

尾矿库排水系统泄流能力计算分析

曹喜

(新疆兵团勘测设计院(集团)有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 近些年来, 随着我国尾矿库数量规模的逐渐增大, 其运行安全问题日益突出, 其中排水系统的泄流能力不足或长久失修致使排洪系统失效是引起尾矿库安全事故的主要原因之一。文中分别采用经验公式法和数值模拟方法对尾矿库排洪能力进行了计算分析, 得出了不同库水位条件下排洪系统工作状态及设计泄流能力, 为工程设计提供理论依据。

关键词: 尾矿库; 排洪系统; 泄流能力; 经验公式; 数值模拟

中图分类号: TV873

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0104-03

一、前言

尾矿库是堆放尾矿砂的场所, 是一个具有高势能的人造泥石流危险源。我国现有尾矿库 8,869 座, 其中四等以上的大型尾矿库 3,300 余座^[1]。当遇到特大暴雨、地震, 或者尾矿库区自身的排洪系统出现故障等情况时, 尾矿坝发生溃坝的风险较高^[2]。溃坝一旦发生, 尾矿库内的尾砂和水混合成尾砂浆以高动能和高势能冲出溃口, 常常对下游居民的人身及财产安全造成巨大的威胁, 并严重破坏生态环境。文献对国内 80 余个尾矿库已发生的事故进行统计分析表明^[3], 导致事故发生最常见原因是由于其排水系统的泄流能力不足或长久失修致使排洪系统失效, 进而导致无法及时排出库内洪水。由此可见, 引发尾矿库安全事故的最主要因素是排洪系统能力不足, 故尾矿库排水井及排水隧洞排洪能力的有效评估是坝体安全的重要保证。

国内许多学者分别结合模型试验与数值模拟结果对尾矿库排水井及排水隧洞排洪能力开展了较多研究, 如: 易聪基于 FLOW-3D 仿真软件分别对窗口式、框架式以及斜槽式排洪系统进行了数值模拟研究, 探讨了不同库水位条件下各种排洪系统的泄流量变化, 并将数值模拟结果与经验公式进行了对比分析^[4]; 周国坚以贵溪银矿尾矿库为研究对象, 通过改变泄洪竖井的结构分析了泄流能力以及真空度等指标, 指出通过适当改变泄洪竖井结构可有效提高泄洪竖井的泄流效果^[5]; 党宁则以陕西省大西沟尾矿库为依托, 针对其排水井泄洪系统开展了模型试验研究, 分析了排水井进流部位及进流结构的变化对泄流流态、流量以及通风量等参数特性的影响规律, 为工程设计提供可理论参考^[6]。

文中以某尾矿库为例, 分别采用经验公式法与数值计算法对排水井及排水隧洞排洪能力进行估算, 论证排水系统的有效性, 为工程设计及应用提供技术保障。

二、经验公式法

应用《尾矿坝设计手册》中的“尾矿库排洪系统设计”相关计算公式进行计算, 具体公式如表 1 所示。

表 1 井—管式排水系统泄流量计算公式

工作状态	计算公式
自由泄流	$Q_1 = n_e m \epsilon b \sqrt{2gH_j^{1.5}}$ $Q_2 = 1.8n_e \epsilon b H_0^{1.5} + 2.7n_e \omega_e \sum \sqrt{H_i}$
半压力流	$Q_3 = \varphi \omega_e \sqrt{2gH_j}, \quad \varphi = (1 + \zeta_4 + \zeta_5 f_6^2)^{-0.5}$ $Q_4 = \varphi F_s \sqrt{2gH}$ $\varphi = (1 + \lambda_j d^{-1} f_2^2 + \zeta_2 + \zeta_3 f_3^2 + \zeta_4 f_4^2 + \zeta_5 f_5^2)^{-0.5}$ $Q_5 = \mu F_s \sqrt{2gH_z}$
压力流	$\mu = \left(1 + \sum \lambda_e L / D f_3^2 + \sum \zeta f_3^2 + \zeta_2 f_9^2 + \zeta_3 f_3^2 + \zeta_4 f_5^2 + \zeta_5 f_8^2 \right)^{-0.5}$

注: 表中各符号说明详见《尾矿坝设计手册》。

鉴于上述理论计算公式中涉及参数较多, 而参数取值的差异对系统排水能力影响明显, 因此需要对其取值恰当选取。自由泄流状态下: 排水竖井井架边缘头部形状为矩形, 系数 ξ_0 取 0.8, 流量系数 m 取按薄壁堰考虑, 取值 0.41, 排水井进口局部水头损失系数 ξ_4 取值 0.5, 梁、柱(矩形断面)形状系数 β 取值 2.42, 梁有效断面系数 k_1 取 0.09, 柱有效断面系数 k_1 取 0.45, 框架局部水头损失系数 ξ_5 取值 1.43。半压力流状态下: 隧洞入口直角, 局部水头损失系数 ξ_2 取 0.5, 排水井中水流转向 90° , 局部水头损失系数取 1.1, 排水井的摩擦损失很小, 忽略不计, 隧洞入口断面突然收缩系数 ϵ_6 取 0.63。压力流状态下: 隧洞糙率系数 n 取值 0.013, 谢才系数 C 取值 70.43, 隧洞沿程水头损失系数 0.0158。

