

弧形钢闸门支臂计算长度系数的确定

关于“钢闸门设计规范”中弧门支臂计算长度系数的取值问题

西北农学院水利系 何运林

前 言

弧形钢闸门支臂在框架平面内计算长度系数的确定,在我国1964年编制的《水工建筑物钢闸门设计规范》中,没有明确规定。国外有关规范,如西德《水工钢结构物的计算基础》、西德工业标准19704(西德规范草案1972,10);苏联《水工建筑物机械设备设计技术规范》(1961年);日本《闸门、压力钢管技术规范》(1964年)等,也没有支臂计算长度系数的具体规定。

在这次《水利水电工程钢闸门设计规范》(以下简称规范)的修订过程中,经过反复讨论认为:新规范对弧门支臂计算长度系数应有明确规定,便于指导设计工作。本文运用弹性稳定理论,结合大量工程资料,对弧门支臂在各种不同构造和支承情况下,进行了理论研究和计算,提出了支臂在各种情况下,计算长度系数的选用范围。现将规范中弧门支臂计算长度系数 μ 值规定的来源介绍如下。

(一) 框架的变形型式

弧形钢闸门主框架的型式,随着主梁布置的不同,框架的型式也相应而异。据调查,过去一般采用主横梁式,近年来由于孔口尺寸的不断扩大,主纵梁式弧门亦开始采用,因而弧门主框架就有主横梁式框架和主纵梁式框架两种型式(图1)。

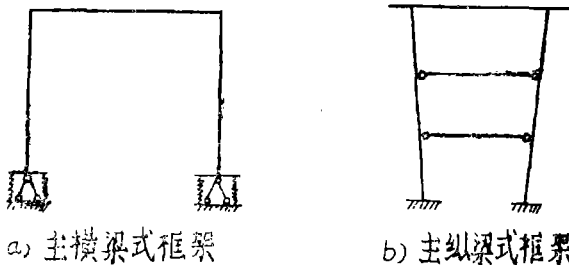


图 1

主纵梁式弧门,我国从六十年代开始采用,迄今已建成的有十余扇。近年来国内已作过一些研究工作,但是目前仍处于发展阶段,有关问题还有待进一步研究。故本文着重对运用极为广泛的主横梁式弧门框架进行研究。

主横梁式框架,由于弧门的两侧止水紧靠侧墙,主框架在对称荷载作用下,可能产生

对称丧失稳定形式,即对称变形,如图2(a)所示。但是,弧门与侧墙是有一定间隙的,据37扇弧门的调查,侧轮与侧墙或侧止水橡皮与侧墙的间隙,有86.5%的弧门在3至10毫米之间。虽然,侧止水橡皮安装时与侧墙紧靠,但侧止水是可压缩的,仍然存在侧移变形的可能,如水流不垂直于弧门等,使框架侧移产生反对称丧失稳定,即反对称变形,如图2(b)所示。当然侧移值 δ 不会很大,因为框架向一侧倾斜变形时,由于侧墙约束不会产生自由侧移,而系约束侧移。

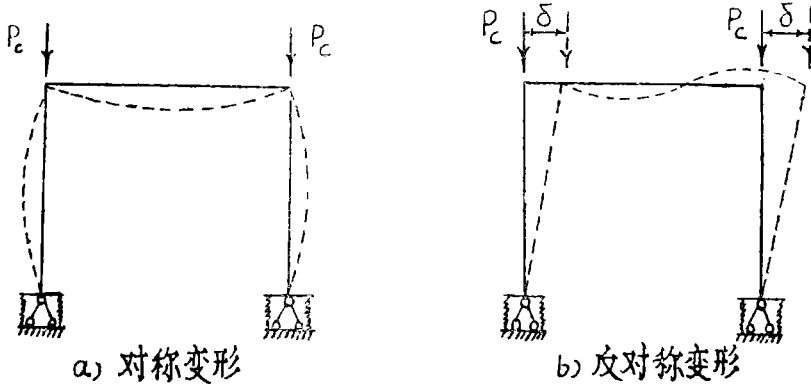


图 2

根据规范规定:潜孔弧门采用方头P形侧止水,露顶弧门采用L形侧止水(图3),当框架侧移变形时,侧止水橡皮受到压缩。设橡皮的应变为 ϵ ,则

$$\epsilon = \frac{\delta}{a}$$

知道 ϵ 后,侧止水橡皮单位长度上所承受的压应力 σ ,可由下式求得:

