,王涛,等.对数型流速分布公式的参数敏感性及其取值[J].水利学报,2013,44(4):489-494.(FU H, YANG K L, WANG T, et al. Analysis of parameter sensitivity and value for logarithmic velocity distribution formula[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 489-494. (in Chinese))
- [20] 付辉,杨开林,郭永鑫,等.南水北调典型倒虹吸防冰塞安全运行试验[J].水科学进展,2013,24(5):736-740.(FU H, YANG K L, GUO Y X, et al. An experimental study on ice jam prevention of typical inverted siphon for South-to North Water Diversion Project[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(5): 736-740. (in Chinese))
- [21] WANG Z Q, CHENG N S, WANG Z Q. Secondary flows over artificial bed strips[J]. Advances in Water Resources, 2005, 28(5): 441-450.
- [22] YANG S Q, LIM S Y, MCCORQUADALE A J. Investigation of near wall velocity in 3-D smooth channel flows[J]. Journal of Hydraulic Research, 2005, 43(2): 149-157.

Distribution of vertical flow velocity upstream of an inverted siphon in the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project *

FU Hui, GUO Xinlei, YANG Kailin, GUO Yongxin, WANG Tao

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The inverted siphon is a commonly used hydraulic structure in water diversion projects. Therefore, research on the vertical flow velocity distribution in the upstream of the inverted siphon inlet is important to elucidating its hydraulic performance. The typical inverted siphon of the Tanghe River in the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project was taken as the research object. Generalized hydraulic model experiments were carried out, and measurements were performed to obtain the vertical velocity distribution in the upstream of the inverted siphon inlet under different combinations of water depth and flow discharge, using an acoustic doppler velocimeter. The experimental results demonstrated that owing to the influence of the inverted siphon inlet structure, the upstream vertical velocity distribution largely exhibited lower velocity at the top and higher velocity at the bottom. Moreover, for greater submergence and closer to the inverted siphon inlet, the aforementioned trend was more evident. Further, when the above vertical velocity distribution was represented using the open-channel logarithmic velocity distribution approach, its computing error exhibited a parabolic distribution. When the open-channel logarithmic velocity distribution formula was improved using exponential terms, a new modified formula was obtained, which can be employed to compute the vertical velocity distribution in the upstream of the inverted siphon inlet.

Key words: inverted siphon; velocity distribution; model test; error analysis; water diversion project

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2016YFC0401706) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51679263).