

鲁志航, 彭越尧, 伍鹤皋, 等. 埋藏式压力钢管加劲环抗外压稳定计算方法的比较与应用[J]. 水利水电技术, 2020, 51(7): 46-52.

LU Zhihang, PENG Yueyao, WU Hegao, et al. Comparison and application of calculation method for stability against external pressure of stiffening ring for embedded steel penstock [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(7): 46-52.

埋藏式压力钢管加劲环抗外压稳定 计算方法的比较与应用

鲁志航¹, 彭越尧², 伍鹤皋¹, 石长征¹

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: 对埋藏式压力钢管加劲环的抗外压稳定分析, 国内外常用的计算方法有 Amstutz 法、Jacobsen 法和《水电站压力钢管设计规范》(NB/T 35056—2015) (以下简称《规范》) 中的强度公式。对这三种计算方法进行了比较分析, 得到以下结论: Amstutz 公式和 Jacobsen 公式计算的临界外压力随缝隙值的增大而减小, 《规范》强度公式没有考虑缝隙值的影响, 其计算得到的临界外压力与缝隙值无关; 三种方法计算所得的临界外压力均随加劲环高度、管壁厚度和钢材屈服强度的增大而增大, 随加劲环间距的增大而减小。《规范》强度公式计算所得的加劲环临界外压力相对 Amstutz 公式和 Jacobsen 公式较小, 采用《规范》强度公式在外水头小于 130 m 时明显偏保守, 经过比较分析后, 建议将 Jacobsen 法作为国内钢管设计规范中埋藏式压力钢管加劲环抗外压稳定的主要计算方法之一。

关键词: 埋藏式压力钢管; 加劲环; 抗外压稳定; 计算方法; 临界外压力

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.07.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TV732.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)07-0046-07



Comparison and application of calculation method for stability against external pressure of stiffening ring for embedded steel penstock

LU Zhihang¹, PENG Yueyao², WU Hegao¹, SHI Changzheng¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China; 2. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, Hunan, China)

Abstract: For the analysis of the stability against external pressure of the stiffening ring for the embedded steel penstock, the commonly used calculation methods at home and abroad include Amstutz method, Jacobsen method and the strength formula specified in the “Design Code for Steel Penstocks of Hydroelectric Stations” (NB/T 35056—2015) (hereinafter referred to as the code). The three calculation methods are comparatively analyzed herein, and then the conclusion is obtained as the follows: the critical external pressures calculated by both Amstutz formula and Jacobsen formula are decreased along with the increase of the value of gap, however, the influence from the value of gap is not considered in the strength formula specified in the code, from

收稿日期: 2019-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51409194)

作者简介: 鲁志航(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水电站压力管道与地下工程。Email: 2397887237@qq.com

通信作者: 伍鹤皋(1964—), 男, 教授, 博士, 研究方向为水电站压力管道与地下工程。Email: wbf1988@vip.sina.com

which the critical external pressure obtained from the calculation is not related to the value of gap. All the critical external pressures obtained from the three calculation methods are increased along with the increases of the height of stiffening ring, the thickness of pipe-wall and the yielding strength of the steel material and are decreased along with the increase of the spacing among the stiffening rings. The critical external pressure of the stiffening ring obtained from the calculation made by the strength formula specified in the code is less than those obtained from both Amstutz formula and Jacobsen formula, and then the adoption of the strength formula specified in the code is obviously more conservative when the external water head is less than 130 m. Through the relevant comparative analysis, it is suggested to take Jacobsen method as one of the main methods for the calculation of the stability against external pressure of the stiffening ring for the embedded steel penstock specified in the relevant steel penstock design code in China.