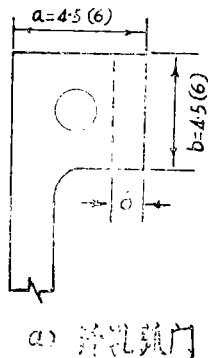
$$\sigma = E' \epsilon = E' \frac{\delta}{a} \quad (1)$$

式中, ϵ ——侧止水橡皮的应变;

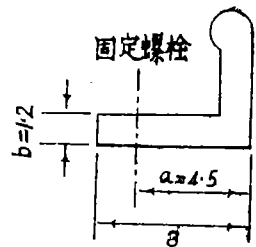
δ ——侧止水橡皮的压缩量,亦即框架的侧移值;

E' ——侧止水橡皮的弹性模量;

a ——侧止水橡皮受压方向的厚度。



a) 潜孔弧门



b) 露顶弧门

图 3 (图中单位:厘米)

设一个支臂相应的侧止水橡皮的长度为 S ,则

$$S = \frac{S'}{n}$$

式中, $S' = 0.01745L\beta$ (侧止水总长度);

n ——一侧支臂的数量。

$$\therefore S = \frac{1}{n} 0.01745L\beta \quad (2)$$

式中, L ——弧门的支臂长度;

β ——弧门面板上下端部与支铰连线的夹角。

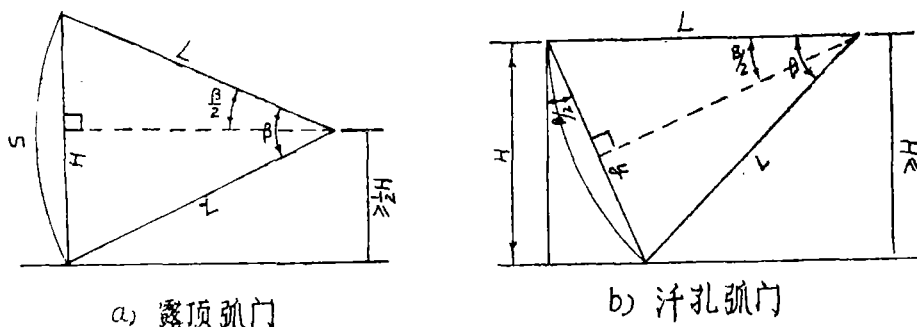


图 4

根据规范规定及统计资料分析, 取

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{露}} &= 1.3H \\ L_{\text{潜}} &= 1.77H \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由图 4 及 (2)、(3) 两式可求得

$$S = CL \quad (4)$$

式中, C ——弧门构造特征系数:

露顶弧门 二支臂 $C = 0.3956$

三支臂 $C = 0.2637$

潜孔弧门 二支臂 $C = 0.2996$

从而可求得侧墙对一个支臂相应的侧止水橡皮长度 S 上的反力 t 为:

$$t = \sigma \cdot S \cdot b$$

将 (1)、(4) 两式代入上式, 则得

$$\left. \begin{aligned} t &= E' CL \delta \quad (\text{潜孔弧门}) \\ t &= 0.267 E' CL \delta \quad (\text{露顶弧门}) \end{aligned} \right\} (5)$$

令产生单位侧向位移所需要的力为 T , 则

$$T = \frac{t}{\delta}$$

故得 $T = E' CL$ (潜孔弧门)

$$T = 0.267 E' CL \quad (\text{露顶弧门}) \quad (6)$$

式中 T ——框架产生单位侧移所需之力。

(二) 支臂两端的弹性抗转刚度

支臂上端与横梁连接, 当框架受荷产生反对称变形时, 由于横梁的单位刚度大于支臂单位刚度 4 倍以上, 故支臂上端的变形受到横梁的约束, 而不能自由转动。根据工程力学的原理, 可求得支臂上端单位转角的弹性抗转刚度为:

$$R_2 = 6 i_{\text{横}} \quad (7)$$

式中, R_2 ——支臂上端单位转角的弹性抗转刚度 (即柱端转角 $\theta_2 = 1$ 时, 柱端支承处所产生的力偶距);