依据上述计算公式、参数取值, 对排水系统在三种工作状态下的排水能力进行了理论计算, 计算结果见表 2~表 5。由计算结果可见, 随着库水位的升高, 各条件下泄流量均逐渐增加, 增加速率随着条件的不同有所差异。在自由泄流条件下, 排水系统泄流能力最大, 库水位为 754.5m 时, 泄流

收稿日期: 2022-02-16

作者简介: 曹喜(1990-), 男, 新疆兵团勘测设计院(集团)有限责任公司, 工程师。

能力最大达到 159.06m³/s。而对于孔口泄流、半压力流以及压力流条件, 孔口泄流能力>压力流泄流能力>半压力流泄流能力, 当库水位为 759.0m 时, 最大泄流量分别为 87.49、59.02 和 38.79m³/s。

表 2 不同库水位时的自由泄流量计算表

	749.00	749.50	750.00	750.50	751.00	751.50
H _i	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
H _i ^{1.5}	-	0.35	1.00	1.84	2.83	3.95
m	-	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
b _c	-	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69
1-0.09448H _i	-	0.95	0.91	0.86	0.81	0.76
Q _i	0	6.22	16.71	29.10	42.34	55.74
	752.00	752.50	753.0	753.50	754.00	754.50
H ₀	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
H ₀ ^{1.5}	-	0.35	1.00	1.84	2.83	3.95
H ₀ ^{2.5}	-	0.18	1	2.76	5.66	9.88
6.98 H ₀ ^{1.5} -1.73 H ₀ ^{2.5}	-	2.16	5.26	8.07	9.98	10.53
H _i ^{0.5}	1.30	1.47	1.64	1.78	1.92	2.04
Σ H ^{0.5}	1.30	1.47	1.64	1.78	1.92	2.04
72.69 Σ H ^{0.5}	94.08	107.20	118.89	129.52	139.35	148.53
Q	94.08	109.37	124.14	137.59	149.33	159.06

表 3 不同库水位时的孔口泄流量计算表

	H _i	H _i ^{0.5}	34 H _i ^{0.5}	ω _i ²	1.5+84.08/ω _i ²	Q
749.00	0	-	-	-	-	0
749.50	0.50	0.71	24.04	25.81	4.76	11.02
750.00	1.00	1.00	34.00	103.22	2.31	22.35
751.00	2.00	1.41	48.08	412.89	1.70	36.84
752.00	3.00	1.73	58.89	724.62	1.62	46.32
753.00	4.00	2.00	68.00	1374.68	1.56	54.42
754.00	5.00	2.24	76.03	2231.12	1.54	61.31
755.00	6.00	2.45	83.28	2898.47	1.53	67.35
756.00	7.00	2.65	89.96	4095.41	1.52	72.95
757.00	8.00	2.83	96.17	5498.73	1.52	78.12
758.00	9.00	3.00	102.00	6521.55	1.51	82.93
759.00	10.00	3.16	107.52	8265.37	1.51	87.49

表 4 不同库水位时的半压力流泄流量计算表

	H	H ^{0.5}	13.23H ^{0.5}	ω _i ²	1.65+12.74/ω _i ²	Q
749.50	3.10	1.76	24.76	25.81	2.15	16.89
750.00	3.60	1.90	26.68	103.22	1.78	20.01
751.00	4.60	2.14	30.16	412.89	1.68	23.23
752.00	5.60	2.37	33.27	724.62	1.67	25.74
753.00	6.60	2.57	36.12	1374.68	1.66	28.01
754.00	7.60	2.76	38.76	2231.12	1.66	30.09
755.00	8.60	2.93	41.23	2898.47	1.66	32.02
756.00	9.60	3.10	43.57	4095.41	1.66	33.84
757.00	10.60	3.26	45.78	5498.73	1.66	35.57
758.00	11.60	3.41	47.89	6521.55	1.66	37.21
759.00	12.60	3.55	49.91	8265.37	1.66	38.79

表 5 不同库水位时的压力流泄流量计算表

	H _i	H _i ^{0.5}	22.06 H _i ^{0.5}	ω _i ²	7.26+35.40/ω _i ²	Q
749.50	42.49	6.52	143.80	25.81	8.63	48.95
750.00	42.99	6.56	144.64	103.22	7.60	52.46