Keywords: embedded steel penstock; stiffening ring; stability against external pressure; calculation method; critical external pressure

0 引言

随着水电建设事业的高速发展,压力钢管 HD 值越来越大,因此,埋藏式压力钢管出现了新的设计趋向:一是希望围岩能分担更多的内水压力;二是使用高强钢。这种设计趋向导致钢管的厚度有所减薄,但也降低了钢管的抗外压能力,使得埋藏式加劲环钢管的抗外压稳定问题更加突出^[1]。埋藏式加劲环钢管需同时满足加劲环间管壁的稳定和加劲环本身的稳定^[2]。对于加劲环间管壁的抗外压稳定分析,国内外规范一般都推荐采用 Mises 公式^[3]。而对于加劲环的稳定分析,有很多学者提出了各自的计算理论和方法,概括起来有 Amstutz 法^[4]、Jacobsen 法^[5]、Svoisky 法^[6]、《水电站压力钢管设计规范》(NB/T 35056—2015)^[7]中的强度公式、半解析有限元法^[8]等。

由于 Svoisky 法没有考虑加劲环承担等效翼缘以外管壁上的外压力,导致计算所得的临界外压力偏高^[9];半解析有限元法有待进一步研究和推广,且推广应用起来比较麻烦^[10]。因此目前国外钢管设计规范^[11-12]一般采用 Amstutz 法和 Jacobsen 法,而国内规范《水电站压力钢管设计规范》(NB/T 35056—2015)中采用强度公式作为加劲环的临界外压力计算公式。由于上述三种方法的基本假定和简化方法各不相同,因此计算结果也有较大差异,下面将对这三种方法进行比较研究。

1 埋管加劲环临界外压计算方法介绍

1.1 Amstutz 公式

对于埋藏式压力钢管加劲环的临界外压力,Amstutz 采用与其埋藏式光面管临界外压力相同的计算公式,只是公式中断面特性 J 、 i 及 e 应取加劲环与其联合作用的管壁断面来计算(管壁断面的宽度可取 $30t$, t 为管壁厚度), F 取加劲环间全部管壁和加劲

环断面面积之和。具体计算公式如下

$$\frac{\sigma_N - \sigma_V}{\sigma_F - \sigma_N} \left[\left(\frac{r}{i} \right) \sqrt{(\sigma_N / E)} \right]^3 = 1.73 \left(\frac{r}{e} \right) \left[1 - 0.225 \left(\frac{r}{e} \right) \frac{\sigma_F - \sigma_N}{E} \right] \quad (1)$$

$$p_{cr} = \frac{F \sigma_N}{rL} \left[1 - 0.75 \left(\frac{r}{E} \right) \frac{\sigma_F - \sigma_N}{E} \right] \quad (2)$$

式中, p_{cr} 为加劲环的临界外压力(MPa); σ_F 为钢材的屈服强度(MPa); σ_V 为灌浆时对管壁的环向压应力(MPa),当钢管与外围混凝土存在初始缝隙 Δ 时, σ_V 相当于 $(-E\Delta/r)$; σ_N 为加劲环失稳时的环向应力(MPa); r 为钢管管壁的内半径(mm); F 为加劲环及加劲环之间管壁的总截面积(mm^2); e 为截面中和轴至加劲环外缘的距离(mm); i 为加劲环有效截面的惯性半径,有 $i = \sqrt{J/F}$ (mm); J 为加劲环有效截面(包括 $30t$ 的等效翼缘, t 为管壁厚度)的惯性矩(mm^4); E 为钢材的弹性模量(MPa); L 为加劲环的间距(mm)。

由式(1)迭代可求得加劲环失稳时的环向应力 σ_N ,再根据式(2)计算即可得加劲环的临界外压力。

1.2 Jacobsen 公式

Jacobsen 法的基本假定与 Amstutz 法相同,但它针对 Amstutz 法中存在的一些问题(如简化方法的精度和适用范围问题、管壁的等效翼缘宽度的取值问题等)做了优化和修正^[13]。Amstutz 法中管壁的等效翼缘宽度取 $30t$, Jacobsen 法取为通常采用的 $1.556\sqrt{rt}$ 。由于 Amstutz 法将某些变量假定为常数,其适用性受到一定的限制;而 Jacobsen 法没有这些简化,适用范围较广。Jacobsen 法的具体计算公式如下