$i_{\text{横}}$ ——横梁的单位刚度 $\frac{EI}{B}$;

B ——横梁的跨度。

故支臂上端的弹性抗转刚度为 $R_2 \theta_2$ (θ_2 ——支臂上端的转角),

$$\text{令} \quad r_2 \frac{R_2}{i_{\text{支}}} \quad (8)$$

式中, $i_{\text{支}}$ ——支臂的单位刚度 $\frac{EI}{L}$;

将 $\frac{p}{EI} = \alpha^2$ 代入上式则得

$$\frac{R^2}{p} = \frac{r_2}{\alpha^2 L} \quad (9)$$

支臂的下端与支座相连接, 根据弧门支座的构造: 当为球铰时, 一般可按理想铰接计算, 相当于 $R_1 = 0$; 当为圆柱铰时, 在弯矩作用平面内, 其构造如图 5 所示, 既非铰接又非固定, 实系弹性抗转支座 (图 6), 求得支臂下端单位转角的弹性抗转刚度为:

$$R_1 = 12 i_{\text{轴}} \quad (10)$$

式中, $i_{\text{轴}}$ ——铰轴的单位刚度 $\frac{EI}{l_{\text{轴}}}$;

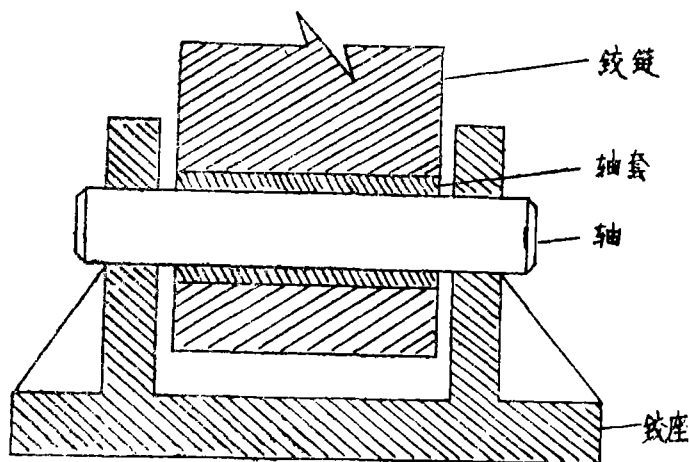


图 5

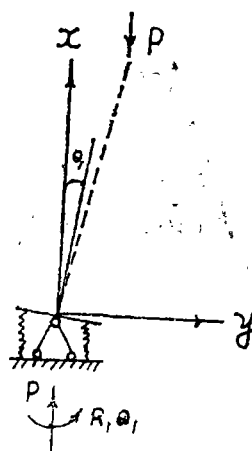


图 6

R_1 ——支臂下端单位转角的弹性抗转刚度；

$l_{\text{轴}}$ ——铰轴的计算跨度。

由于一根铰轴并非与一个支臂相连，而是二个或者三个支臂，为安全计，取

$$R_1 = 4 i_{\text{轴}} \quad (11)$$

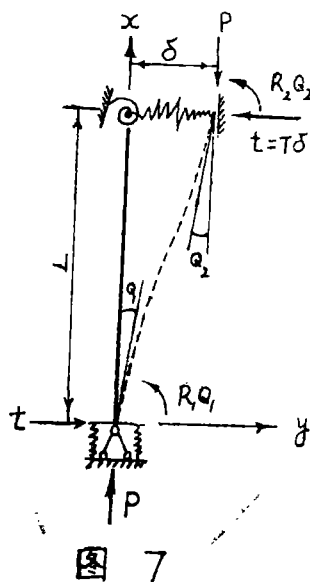
故支臂下端的弹性抗转刚度为 $R_1 \theta_1$ 。

$$\text{令} \quad r_1 = \frac{R_1}{i_{\text{轴}}} \quad (12)$$

$$\text{同理导得} \quad \frac{R_1}{p} = \frac{r_1}{\alpha^2 L} \quad (13)$$

(三) 基本稳定方程式的推导

主横梁式弧门框架为单跨单层刚架。假定：(1) 钢材处于弹性阶段，由此得压弯杆的临界荷载与轴心压杆一样，即它们的计算长度相同，故可将弧门框架的跨中荷载移至两端支臂上（图 2），将第二类稳定问题按第一类稳定问题进行分析；(2) 按可能出现最不利的约束侧移反对称变形来推导基本稳定程式，此时认为相邻支臂皆达到临界荷载，互相间无弹性支承作用。框架的简图如图 2 (b) 所示，而单支臂的计算简图如图 7 所示。



