

浅谈各种流态下不同水力参数对涵洞过流能力的影响分析

付 鹏 杨 娜

北京市怀柔区水务局 北京 101400

摘 要:在取水输水工程的各种建筑物中,涵洞工程的规模相对较小,结构型式也比较简单,但是工程上确实比较常见的。过去在灌区工程的设计中,对涵洞的设计多采用定型设计的方式以减小设计工作量。对于新建涵洞,需要结合现状实际情况初步拟定洞身断面尺寸,通过不断试算确定经济合理的断面大小。但是对于新建比较长的暗涵,因涉及的工况比较多,需要结合上下游规划水位的情况,考虑不同的流态,经过多次过流能力计算进行比选,是比较复杂的过程,来确定确定洞身断面尺寸。

关键词:涵洞;流态、过流能力;上、下游水头差;糙率;影响分析

绪论:涵洞是水利工程中常见的水工建筑物,按洞身结构划分,主要有箱涵(也就是矩形涵洞)、盖板涵洞、拱涵、圆管涵等。涵洞工程的主要设计内容包括孔径计算、消能计算以及洞身结构计算。在设计初始时,需要根据不同已知条件,结合上下游水深等情况,经过孔径计算,确定出经济合理得洞身断面尺寸。在工程设计上常见的过水能力计算主要有:(1)已知洞身断面尺寸、进口水深及出口水深,确定涵洞的过水流量。(2)已知设计流量、进口水深及出口水深,确定洞身断面尺寸。(3)已知设计流量、洞身断面尺寸及出口水深,确定进口水深。下面结合工程实例,针对涵洞不同流态的过流能力进行计算、对比,分析每种流态对过流能力的影响。

1 工程概况

某水利工程中暗渠长度为135米,上游明渠河道长度为680米。上游河道横断面为梯形断面,底宽为10米,边坡为1:2,上口宽度为15米,河道纵坡为0.0006;暗渠为矩形涵洞,洞身横断面尺寸为4.8m×2.8m(宽×高),共计1孔,涵洞洞底纵坡为0.0008。河道设计流量为31m³/s。对此矩形涵洞不同水深、不同流态的过流能力进行计算分析。

2 矩形涵洞流态的判别

根据取水输水建筑物丛书中《涵洞》,对现状涵洞流态进行判别。主要根据进口水深、出口水深与洞高的关系,分为无压流、半压力流、非淹没压力流及淹没压力流4种,判别标准如下:

(1) $H \leq 1.2D$: 当 $h < D$ 时,为无压流;当 $h \geq D$ 时,为淹没压力流。

(2) $1.2D < H \leq 1.5D$: 当 $h < D$ 时,为半压力流;当 $h \geq D$ 时,为淹没压力流。

(3) $H > 1.5D$: 当 $h < D$ 时,为非淹没压力流;当 $h \geq D$ 时,为淹没压力流。

式中: H ——为从进口洞底算起的上游进口水深, m;

D ——为涵洞净高, m;

h ——为从出口洞底算起的下游出口水深, m。

当下游出口水深小于洞高,上游水深逐渐加深时,涵洞流态由无压流、半压力流,最后为非淹没压力流;当下游出口水深 $\geq$ 洞高时,均为淹没压力流。所以针对不同流态对涵洞过流能力进行计算分析。

3 矩形涵洞过流能力计算

3.1 无压流涵洞过流能力计算

(1) 计算公式

根据取水输水建筑物丛书中《涵洞》,无压流涵洞的流量计算公式为:

$$Q = \sigma \epsilon m B \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad (3-1)$$

$$H_0 = H + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (3-2)$$

$$\sigma = 2.31 \frac{h_s}{H_0} \left(1 - \frac{h_s}{H_0}\right)^{0.4} \quad (3-3)$$

式中: Q ——流量, m³/s;

B ——涵洞净宽, m;

σ ——淹没系数;

ϵ ——侧收缩系数,可近似采用0.95;

m ——流量系数,可近似采用0.36;

H_0 ——包括行进流速水头在内的进口水深, m;

H ——为从进口洞底算起的上游进口水深, m;

α ——动能修正系数,取1.05;

v ——上游行进流速, m/s;

g ——重力加速度,取9.81;

h_s ——涵洞进口内水深, m, 与长、短洞有关。

(2) 流态判别

根据取水输水建筑物丛书中《涵洞》, 当 $H \leq 1.2D$ 且 $h < D$ 时, 为无压流; 为保证无压涵洞能在水位变化情

况下, 仍保持无压流状态, 要求洞内水面以上要有一定的净空面积及净空高度。一般要求净空面积不小于洞身横断面面积的10%~30%; 对于矩形涵洞, 当进口净高 ≤ 3 时, 净空高度需要 $\geq D/6$ 。