$$\frac{r}{\sqrt{12J/F}} = \sqrt{\frac{\left[\frac{9\pi^2}{4\beta^2} - 1 \right] \left[\pi - \alpha + \beta \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \right)^2 \right]}{12 \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \right)^3 \left[\alpha - \frac{\pi\Delta}{r} - \beta \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \right) \left[1 + \tan^2 \left(\frac{\alpha - \beta}{4} \right) \right] \right]}} \quad (3)$$

$$\frac{P}{EF\sqrt{12J}} = \frac{\left(\frac{9\pi^2}{4\beta^2} - 1\right) \left(\frac{J}{F}\right) \sqrt{\frac{12J}{F}} \sin^3\beta}{r^3 \sin^3\alpha} \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_y}{E} = \frac{h}{r} \left(1 - \frac{\sin\beta}{\sin\alpha}\right) + \frac{pr\sin\alpha}{EF\sin\beta} \left[1 + \frac{8\beta h r \sin\alpha \tan(\alpha - \beta)}{\pi \left(\frac{12J}{F}\right) \sin\beta}\right] \quad (5)$$

$$p_{cr} = \frac{P}{L} \quad (6)$$

式中, p_{cr} 为加劲环的临界外压力(MPa); α 为加劲环失稳时单个鼓包对应的圆心角(弧度); β 为加劲环失稳时鼓包弯曲中心线对应的圆心角(弧度); P 为加劲环失稳时在加劲环间沿管周的线荷载(N/mm); σ_y 为钢材的屈服强度(MPa); E 为钢材的弹性模量(MPa); J 为加劲环有效截面(包括 $1.556\sqrt{rt}$ 的等效翼缘)的惯性矩(mm^4); F 为加劲环及加劲环之间管壁的总截面积(mm^2); Δ 为钢管与混凝土之间的缝隙值(mm); r 为钢管中心至中和轴的半径(mm); h 为截面中和轴至加劲环外缘的距离(mm); L 为加劲环的间距(mm)。

式(3)一式(5)中有3个未知量 α 、 β 、 P , 其余的参数均为已知量, 通过迭代求解即可求得 P , 再根据式(6)即可计算得到加劲环的临界外压力。

1.3 《规范》强度公式

我国的《水电站压力钢管设计规范》(NB/T 35056—2015)采用强度条件估算加劲环的稳定, 其临界外压力的计算公式如下

$$p_{cr} = \frac{R_e A_R}{rL} \quad (7)$$

$$A_R = ha + t(a + 1.56\sqrt{rt}) \quad (8)$$

式中, p_{cr} 为加劲环的临界外压力(MPa); R_e 为钢材屈服强度(MPa); A_R 为加劲环的有效截面面积(mm^2); r 为钢管内半径(mm); L 为加劲环间距(mm); h 为加劲环高度(mm); a 为加劲环厚度(mm); t 为钢管管壁厚度(mm)。

2 加劲环临界外压力影响因素分析

为了比较 Amstutz 公式、Jacobsen 公式、《规范》强度公式的计算结果, 本文以某压力钢管的基本参数为基准, 即钢材种类为 Q345, 屈服强度 345 MPa, 钢管内半径 3 400 mm, 管壁计算厚度 30 mm, 钢管与混凝土之间的缝隙值 1.7 mm, 加劲环的高度 150 mm, 厚度 30 mm, 间距 2 000 mm。然后选取了如下几个影响变量: 缝隙值 Δ 、加劲环高度 h 、加劲环间距 L 、管壁厚度 t 、钢材屈服强度 σ , 分析 Amstutz 公式、Jacobsen 公式、《规范》强度公式的临界外压力变化

