

进口设置有压长洞的无压隧洞水力计算分析

艾 伟 姚骁鹏 陈晓芳

陕西省水工程勘察规划研究院 陕西 西安 710000

摘 要: 众多水库放水或泄洪建筑物往往采用进口设置有压长洞后接无压隧洞的布置型式, 该种布置型式的进口过流能力在淹没条件下多按照闸孔出流计算, 无压隧洞的过流能力多由水面线控制, 通过理论计算与水工模型试验对比确定建筑物过流能力的计算。

关键词: 泄洪洞; 有压长洞; 无压隧洞

中山川水库修建于1972年, 原泄洪洞采用进口设置有压长洞后接无压隧洞的布置型式, 泄洪洞竖井前压力洞长度为40m, 断面为城门洞型, 尺寸为3×3m, 竖井后接无压洞, 长度为150m, 断面为城门洞型, 尺寸为1.8×1.8m, 比降为1/200, 设计最大过水能力为32m³/s, 无压隧洞侧壁为料石砌筑, 洞顶为10cm厚钢筋砼+50cm厚素砼砌护, 塔内安装两扇平板钢闸门, 孔口尺寸为1.8×1.8m。由于工程修建较早, 除险加固阶段经复核在正常蓄水位闸门全开情况下, 其泄量远大于设计过流能力, 而闸后无压隧洞由于断面较小, 必然出现有压状态或者明满流交替现象, 对隧洞的安全造成威胁, 工程在除险加固阶段为解决该问题, 最终确定将闸门局开并将无压洞比降改为1/100, 给定局开最大高度位1.1m并通过水工模型进行验证(如下图1)。

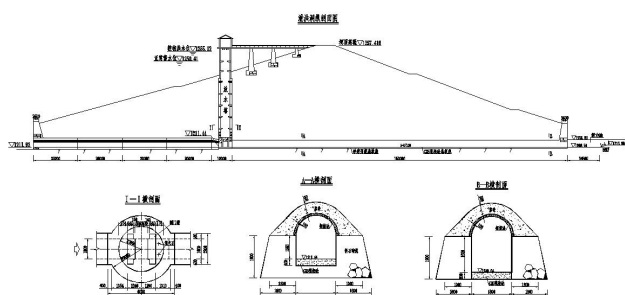


图1 泄洪洞纵横断面图

1 泄洪洞过流能力计算

泄洪洞的过流能力按照闸孔出流计算, 闸门处底板顶高程为1211.44m, 正常蓄水位为1250.41m, 一般计算公式如下:

$$Q = \sigma_s \mu \epsilon n b \sqrt{2g(H_0 - \epsilon e)} \quad \text{公式(1)}$$

式中: e —闸门开启高度, m; b —每孔净宽, m; 闸孔数; H_0 —包括行进流速水头的闸前水头; ϵ —垂直收缩系数; μ —闸孔自由出流流量系数, 它综合反映闸孔形状和闸门相对开度 e/H 对泄流量的影响; σ_s —淹没系数, 自由出流时为1.0。

式中关键参数为垂直收缩系数与流量系数, 本工程闸门为平板闸门, 垂直收缩系数 ϵ 取值见《水力计算手册(第二版)》表3-4-1^[1]。

表中 H 为闸门处底板顶以上水深, 在正常蓄水位时, 水头为38.97m, 当闸门全开时, 闸门相对开度为0.05, 在此水位下, 无论闸门开度为多少, e/H 均小于0.1, 则闸孔出流的流量系数 $\mu = \varphi \epsilon = 0.95 \times 0.615 = 0.584$, 在正常蓄水位情况下闸孔下泄流量为31.69m³/s, 具体计算见表1。

表1 闸孔出流公式计算下泄流量

上游水位 (m)	水头 (m)	闸门开度 e (m)	垂直收缩系数 ϵ	流速系数 φ	流量系数 μ	净宽 b (m)	下泄流量 Q (m ³ /s)
1250.41	38.97	1.10	0.615	0.95	0.584	1.80	31.69