已知洞身高度 $D=2.8\text{m}$, 下游出口水深 $h=2.18\text{m}$, 拟定不同上游进口水深, 具体计算成果见下表。

表1 无压流流态判别表

试算工况	涵洞净宽 B (m)	涵洞净高 D (m)	下游进口水深 h (m)	$1.2D$	$1.5D$	上游进口水深 H (m)	流态	$D/6$	净空高度	净空面积
试算一	4.8	2.8	2.18	3.36	4.2	2.2	无压流	0.47	0.6	0.21
试算二	4.8	2.8	2.18	3.36	4.2	2.3	无压流	0.47	0.5	0.18
试算三	4.8	2.8	2.18	3.36	4.2	2.4	无压流	0.47	0.4	0.14

由以上计算表可知, 试算三不满足净空高度 $\geq D/6$ 的要求, 所以初步拟定上游进口水深分别为 $H=2.2\text{m}$ 、 $H=2.3\text{m}$ 。

当 $H=2.2\text{m}$ 时, 上游河道流速 $v=\frac{Q}{A}=\frac{31}{31.68}=0.979$ (m/s);

当 $H=2.3\text{m}$ 时, 上游河道流速 $v=\frac{Q}{A}=\frac{31}{33.58}=0.923$ (m/s)。

(3) 长、短洞判别

根据取水输水建筑物丛书中《涵洞》, 对于无压流涵洞, 流态还与洞身长度有关, 当 $L < 8H$ 时为短洞, 当 $L \geq 8H$ 时为长洞。

对于短洞: 洞进口内水深 h_s 采用下面公式进行计算。

$$h_s = h - iL \quad (\text{短洞}) \quad (3-4)$$

式中: h ——为从出口洞底算起的下游出口水深, m;

i ——洞底纵坡;

L ——洞身长度, m。

对于长洞, 则需以出口水深作为控制水深, 从出口断面向上游推算洞内水面线以确定洞进口内水深 h_s 。

已知 $H=2.2\text{m}$, $8H=8 \times 2.2=17.6$ (m), $L=135\text{m} \geq 17.6\text{m}$, 所以此涵洞为无压流长洞, 所以洞进口内水深 h_s 需进行洞内水面线推算确定。

(4) 洞进口内水深 h_s 计算

1) 洞内水面线类型判别

正常水深 h_0 计算:

$$\text{特性流量: } K = \frac{Q}{\sqrt{i}} = \frac{31}{\sqrt{0.0008}} = 1096.02 \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

$$\text{比值: } \frac{B^{2.67}}{nK} = \frac{4.8^{2.67}}{0.014 \times 1096.02} = 4.295$$

根据取水输水建筑物丛书中《涵洞》表3-5, 通过内

插法求出 $\frac{h_0}{B}=0.566$, 则正常水深 $h_0=0.566 \times 4.8=2.717$ (m)

临界水深 h_k 计算:

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{1.05 \times (31/4.8)^2}{9.81}} = 1.65$$

因 $h_0 > h_k$, 故洞底为缓坡, 同时因出口水深 $h=2.18\text{m}$, $h_0 > h > h_k$, 则洞内水面线为b1型降水曲线, 水深由出口断面向上游沿程逐渐增加。

2) 水面线计算

采用分段求和法进行水面线计算, 具体公式如下:

$$\Delta L = \frac{E_i - E_{i+1}}{i - \bar{J}} = \frac{(h_i + \frac{\alpha_i v_i^2}{2g}) - (h_{i+1} + \frac{\alpha_{i+1} v_{i+1}^2}{2g})}{i - \bar{J}} \quad (3-5)$$

$$\bar{J} = \frac{\bar{v}^2}{C^2 R} \quad (3-6)$$

$$\bar{v} = \frac{v_i + v_{i+1}}{2} \quad (3-7)$$

$$\bar{C} = \frac{C_i + C_{i+1}}{2} \quad (3-8)$$

$$\bar{R} = \frac{R_i + R_{i+1}}{2} \quad (3-9)$$

表2 洞内水面线计算成果表

断面	水深 h	A	流速 v	X	R	C	$\bar{v}$	$\bar{R}$	$\bar{C}$	$\bar{J}$	ΔL
1	2.180	10.46	2.96	9.16	1.14	73.03	—	—	—	—	
2	2.200	10.56	2.94	9.20	1.15	73.09	2.95	1.15	73.06	0.001423	18.460
3	2.210	10.61	2.92	9.22	1.15	73.12	2.93	1.15	73.10	0.001397	9.777
4	2.226	10.68	2.90	9.25	1.15	73.16	2.91	1.15	73.14	0.001375	20.709
5	2.300	11.04	2.81	9.40	1.17	73.37	2.85	1.16	73.27	0.001303	86.139
各分段长之和											135.01