规律和差异。

2.1 加劲环临界外压力与缝隙值的关系

选取不同缝隙值: $\Delta/r = (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30) \times 10^{-4}$, 亦即 $\Delta = 0, 1.7, 3.4, 5.1, 6.8, 8.5, 10.2$ mm, 其他参数均同上述钢管基本参数, 分别采用 Amstutz 公式、Jacobsen 公式、《规范》强度公式计算得到的加劲环临界外压力如表 1 所列, 并将计算得到的临界外压力绘制成曲线如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 由 Amstutz 公式和 Jacobsen 公式计算所得的临界外压力随缝隙值的增大而减小, 而由《规范》强度公式计算所得的临界外压力与缝隙值无关, 说明《规范》强度公式没有考虑缝隙值的影响。工程实践表明, 在正常浇筑和灌浆情况下, 缝隙值 Δ/r 一般在 $(3.5 \sim 6) \times 10^{-4}$ 之间, 在此范围内 Jacobsen 公式和 Amstutz 公式比《规范》强度公式计算结果分别提高 25% 和 13% 左右, 且缝隙值越小, 提高程度越大。

表 1 加劲环临界外压力与缝隙值的关系

缝隙值 Δ/mm	0	1.7	3.4	5.1	6.8	8.5	10.2	
缝隙值与半径之比 $\frac{\Delta}{r}/10^{-4}$	0	5	10	15	20	25	30	
加劲环临界外压力 /MPa	Amstutz 公式(A)	1.405	1.159	0.988	0.864	0.771	0.699	0.641
	Jacobsen 公式(J)	1.517	1.280	1.113	0.991	0.898	0.825	0.768
	《规范》强度公式 Code(C)	1.027	1.027	1.027	1.027	1.027	1.027	1.027
$\frac{A-C}{C}/\%$	36.81	12.85	-3.80	-15.87	-24.93	-31.94	-37.59	
$\frac{J-C}{C}/\%$	47.71	24.63	8.37	-3.51	-12.56	-19.67	-25.22	

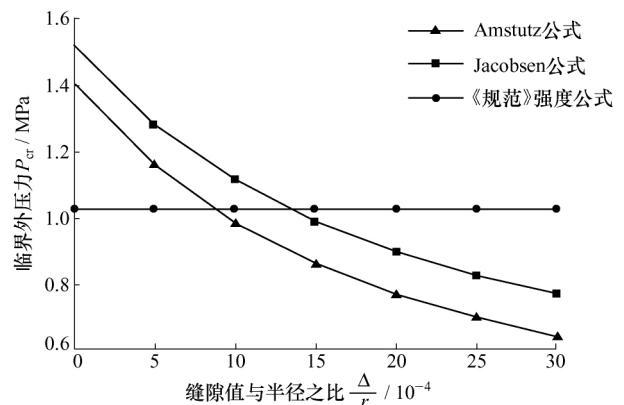


图 1 加劲环临界外压力与缝隙值的关系曲线

2.2 加劲环临界外压力与加劲环高度的关系

选取不同加劲环高度: $h = 100, 150, 200, 250$,

300, 350, 400 mm, 其他参数均同上述钢管基本参数, 分别采用 Amstutz 公式、Jacobsen 公式、《规范》强度公式计算得到的加劲环临界外压力如表 2 所列, 并将计算得到的临界外压力绘制成曲线如图 2 所示。

表 2 加劲环临界外压力与加劲环高度的关系

加劲环高度 h/mm		100	150	200	250	300	350	400
加劲环 临界外 压力 /MPa	Amstutz 公式(A)	0.715	1.159	1.592	1.986	2.329	2.624	2.875
	Jacobsen 公式(J)	0.777	1.280	1.788	2.265	2.701	3.089	3.431
	《规范》强度 公式 Code(C)	0.952	1.027	1.103	1.179	1.255	1.330	1.406
$\frac{A-C}{C}/\%$		-24.89	12.85	44.33	68.45	85.58	97.29	104.48
$\frac{J-C}{C}/\%$		-18.38	24.63	62.10	92.11	115.22	132.26	144.03