根据《混凝土重力坝设计规范》中附录A关于孔口泄流能力计算的流量系数选取要求并结合工程布置可知, 本工程闸孔即属于长有压深孔, 即需要根据损失确定流量系数, 在《水力计算手册(第二版)》中“进口段设置有压短洞的无压泄流隧洞的水力计算”中有短洞有压段的流量系数计算公式, 具体公式请参见手册, 该流量系数计算公式即为考虑损失而得, 其中也有简化方法计算流量系数的公式 $\mu = \varphi \epsilon$, 其中流速系数一般取0.97, 按照深孔计算闸孔下泄流量, 收缩系数选自《水力计算手册(第二版)》表7-1-4中数据, 计算成果如下表:

表2 闸孔出流公式计算下泄流量(深孔计算)

水位 (m)	水头 (m)	闸门开度 e (m)	e/a	垂直收缩系数 ϵ	流量系数 μ	净宽 b (m)	下泄流量 Q (m ³ /s)
1250.41	38.97	1.10	0.61	0.663	0.643	1.80	34.86

通过表1与表2的计算可知，由于在收缩系数选取的结果如下：不同，同样的公式计算出来的结果不一样，故通过水工模型试对其进行验证。

$$\mu = \varphi \varepsilon = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + \sum \zeta_i \left(\frac{\omega_c}{\omega_i}\right)^2 + \frac{2g l_a}{C_a^2 R_a} \left(\frac{\omega_c}{\omega_a}\right)^2}}$$

按照深孔计算闸孔下泄流量，流量系数计算公式参照“短洞有压段的流量系数计算公式”，公式与计算成

表3 闸孔出流公式计算下泄流量（深孔计算）

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
管段	ω_i	$\frac{\omega_c}{\omega_i}$	ζ_i	$\zeta_i \left(\frac{\omega_c}{\omega_i}\right)^2$	l_i	R_i	$C_i = \frac{1}{n} R_i^{1/6}$	$\frac{2gl_i}{C_i^2 R_i}$	$\frac{2gl_i}{C_i^2 R_i} \left(\frac{\omega_c}{\omega_i}\right)^2$
有压段	8.034	0.163	0.250	0.007	80.000	1.250	69.193	0.262	0.007
闸室段	3.240	0.405	0.200	0.033	10.000	0.450	58.359	0.128	0.021

表3按照有压长洞考虑水头损失情况下开度为1.1m时 为接近。计算所得流量系数为0.642，该值与表2中的流量系数值较

表4 按照深孔计算闸孔出流与水工模型试验对比表（开度1.1m）

水位 (m)	水头 (m)	闸门开度 e (m)	垂直收缩系数 ε	流量系数 μ	计算下泄流量 Q_1 (m ³ /s)	试验下泄流量 Q_2 (m ³ /s)	$Q_1 - Q_2$
1243.24	31.80	1.10	0.663	0.643	31.42	33.97	-2.55
1250.06	38.62	1.10	0.663	0.643	34.70	37.78	-3.08
1255.20	43.76	1.10	0.663	0.643	36.98	40.19	-3.21

通过对比可知，相同开度下，试验所得泄流量略大于按深孔计算的泄流量。

2 无压洞内水深计算

(1) 判定无压洞水面线型式

本次选取泄洪洞前最高水位1255.12m时闸门开度1.1m的下泄流量计算水面线，按照深孔计算下泄流量为 $Q = 36.95\text{m}^3/\text{s}$ ，以此流量计算水面线，通过计算正常水深 h_0 ，临界水深 h_k 和临界比降 i_k 判定水面线型式^[2]。

正常水深按照明渠均匀流公式计算，底宽 = 1.8m，

糙率取0.015，计算正常水深 $h_0 = 3.81\text{m}$ ；临界水深按照矩形断面公式进行计算，经计算临界水深 $h_k = 3.62\text{m}$ ；计算临界比降 $i_k = 0.012$ ，现状无压洞比降为 $i = 0.01$ 。通过各计算参数可知，闸后水面线为缓坡上的 C_1 型壅水曲线。