续表 5

	H _i	H _i ^{0.5}	22.06 H _i ^{0.5}	ω _i ²	7.26+35.40/ω _i ²	Q
751.00	43.99	6.63	146.31	412.89	7.35	53.99
752.00	44.99	6.71	147.97	724.62	7.31	54.73
753.00	45.99	6.78	149.60	1374.68	7.29	55.43
754.00	46.99	6.85	151.22	2231.12	7.28	56.06
755.00	47.99	6.93	152.82	2898.47	7.27	56.67
756.00	48.99	7.00	154.40	4095.41	7.27	57.27
757.00	49.99	7.07	155.97	5498.73	7.27	57.86
758.00	50.99	7.14	157.52	6521.55	7.26	58.44
759.00	51.99	7.21	159.06	8265.37	7.26	59.02

表 2~表 5 为排洪系统不同工作状态下采用经验公式计算的泄流流量结果。由于在设计初期没有具体的判断依据可以划分排洪系统的工作状态, 亦无法具体列出不同泄流工作状态时其对应的库水位高程, 因此, 在计算泄流量时将不同库水位的各种泄流工作状态均进行了泄流量计算。计算完泄流量后, 每个库水位条件下设计泄流量的取值根据不同泄流工作状态下的最小泄流量为依据, 本工程结果如表 6 所示。根据计算结果可知, 库水位由 749.00m 上升至 750.2m, 排洪能力自 0.00m³/s 增加到 21.00m³/s, 在这一过程中整个排洪系统处于自由泄流工作状态, 随着库水位自 750.20m 继续升高, 系统工作状态由自由泄流过渡为半压力流状态, 但在此状态下系统由于受到隧洞进口的泄流能力限制, 隧洞中保持为明流。

表 6 不同库水库设计泄流量

水库 水位	749.5	750.0	751.0	752.0	753.0	754.0	755.0	756.0	757.0	758.0	759.0
泄流 流量 (m ³ /s)	6.22	16.71	23.23	25.74	28.01	30.09	32.02	33.84	35.57	37.21	38.79

三、数值模拟计算

1. 基本方程

考虑是不可压缩水流流动问题, 文中采用 κ-ε 双方程紊流模型开展三维数值模拟研究。自由水面采用 Hirt 等(1981)提出的 VOF (volume of fluid) 自由表面追踪模型。模型中引入体积分数量变量 $F(x, y, t)$, 通过计算控制体积内流体体积占整个控制体积的百分比来确定水气交界面。在计算过程中, 在一个控制体内将会出现以下三种情况: 当 $F=0$ 时, 表示控制体内无水体相; 当 $F=1$ 时, 表示控制体内充满水体相; 当 $0 < F < 1$ 时, 表示控制体内包含水气界面。

同时, 体积分数量满足控制方程:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

2. 定解条件

上游进口采用水位边界, 下游出口采用自由出流边界, 壁面采用 Launder & Spalding 的壁面函数条件, 进出口的紊动能 k 和耗散率 ε 由下列经验公式得出:

$$K=0.00375u^2; \varepsilon=K^{3/2}/0.4L \tag{2}$$

式中, L 为紊流特征长度, 糙率 n 取 0.013。

3. 计算区域及网格划分

在泄流状态下，系统排洪能力主要取决于隧洞进口的泄流能力。因此，数学模型三维计算区域包括进水口水域，排水井，泄洪洞，计算区域采用四面体进行网格划分。为提高计算效率，忽略模型中圈梁和加固柱的影响，如图 1 所示，计算区域为 748m×115m×50m，计算网格数为 229,861 个。

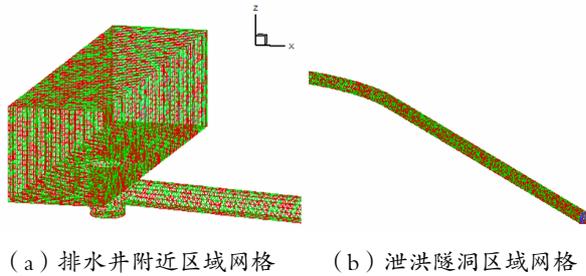


图 1 模型网格划分

溢流水位从 749.50m 计算到 759.00m，计算水位步长为 1.0m，模拟计算溢流水深从 0.5~10.0m 的各阶段排洪能力。

4. 数值模拟结果与分析

依据上述计算方程和参数，采用 CFD (Computational fluid Dynamics-计算流体力学) 程序对排水系统的排水能力进行了模拟计算，计算结果见表 7。限于篇幅，部分库水位工况下排洪系统内流速分布云图如图 2 所示。

表 7 不同库水位时的泄流量模拟计算结果

水库水位	749.5	750.0	751.0	752.0	753.0	754.0	755.0	756.0	757.0	758.0	759.0
泄流量 (m³/s)	6.23	16.64	23.23	25.69	28.75	29.95	31.98	33.96	35.46	37.73	38.94
最大流速 (m/s)	6.16	6.83	7.88	7.83	8.19	8.15	8.59	8.99	9.37	9.93	10.07