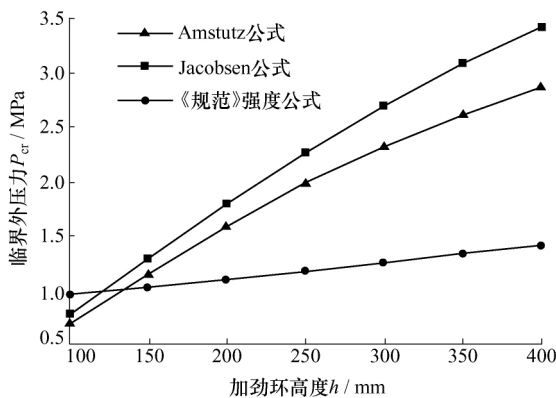


图 2 加劲环临界外压力与加劲环高度的关系曲线

从图 2 可以看出, 三种方法计算所得的临界外压力均随加劲环高度的增加而增大。在常见加劲环高度 ($h=200$ mm) 时, Jacobsen 公式和 Amstutz 公式较《规范》强度公式计算结果分别提高了 62% 和 44%。加劲环高度越大, Jacobsen 公式和 Amstutz 公式比《规范》强度公式计算结果提高的程度也越大。

2.3 加劲环临界外压力与加劲环间距的关系

选取不同加劲环间距: $L=500, 750, 1\ 000, 1\ 500, 2\ 000, 2\ 500, 3\ 000, 3\ 500$ mm, 其他参数均同上述钢管基本参数, 分别采用 Amstutz 公式、Jacobsen 公式、《规范》强度公式计算得到的加劲环临界外压力如表 3 所列, 并将计算得到的临界外压力绘制成曲线如图 3 所示。

表 3 加劲环临界外压力与加劲环间距的关系

加劲环间距 L/mm		500	750	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500
加劲环 临界外 压力 /MPa	Amstutz 公式(A)	2.502	2.020	1.728	1.375	1.159	1.010	0.899	0.812
	Jacobsen 公式(J)	2.783	2.243	1.917	1.521	1.280	1.113	0.991	0.895
	《规范》强度 公式 Code(C)	4.109	2.739	2.055	1.370	1.027	0.822	0.685	0.587
$\frac{A-C}{C}/\%$		-39.11	-26.25	-15.91	0.36	12.85	22.87	31.24	38.33
$\frac{J-C}{C}/\%$		-32.27	-18.11	-6.72	11.02	24.63	35.40	44.67	52.47

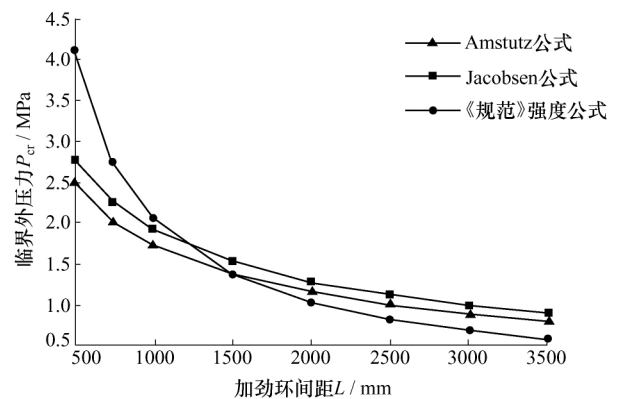


图 3 加劲环临界外压力与加劲环间距的关系曲线

从图 3 可以看出, 三种方法计算所得的临界外压力均随加劲环间距的增大而减小。在常见加劲环间距范围 ($L=1\ 500, 2\ 000$ mm) 内, Jacobsen 公式和 Amstutz 公式较《规范》强度公式计算结果分别提高 25% 和 13%。加劲环间距越大, Jacobsen 公式和 Amstutz 公式比《规范》强度公式计算结果提高的程度越大。