(2) 水面线计算

本次采用能量方程推求水面线，采用《水利水电程序集》中的“D-7渠道水力学及曲线计算”模块进行计算，其中糙率 $n = 0.015$ ，共分为5段进行计算，起始水深采用闸后收缩水深 $h_c = 0.663 \times 1.1 = 0.73\text{m}$ ，计算结果如表5。

表5 无压隧洞水面线计算成果表（水位1255.12，开度1.1m）

分段	水深 h (m)	正常水深 h_0 (m)	临界水深 h_k (m)	流速 v (m/s)	分段长 dL (m)	累计长 L (m)
0	0.73	3.806	3.612	28.12	0	0
1	0.881	3.806	3.612	23.312	30	30
2	1.039	3.806	3.612	19.754	30	60
3	1.206	3.806	3.612	17.028	30	90
4	1.382	3.806	3.612	14.852	30	120
5	1.567	3.806	3.612	13.097	30	150

表6 水工模型试验无压隧洞水面线成果表（水位1255.12，开度1.1m）

桩号	右侧水深 (m)	左侧水深 (m)	桩号	右侧水深 (m)	左侧水深 (m)
0+000.00	1.15	0.99	0+069.69	1.29	1.29
0+001.49	1.61	1.61	0+079.69	1.33	1.33
0+003.59	1.75	1.61	0+089.70	1.33	1.33
0+005.69	1.73	1.59	0+099.70	1.33	1.36

续表:

桩号	右侧水深 (m)	左侧水深 (m)	桩号	右侧水深 (m)	左侧水深 (m)
0+007.79	1.61	1.54	0+109.70	1.40	1.40
0+009.89	1.5	1.29	0+119.71	1.40	1.40
0+019.78	1.17	1.15	0+129.71	1.40	1.40
0+029.78	1.29	1.29	0+139.72	1.43	1.43
0+039.79	1.24	1.24	0+150.00	1.38	1.45
0+059.68	1.27	1.27			

经模型所得隧洞出口水深为1.45m, 小于理论计算值1.567m, 隧洞出口断面直墙高度为1.6m, 根据《水工隧洞设计规范》(SL279-2016)的规定, 洞内水面线以上空间不宜小于隧洞断面面积的15%, 高度不应小于0.4m, 故可知无压隧洞改造满足规范要求。

根据水工模型试验, 当闸门开度小于1.4m时, 闸后均为明流, 但闸门开度在0.1m~1.3m范围内, 在闸后产生一个水翅, 直冲洞顶, 通气孔仍通气。通过模型可知水翅长度在11.96m~16.1m范围内, 当闸门开度在1.4~1.6m时, 闸后出现明满流交替通气孔的通气量减小; 闸后出现明满流交替, 闸门开度在1.6m~1.8m时, 闸后为压力流, 通气孔内有水。由试验可知, 虽然无压隧洞最大断面满足要求, 但无压隧洞内的闸后水深并未如理论计算从收缩水深开始逐渐增加, 而是存在一个水翅, 之后才出现水深增加的情况^[3]。



图2 开度为1.1m闸后水流流态



图3 开度为1.8m闸后水流流态

3 结语

(1) 通过以上计算与分析, 类如本工程布置的深孔泄流量计算时收缩系数可采用《水力计算手册(第二版)》表7-1-4中数据, 当进口为有压长洞时仍可按该表中的数值选取或采用考虑水头损失的方法直接计算流量系数。

(2) 当闸门开度较大时, 闸后段水深计算并不是从收缩水深逐渐增加至最大水深的情况, 而是存在一个闸后水翅, 然后水深才会逐渐增加, 故在设计时对水翅段结构应加强设计。

希望通过此工程实例, 为其他工作者在遇到此类工程情形提供参考与帮助。

参考文献:

- [1]李炜 水力计算手册(第二版)[M]北京: 中国水利水电出版社.2006
- [2]吴持恭 水力学(第三版)[M]北京: 高等教育出版社.2003.11
- [3]子长县中山川水库除险加固工程旧洞改造水工模型试验报告[M]西安西安理工大学水力学研究所.2004