支臂轴线弯曲的近似微分方程式：

$$EI \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} + M = 0 \quad (14)$$

支臂轴线上任一截面 X 处的弯矩 M_x 为

$$M_x = R_2 \theta_2 + t(L - x) - p(\delta - y) \quad (15)$$

将 (15) 式代入 (14) 式，并将 $t = T\delta$ 及 $\frac{p}{EI} = \alpha^2$ 代入得

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \alpha^2 y = \frac{T\delta}{EI} x + \frac{p - TL}{EI} \delta - \frac{R_2 \theta_2}{EI} \quad (16)$$

(16) 式为二阶线性非齐次微分方程式，它的通解为

$$y = A_1 \cos \alpha x + A_2 \sin \alpha x + \frac{T\delta}{p} x + \left(1 - \frac{TL}{p}\right) \delta - \frac{R_2 \theta_2}{p} \quad (17)$$

应用边界条件

$$\left. \begin{aligned} y \Big|_{x=0} &= 0 & y \Big|_{x=L} &= \delta \\ \frac{dy}{dx} \Big|_{x=0} &= \theta_1 & \frac{dy}{dx} \Big|_{x=L} &= \theta_2 \end{aligned} \right\}$$

则得:

$$\left. \begin{aligned} y \Big|_{x=0} &= A_1 + 0 + \left(1 - \frac{TL}{p}\right) \delta - \frac{R_2 \theta_2}{p} = 0 \\ y \Big|_{x=L} &= A_1 \cos \alpha L + A_2 \sin \alpha L + 0 - \frac{R_2 \theta_2}{p} = 0 \\ \frac{dy}{dx} \Big|_{x=0} &= 0 + A_2 \alpha + \left(\frac{T}{p} + \frac{TL}{R_1} - \frac{p}{R_1}\right) \delta + \frac{R_2 \theta_2}{R_1} = 0 \\ \frac{dy}{dx} \Big|_{x=L} &= -A_1 \alpha \sin \alpha L + A_2 \alpha \cos \alpha L + \frac{T}{p} \delta - \theta_2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

(18) 式为 A_1 、 A_2 、 δ 及 θ_2 的线性齐次方程组。根据行列式的性质, 为要获得上述齐次方程组有非零解的必要和充分条件, 必须使方程组(18)的系数所形成的行列式等于零, 即

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & \left(1 - \frac{TL}{p}\right) & -\frac{R_2}{p} \\ \cos \alpha L & \sin \alpha L & 0 & -\frac{R_2}{p} \\ 0 & \alpha & \left(\frac{T}{p} + \frac{TL}{R_1} - \frac{p}{R_1}\right) & \frac{R_2}{R_1} \\ -\alpha \sin \alpha L & \alpha \cos \alpha L & \frac{T}{p} & -1 \end{vmatrix} = 0 \quad (19)$$

$$\text{令 } R = \frac{T}{\frac{EI}{L^3}}$$

$$\text{故 } T = \frac{EI}{L^3} R \quad (20)$$

将(9)、(13)及(20)式均代入(19)式、得

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 - \frac{R}{(\alpha L)^2} & -\frac{r}{(\alpha L)^2} \\ \cos \alpha L & \sin \alpha L & 0 & -\frac{r_2}{(\alpha L)^2} \\ 0 & \alpha L & \frac{R}{(\alpha L)^2} + \frac{R_1}{r_1} - \frac{(\alpha L)^2}{r_1} & \frac{r_2}{r_1} \\ -\alpha L \sin \alpha L & \alpha L \cos \alpha L & \frac{R}{(\alpha L)^2} & -1 \end{vmatrix} = 0 \quad (21)$$

解(21)式并简化得:

$$\{(\alpha L)^5 - (R + r_1 r_2)(\alpha L)^3 + [r_1 r_2 - (r_1 + r_2)]R \alpha L\} \sin \alpha L - [(r_1 + r_2)(\alpha L)^4 - (r_1 + r_2)R(\alpha L)^2 - r_1 r_2 R] \cos \alpha L - 2r_1 r_2 R = 0 \quad (22)$$