2.4 加劲环临界外压力与管壁厚度的关系

选取不同管壁厚度: $t=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70$ mm, 其他参数均同上述钢管基本参数, 分别采用 Amstutz 公式、Jacobsen 公式、《规范》强度公式计算得到的加劲环临界外压力如表 4 所列, 并将计算得到的临界外压力绘制成曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 三种方法计算所得的临界外压力均随管壁厚度的增加而增大。在常见管壁厚度范围 ($t=20, 30, 40$ mm) 内, Jacobsen 公式和 Amstutz 公式在管壁厚度较小时相比《规范》强度公式计算结果均有不同程度的提高, 管壁厚度越小, Jacobsen 公式和 Amstutz 公式比《规范》强度公式计算结果提高的程度越大。

表 4 加劲环临界外压力与管壁厚度的关系

管壁厚度 t/mm		10	20	30	40	50	60	70
加劲环 临界外 压力 /MPa	Amstutz 公式(A)	0.592	0.901	1.159	1.406	1.670	1.969	2.316
	Jacobsen 公式(J)	0.646	0.991	1.280	1.556	1.854	2.190	2.580
	《规范》 强度公式 Code(C)	0.389	0.669	1.027	1.448	1.923	2.446	3.013
	$\frac{A-C}{C}/\%$	52.19	34.68	12.85	-2.90	-13.16	-19.50	-23.13
$\frac{J-C}{C}/\%$	66.07	48.13	24.63	7.46	-3.59	-10.47	-14.37	

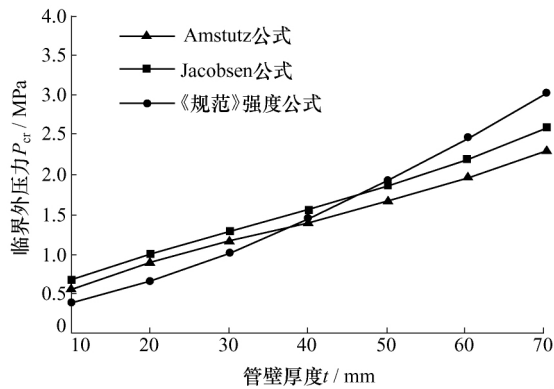


图 4 加劲环临界外压力与管壁厚度的关系曲线

2.5 加劲环临界外压力与钢材屈服强度的关系

选取不同钢材屈服强度: 钢材种类为 Q235、Q345、Q500、Q690, 分别对应屈服强度 $\sigma = 235, 345, 425, 540$ MPa, 其他参数均同上述钢管基本参数, 分别采用 Amstutz 公式、Jacobsen 公式、《规范》强度公式计算得到的加劲环临界外压力如表 5 所列, 并将计算得到的临界外压力绘制成曲线如图 5 所示。

表 5 加劲环临界外压力与钢材屈服强度的关系

钢材种类		Q235	Q345	Q500	Q690
钢材屈服强度 σ/MPa		235	345	425	540
加劲环 临界外 压力 /MPa	Amstutz 公式(A)	0.914	1.159	1.311	1.504
	Jacobsen 公式(J)	1.022	1.280	1.438	1.636
	《规范》强度 公式 Code(C)	0.700	1.027	1.266	1.608
$\frac{A-C}{C}/\%$	30.57	12.85	3.55	-6.47	
$\frac{J-C}{C}/\%$	46.00	24.63	13.59	1.74	

从图 5 可以看出, 三种方法计算所得的临界外压力均随钢材屈服强度的提高而增大。在常见钢材

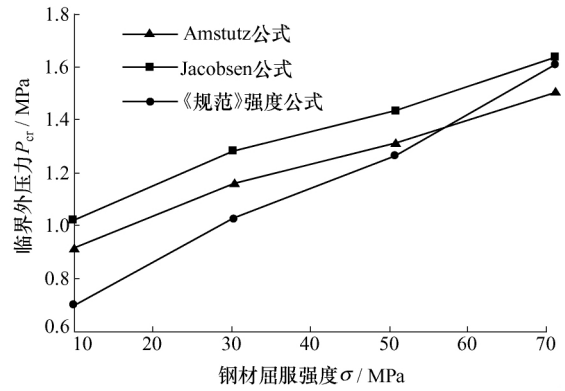


图 5 加劲环临界外压力与钢材屈服强度的关系曲线

屈服强度范围($\sigma = 345, 425$ MPa)内, Jacobsen 公式和 Amstutz 公式较《规范》强度公式计算结果均有不同程度的提高, 且 Jacobsen 公式比 Amstutz 公式提高的程度更大。钢材屈服强度越低, Jacobsen 公式和 Amstutz 公式比《规范》强度公式计算结果提高的程度越大。