由上表可知,断面5处的水深 $h=2.30\text{m}$,即为洞进口内水深 $h_s=2.30\text{m}$ 。

(5) 淹没系数 σ 计算

包括行近流速水头在内的进口水深为:

1) 当 $H=2.2\text{m}$, $v=0.979\text{m/s}$ 时:

$$H_0 = H + \frac{\alpha v^2}{2g} = 2.2 + \frac{1.1 \times 0.979^2}{2 \times 9.81} = 2.254(\text{m}) ;$$

因进口水深 H_0 小于洞进口内水深 h_s ,所以拟定的上游进口水深 $H=2.2\text{m}$ 的情况不成立。

2) 当 $H=2.3\text{m}$, $v=0.923\text{m/s}$ 时:

$$H_0 = H + \frac{\alpha v^2}{2g} = 2.3 + \frac{1.1 \times 0.923^2}{2 \times 9.81} = 2.348(\text{m})$$

按式(1-3)计算淹没系数为:

$$\sigma = 2.31 \frac{h_s}{H_0} \left(1 - \frac{h_s}{H_0}\right)^{0.4} = 2.31 \times \frac{2.3}{2.352} \left(1 - \frac{2.3}{2.352}\right)^{0.4} = 0.492$$

(6) 过流能力计算

采用流量系数为0.36,侧收缩系数为0.95,按式

(1-1)计算流量为:

$$Q = \sigma \varepsilon m B \sqrt{2g} H_0^{3/2} \\ = 0.476 \times 0.95 \times 0.36 \times 4.8 \times \sqrt{2 \times 9.81} \times 2.348^{3/2} = 12.46\text{m}^3/\text{s}$$

因计算流量小于河道设计流量 $31\text{m}^3/\text{s}$,所以拟定的上游进口水深 $H=2.3\text{m}$ 不满足涵洞过流要求。需继续加大上游水深进行试算,具体计算成果见下表。

表3 无压流涵洞过流能力计算成果表

B	流速 v	进口水深 H (假定)	H_0	$H_0^{3/2}$	出口水深 h	h_s	h_s/H_0	σ	ε	m	计算 Q
4.80	0.923	2.3	2.348	3.60	2.18	2.30	0.98	0.476	0.95	0.36	12.46
4.80	0.873	2.4	2.443	3.82	2.18	2.30	0.94	0.698	0.95	0.36	19.39
4.80	0.784	2.6	2.634	4.28	2.18	2.30	0.87	0.883	0.95	0.36	27.47
4.80	0.746	2.7	2.731	4.51	2.18	2.30	0.84	0.930	0.95	0.36	30.51
4.80	0.727	2.75	2.78	4.63	2.18	2.30	0.83	0.947	0.95	0.36	31.90
4.80	0.591	3.2	3.220	5.78	2.18	2.30	0.71	1	0.95	0.36	42.01
4.80	0.566	3.3	3.318	6.04	2.18	2.30	0.69	1	0.95	0.36	43.95
4.80	0.543	3.4	3.417	6.32	2.18	2.30	0.67	1	0.95	0.36	45.92
4.80	0.521	3.5	3.515	6.59	2.18	2.30	0.65	1	0.95	0.36	47.92
4.80	0.501	3.6	3.614	6.87	2.18	2.30	0.64	1	0.95	0.36	49.96

由上表计算可知,随着上游水深不断加大,涵洞过流能力也越来越大,当上游进口水深 $H=2.75\text{m}$ 时,涵洞即可满足过流要求。此时虽过流能力可满足要求,但涵洞内水面以上净空仅为 0.05m ,净空面积也不足洞身横断面面积的 $10\% \sim 30\%$,此时涵洞过流流态不是稳定的无压流,容易使水面以上的空气压缩或者变稀薄,对进口处造成不利影响,就是工程上常说的闷孔。