方程式(22)为弧门支臂稳定方程的通式,式中包含 r_1 、 r_2 、 R 和 αL 四个参变数。

(四) 支臂在不同约束情况下的计算长度系数 η 值

1、将支臂视为两端弹性抗转支承,并产生自由侧移的压杆。即假定图7中的 $t=0$,也就是 $T=0$,代入(20)式得 $R=0$,再代入稳定方程的通式(22)式中,则得

$$\tan \alpha L = \frac{\alpha L (r_1 + r_2)}{(\alpha L)^2 - r_1 r_2} \quad (23)$$

由 $\alpha^2 = \frac{P}{EI}$ 及著名的压杆稳定临界压力的欧拉方程可得

$$\alpha L = \frac{\pi}{\mu} \quad (24)$$

式中, μ ——支臂的计算长度系数。

将(24)式代入(23)式得

$$\tan \left(\frac{\pi}{\mu} \right) = \frac{\frac{\pi}{\mu} (r_1 + r_2)}{\left(\frac{\pi}{\mu} \right)^2 - r_1 r_2} \quad (25)$$

根据超越方程(25)式,由不同的 r_1 及 r_2 值,可求得相应的 μ 值,并制成表1。

μ 值 表 1

$r_2 = 6k_2 = 6 \frac{i_{\text{轴}}}{i_{\text{支}}}$ $r_1 = 4k_1 = 4 \frac{r_{\text{轴}}}{r_{\text{支}}}$	0	$6 \times 4 = 24$	$6 \times 10 = 60$	∞
0	∞	2.09	2.03	2.00
$4 \times 5^* = 20$	2.10	(1.09)	1.07	1.05
∞	2.00	1.04	1.02	1.00

* 据调查分析得 $\frac{i_{\text{轴}}}{i_{\text{支}}} > 5$,为安全计,表中取下限5计算。

当(25)式中 $r_1 = 0$,则变为

$$\frac{\pi}{\mu} \tan \left(\frac{\pi}{\mu} \right) = 6 \frac{i_{\text{横}}}{i_{\text{支}}} \quad (26)$$

公式(26)为铰接基础自由侧移门式刚架的稳定方程式。

当(25)式中 $r_1 = \infty$,则变为

$$\frac{\frac{\pi}{\mu}}{\tan \frac{\pi}{\mu}} = -6 \frac{i_{\text{横}}}{i_{\text{支}}} \quad (27)$$

公式(27)为固接基础自由侧移门式刚架的稳定方程式。

2、将支臂视为下端弹性抗转支承、上端相当于铰接和约束侧移的压杆。

据分析,支臂与横梁在动力作用下,并非出现刚架的正体振型,而是支臂与横梁分别以单独部件发生振动。如文献^[10]、^[11]按支臂两端铰接计算的振动频率值与实测振动频率值一致。为此,假定 $R_2 = 0$,即 $r_2 = 0$,代入稳定方程的通式(22)式中,简化得:

$$\tan \alpha L = \frac{\alpha L \left[\frac{R}{(\alpha L)^2} - 1 \right]}{\frac{R}{(\alpha L)^2} + \frac{R}{r_1} - \frac{(\alpha L)^2}{r_1}} \quad (28)$$

再将(24)式代入得

$$\tan \frac{\pi}{\mu} = \frac{\frac{\pi}{\mu} \left[\frac{R}{\left(\frac{\pi}{\mu} \right)^2} - 1 \right]}{\frac{R}{\left(\frac{\pi}{\mu} \right)^2} + \frac{R}{r_1} - \frac{(\pi/\mu)^2}{r_1}} \quad (29)$$

按超越方程(29)式,由不同的 r_1 及 R 值,可求得相应的 μ 值。

参数 $R = \frac{T}{\frac{E I}{L^3}}$

将(6)式代入上式得

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{E'}{E} \cdot \frac{CL^3}{\frac{I}{L}} && \text{(潜孔弧门)} \\ R &= 0.267 \frac{E'}{E} \cdot \frac{CL^3}{\frac{I}{L}} && \text{(露顶弧门)} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