3 工程实例比较

某水电站埋藏式压力钢管的基本参数为: 钢管内半径 3 250 mm, 钢管与混凝土之间的缝隙值为 0.975 mm, 当采用 Q345 钢材和 Q500 钢材时, 根据内压确定的管壁计算厚度分别为 37 mm、24 mm。假定加劲环的高度 250 mm, 厚度 26 mm 不变, 针对 247 m 和 123.5 m 两种外压水头, 下面分别根据《规范》强度公式、Amstutz 公式和 Jacobsen 公式来确定加劲环的间距。

采用《规范》强度公式时, 外水压力可根据具体地质条件进行相应折减, 折减系数取 0.6~1.0, 加劲环的临界外压力安全系数取 1.8; 采用 Amstutz 公式和 Jacobsen 公式时, 外水压力一般不折减, 加劲环的临界外压力安全系数取 1.6。根据各方法相应的规定, 采用 Q345 钢材和 Q500 钢材的计算结果如表 6 和表 7 所列。

根据表 6 和表 7 可知: 在外压水头较大时计算所得的加劲环间距均较小, 《规范》强度公式折减系数采用 1.0 时计算所得的加劲环间距与 Amstutz 公式的计算结果相当; 折减系数采用 0.8 的计算结果与 Jacobsen 公式的计算结果相当; 而折减系数采用 0.6 时, 《规范》强度公式比 Amstutz 公式和 Jacobsen 公式计算出来的加劲环间距大, 说明此条件下《规范》强度公式相对更经济。在外压水头较小时, 《规范》强度公式采用 0.6 及以上的折减系数计算所得的加劲

表6 Q345 钢材加劲环抗外压稳定计算工程实例

计算方法	加劲环间距 L/mm	加劲环临界外压力 P_{cr}/MPa	外水头/ m	折减系数	外水压力/ MPa	安全系数
《规范》 强度公式 Code	1 000	2. 648	247	0. 6	1. 454	1. 821
	750	3. 531	247	0. 8	1. 938	1. 822
	600	4. 414	247	1. 0	2. 423	1. 822
	2 000	1. 324	123. 5	0. 6	0. 727	1. 821
	1 500	1. 765	123. 5	0. 8	0. 969	1. 821
	1 200	2. 207	123. 5	1. 0	1. 212	1. 822
Amstutz 公式	500	4. 025	247	1. 0	2. 423	1. 661
	2 750	1. 942	123. 5	1. 0	1. 212	1. 603
Jacobsen 公式	750	3. 947	247	1. 0	2. 423	1. 629
	3 500	1. 948	123. 5	1. 0	1. 212	1. 608

表7 Q500 钢材加劲环抗外压稳定计算工程实例

计算方法	加劲环间距 L/mm	加劲环临界外压力 P_{cr}/MPa	外水头/ m	折减系数	外水压力/ MPa	安全系数
《规范》强度 公式 Code	850	2. 693	247	0. 6	1. 454	1. 852
	650	3. 522	247	0. 8	1. 938	1. 817
	500	4. 578	247	1. 0	2. 423	1. 889
	1 700	1. 346	123. 5	0. 6	0. 727	1. 852
	1 300	1. 761	123. 5	0. 8	0. 969	1. 817
	1 000	2. 289	123. 5	1. 0	1. 212	1. 889
Amstutz 公式	500	3. 934	247	1. 0	2. 423	1. 624
	2 250	1. 946	123. 5	1. 0	1. 212	1. 606
Jacobsen 公式	650	3. 945	247	1. 0	2. 423	1. 628
	2 850	1. 943	123. 5	1. 0	1. 212	1. 604