针对此种情况,对于现状已建成的涵洞,如果上游进口水位局部壅高对上游河道影响较小,拆除涵洞对周边影响较大且投资较多,一般建议保留,对进口局部段

进行加强处理。如果上游进口水位壅高对上游河道影响较大,如造成水位出槽、影响两侧建设区雨水排入产生内涝风险等,需要从行洪安全、对两侧建设区造成得淹没损失、后期运行管理以及拆除重建的投资等多角度进行对比分析,需进行详细论证拆除重建现状涵洞的必要性和可行性,再确定是否考虑拆除重建。

3.2 非淹没压力流涵洞过流能力计算

已知涵洞横断面为矩形断面,共计1孔,单孔尺寸为 $4.8\text{m} \times 2.8\text{m}$ (宽 $\times$ 高),涵洞洞底纵坡为 0.0008 。通过加大上游水深,计算涵洞非淹没压力流时的过流能力。

根据取水输水建筑物丛书中《涵洞》，当 $H > 1.5D$ 且 $h < D$ 时，为非淹没压力流。非淹没压力流涵洞的流量计算公式为：

$$Q = m_2 A \sqrt{2g(H_0 + iL - \beta_2 D)} \quad (3-11)$$

$$m_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi + \frac{2gL}{C^2 R}}} \quad (3-12)$$

$$R = A / \chi \quad (3-13)$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (3-14)$$

式中： Q ——流量， m^3/s ；

m_2 ——流量系数；

A ——洞身断面面积， m^2 ；

H_0 ——包括行进流速水头在内的进口水深， m ；

i ——洞底纵坡， $i = 0.0008$ ；

L ——洞身长度， m ；

β_2 ——修正系数，取0.85；

D ——为涵洞净高， m ；

R ——为水力半径， m ；

χ ——为湿周， m ；

C ——为谢才系数， m ；

n ——为糙率，取0.014；

$\sum \xi$ ——局部水头损失系数总和（出口损失系数除外），其中 $\xi_1 = 0.2$ 、 $\xi_5 = 0.2$ 、 $\xi_6 = 0.5$ 。

g ——重力加速度，取9.81。

分别假定不同上游水深进行过流计算，具体计算成果见下表。

表4 非淹没压力流涵洞过流能力计算成果表

试算	流速 v	进口水深 H （试算）	H_0	B	D	m_2	β_2	R	C	Q
(1)	0.591	3.2	3.220	4.8	2.8	0.63	0.85	0.88	69.98	36.57
(2)	0.566	3.3	3.318	4.8	2.8	0.63	0.85	0.88	69.98	38.42
(3)	0.543	3.4	3.417	4.8	2.8	0.63	0.85	0.88	69.98	40.19
(4)	0.521	3.5	3.515	4.8	2.8	0.63	0.85	0.88	69.98	41.88
(5)	0.501	3.6	3.614	4.8	2.8	0.63	0.85	0.88	69.98	43.52

由上表可知，当上游水深逐渐加大时，涵洞过流能力逐渐变大。

3.3 淹没压力流涵洞过流能力计算

已知涵洞横断面为矩形断面，共计1孔，单孔尺寸为 $4.8\text{m} \times 2.8\text{m}$ （宽 $\times$ 高），涵洞洞底纵坡为0.0008，下游出口水深 $h = 3.0\text{m}$ 。通过加大上游水深，计算涵洞淹没压力流时的过流能力。

根据取水输水建筑物丛书中《涵洞》，当出口下游水深 $h \geq D$ 时，无论上游水深为多少米，均为淹没压力流。淹没压力流涵洞的流量计算公式为：

$$Q = m_3 A \sqrt{2g(H_0 + iL - h)} \quad (3-15)$$

$$m_3 = \frac{1}{\sqrt{\sum \xi + \frac{2gL}{C^2 R}}} \quad (3-16)$$

$$\xi_4 = (1 - \frac{A}{A_T})^2 \quad (3-17)$$

式中： Q ——流量， m^3/s ；

m_3 ——流量系数；

A ——洞身断面面积， m^2 ；

H_0 ——包括行进流速水头在内的进口水深， m ；

i ——洞底纵坡， $i = 0.0008$ ；

L ——洞身长度， m ；

h ——为从出口洞底算起的下游出口水深， m ；

$\sum \xi$ ——局部水头损失系数总和，其中 $\xi_1 = 0.2$ 、 $\xi_5 = 0.2$ 、 $\xi_6 = 0.5$ ；

ξ_4 ——出口损失系数，经计算为0.39；

g ——重力加速度，取9.81。

分别假定不同上游水深进行过流计算，具体计算成果见下表。

表5 淹没压力流涵洞过流能力计算成果表

试算	流速 v	进口水深 H （试算）	H_0	B	D	m_3	R	C	h	Q
(1)	0.591	3.2	3.220	4.8	2.8	0.73	0.88	69.98	3.0	24.71
(2)	0.566	3.3	3.318	4.8	2.8	0.73	0.88	69.98	3.0	28.17
(3)	0.543	3.4	3.417	4.8	2.8	0.73	0.88	69.98	3.0	31.26