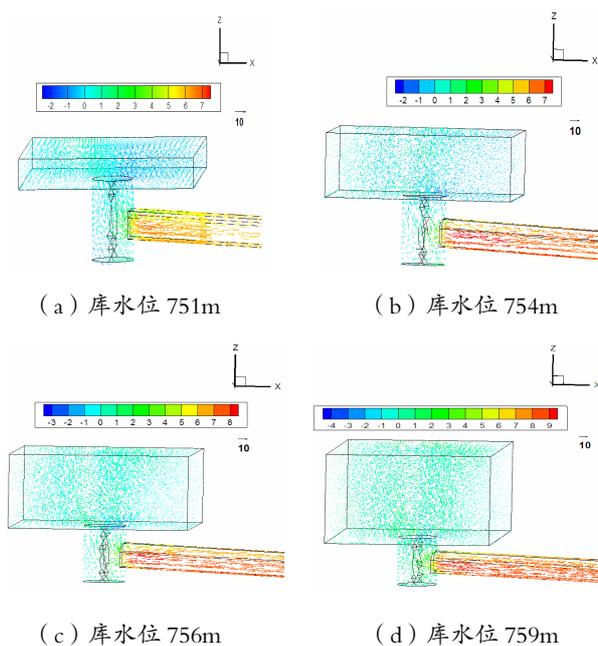


图 2 不同库水位条件下排水井附近区域流速矢量图

由图 2 可以看出，受隧洞进口的泄流能力限制，隧洞为明流，整个系统处于半压力流工作状态，且随着溢流水头越大，隧洞内流速越大，隧洞内最大流速由低水位的 6.16m/s 逐渐增大至高水位条件下的 10.07m/s，增幅达到 64%。此外，泄流流量由 6.23m³/s，逐渐增大至 38.94m³/s，泄流能力明显增加。竖井与涵洞连接部位局部流速较大，分析原因主要是由于连接段突然收缩，有效过水断面较小所致。其中当溢流水深为 0.5m 时，系统排洪能力明显下降，分析原因是当溢流水深为 0.5m 时竖井处将出现吸气漩涡，入口水流极不稳定，影响入口水流的有效过水断面面积。对比分析理论计算结果与数值模拟结果，如图 3 所示，可以看出：CFD 数值模拟计算结果与经验公式计算结果泄流量随水位变化趋势大致相同，且不同库水位条件下泄流量基本一致，最大误差仅为 1.4%。由此可见，文中计算方法准确，计算结果可信。

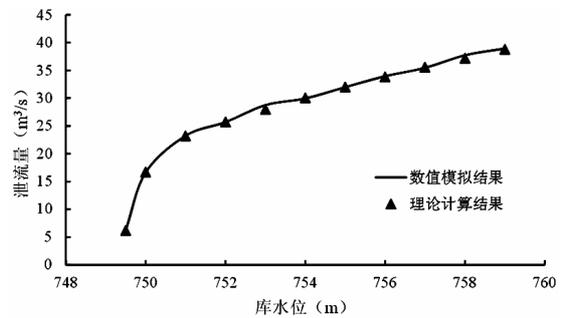


图 3 数值模拟结果与理论计算结果对比

四、结论

文中分别采用经验公式法和三维数值模拟计算方法对尾矿库排洪系统泄流能力进行了计算分析，得到如下结论：

- (1) 库水位在 749.5~759.0m 工作时，经验公式法计算得出的设计泄流能力为 6.22~38.79m³/s，三维数值模拟计算方法得出的泄流能力为 6.23~38.94m³/s，最大误差为 1.4%。
- (2) 当库水位为 749.5m 时，系统排洪能力明显下降，分析原因是竖井处将出现吸气漩涡，入口水流极不稳定，影响入口水流的有效过水断面面积。
- (3) 库水位大于 749.5m 时，系统泄流能力规律性较好，溢流水深越大，系统泄流量越大。

参考文献

[1] 王子龙. 尾矿库排水系统水工模型试验及数值模拟[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.

[2] 陈立德, 李廷生, 陈清波. 矿山排水井水力设计中的若干问题的讨论[J]. 华东水利学院学报, 1986, 14(1): 79-86.

[3] 徐宏达. 我国尾矿库病害事故统计分析[J]. 工业建筑, 2001, 1: 69-71.

[4] 易聪. 尾矿库排洪系统水力特性数值模拟研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.

[5] 周国坚. 尾矿库泄洪竖井结构对泄洪效果的影响[J]. 江西工业大学学报, 1992, 14(1): 107-110.

[6] 党宁. 尾矿库排水井泄洪系统体型优化试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.