环间距明显均比 Amstutz 公式和 Jacobsen 公式小, 说明此条件下《规范》强度公式偏保守。

4 结 论

(1) 埋藏式压力钢管的加劲环临界外压力计算公式很多, 但 Amstutz 公式、Jacobsen 公式和《规范》强度公式在国内外广泛采用, 其计算结果也有一定的差异。对于管周初始缝隙值 Δ , Amstutz 公式和 Jacobsen 公式计算的临界外压力都随缝隙值的增大而减小, 而《规范》强度公式由于没有考虑缝隙值的影响, 其计算得到的临界外压力为定值, 这显然是不合理的。另外对于加劲环高度 h 、管壁厚度 t 、钢材屈服强度 σ , 三种方法计算所得的临界外压力均与 h 、 t 、 σ 成正相关。在正常的加劲环尺寸和间距条件下, Jacobsen 公式和 Amstutz 公式比《规范》强度公式的临界压力计算结果分别提高 25% 和 13% 左右, 经济上更为有利。

(2) 国内外对临界压力、安全系数、设计外压

力的计算取值各不相同, 本文结合某具体工程的钢管抗外压稳定计算表明, 在外水压力较大时《规范》强度公式比 Amstutz 公式和 Jacobsen 公式所需加劲环间距较大; 但当外水压力较小时, 《规范》强度公式相对 Amstutz 公式和 Jacobsen 公式明显偏于保守。

(3) 由于 Jacobsen 法对 Amstutz 法中适用范围及简化精度进行了优化, 且计算结果相对《规范》强度公式更为经济, 为了加快国内规范的国际化推广需要, 建议在修订《水电站压力钢管设计规范》时, 可将 Jacobsen 公式作为埋藏式压力钢管加劲环抗外压稳定计算方法之一。

参考文献:

- [1] 胡积龄. 关于埋藏式高压钢管外压稳定的几个问题[J]. 水力发电, 1981(4): 34-39.
- [2] 刘启钊, 谈为雄, 刘焕兴, 等. 埋藏式钢管外压稳定计算[J]. 水利水电技术, 1980, 11(2): 29-39.
- [3] 潘家铮. 压力钢管[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [4] AMSTUTZ E. Buckling of pressure-shaft and tunnel linings[J]. Water

- Power, 1970, 11: 391-399.
- [5] JACOBSEN S. Buckling of circular rings and cylindrical tubes under external pressure[J]. Water Power, 1974, 12: 400-407.
- [6] SVOISKYF M, FREISHIST A R. External pressure analysis for embedded steel penstocks[J]. International Water Power and Dam Construction, 1992, 1: 37-42.
- [7] 国家能源局. 水电站压力钢管设计规范: NB/T 35056—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [8] 刘东常. 半解析有限元法解加劲压力钢管外压稳定性问题的研究[J]. 水力发电学报, 1990, 9(2): 41-49.
- [9] 陈观福, 伍鹤皋, 熊德炎, 等. 埋藏式加劲环钢管抗外压失稳计算方法的分析与应用[J]. 水电站设计, 2000, 16(1): 42-47.
- [10] 伍鹤皋, 陈观福, 王金龙, 等. 埋藏式压力钢管抗外压稳定分析[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(4): 14-17.
- [11] AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice NO. 79: Steel Penstocks Second Edition[S]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2012.
- [12] European Committee for Boilermaking and Kindred Steel Structures. Recommendations for the design, manufacture and erection of steel penstocks of welded construction for hydro electric installations[S]. Berlin: Comite Europeen De La Chaudronnerie Et De La Tolerie, 1979.
- [13] 伍鹤皋, 周彩荣, 付山, 等. 埋藏式压力钢管加劲环抗外压稳定分析方法探讨[J]. 水力发电学报, 2015, 34(12): 19-23.

(责任编辑 陈小敏)