续表:

试算	流速 v	进口水深 H (试算)	H_0	B	D	m_3	R	C	h	Q
(4)	0.521	3.5	3.515	4.8	2.8	0.73	0.88	69.98	3.0	34.08
(5)	0.501	3.6	3.614	4.8	2.8	0.73	0.88	69.98	3.0	36.68

4 影响涵洞过流主要因素
当上游水深一定时,对于不同的流态,涵洞过流能力差别较大。通过以上计算,不同流态过流能力成果见下表。

表6 不同流态过流能力对比表

试算	进口水深 H (试算)	B	D	计算过流流量 Q (m ³ /s)			
				无压流	半压力流	非淹没压力流	淹没压力流
(1)	3.2	4.8	2.8	42.01	44.69	36.57	24.71
(2)	3.3	4.8	2.8	43.95	46.41	38.42	28.17
(3)	3.4	4.8	2.8	45.92	48.07	40.19	31.26
(4)	3.5	4.8	2.8	47.92	49.68	41.88	34.08
(5)	3.6	4.8	2.8	49.96	51.24	43.52	36.68

通过以上计算成果分析,对于涵洞不同的流态,过流能力影响较大。当上游水深一定,在上、下游水头差相差较小时,淹没压力流的过流能力仅为无压流时的60%左右;随着上、下游水头差加大,淹没压力流过流能力也变大,但是过流能力较其他三种流态仍偏小。

当涵洞尺寸一定不同流态时,影响涵洞过流的主要因素也不同,具体为:

(1) 无压流时:主要受涵洞上下游水深、洞底纵坡、洞身长度等影响,对于长洞与糙率的选取也有关系。由以上计算分析可知,上、下游水深是影响涵洞过流的主要因素,当上、下游水头差越大,涵洞过流能力越大,反之越小;下游水深对淹没系数影响较大,下游水深越大,淹没系数越小,为保证过流能力需要的上游水深越大。为保证稳定的无压流状态,设计时洞高的选取需要考虑洞内水面以上要有一定的净空面积及净空高度。

(2) 半压力流:主要受涵洞上游水深、洞底纵坡、洞身长度以及涵洞进口型式等影响。半压力流流态的过流能力虽在计算成果上比无压流过流能力强,但是在实际工程应用中接近于非淹没压力流,所以设计时很少考虑半压力流的流态。

(3) 非淹没压力流:主要受涵洞上游水深、洞底纵坡、洞身长度以及涵洞进口型式等影响。主要受上游水深影响较大,上游水深越大,过流能力越大,上游水深越小,能力越小。

(4) 淹没压力流:主要受涵洞上游水深、洞底纵坡、洞身长度、涵洞进口型式以及出口水深等影响。

主要受上游水深影响较大,上游水深越大,过流能力越大,上游水深越小,能力越小。由以上计算分析可知,上、下游水深是影响涵洞过流的主要因素,当上、下游水头差越大,涵洞过流能力越大,反之越小。

结论:涵洞在水利工程上属于较为常见的水工建筑物,在实际工程应用时,对于确定经济合理的洞身断面其计算过程是较为复杂的,从以上的设计过程不难看出,涵洞断面尺寸的确定需要考虑的因素角度较多,但影响最大的是上、下游水深,也就是水头差。对于顺河向涵洞受上、下游水深影响较大,如果上游水深确定小了需要的断面尺寸就要大,如果上游水深确定大了对上游水位壅高会很大,所以确定合理的水深需要根据上游河道整体水位的要求等多方面考虑才能确定。对于穿堤涵洞主要受出口水深的影响较大。

涵洞在水利工程设计中,需要根据已知条件,针对不同流态采用相应的计算公式,尤其无压流时还需要判定长短洞,为保证无压涵洞能在水位变化情况下,仍保持无压流状态,还要考虑洞内水面以上要有一定的净空面积及净空高度。

参考文献

[1]《涵洞》(取水输水建筑物丛书)(中国水利水电出版社)
[2]《水力计算手册》(中国水利水电出版社)
[3]《水工设计手册》(水利电力出版社)
[4]《水力学》(河海大学出版社)