式中, $\frac{I}{L}$ ——据38扇弧门统计分析得

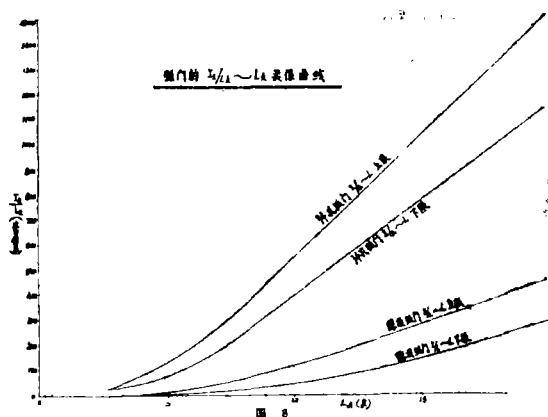
$\frac{I}{L} \sim L$ 关系曲线(图

8)。由图8取 $\frac{I}{L}$ 的

上限值列入表2;

$$E' = 32 \text{ kg/cm}^2;$$

$$E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$



$\frac{I_{支}}{L_{支}}$ 值

表 2

$\frac{I_{支}}{L_{支}}(Cm^3)$ \ L(M)		5	10	15	20
弧门类别					
露 顶 弧 门		10	110	275	450
潜 孔 弧 门		120	540	1020	1500

将 $\frac{I}{L}$ 、 E' 、 E 以及 (4) 式中的不同 C 值代入 (30) 式, 并令 $L = 5、10、15、20$ 米等四种情况, 分别求得各种 R 值列入表 3。

R 值

表 3

R \ L(M)		5	10	15	20
弧门类别					
露顶弧门	二 支 臂	20.10	14.60	19.80	28.65
	三 支 臂	13.40	9.74	13.20	19.10
潜孔弧门	二 支 臂	4.76	8.45	15.12	24.40

一般弧门的 $r_1 > 20$, 由表一知, 当 $r_1 > 20$ 时, 其 μ 值与 $r_1 \rightarrow \infty$ 时的 μ 值接近。故取 $r_1 = 20$ 代入 (29) 式中, 由不同的 R 值 (表 3) 即可求得相应 μ 值, 列入表 4。

μ 值

表 4

L(M)		5	10	15	20
弧门类别					
露顶弧门	二 支 臂	0.82	0.88	0.82	0.78
	三 支 臂	0.91	(1.00)	0.91	0.83
潜孔弧门	二 支 臂	(1.28)	1.04	0.88	0.79

根据方程式 (29), 当令 $r_1 = 20$ 时, 可制成 $R \sim \mu$ 关系曲线, 如图 9。

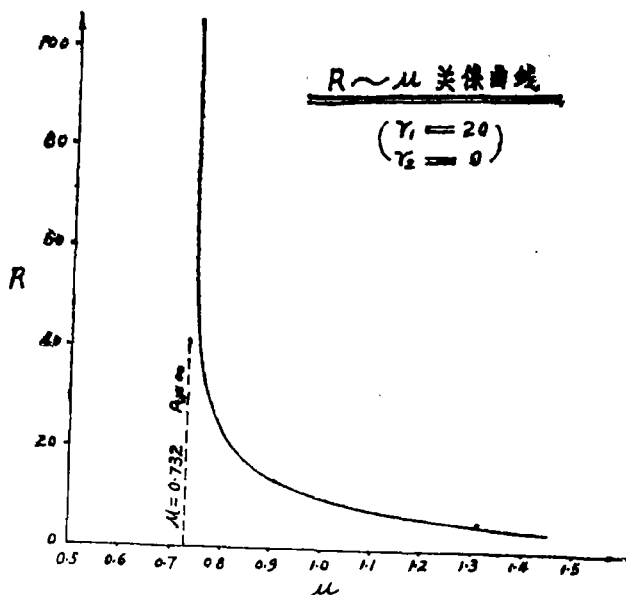


图 9

3、将支臂视为两端弹性抗转支承和约束侧移的压杆。

此种压杆稳定方程的通式，即前面的公式(22)，将(24)式代入(22)式中，则得

$$\left\{ \left(\frac{\pi}{\mu} \right)^5 - (R + r_1 r_2) \left(\frac{\pi}{\mu} \right)^3 + [r_1 r_2 - (r_1 + r_2) R \frac{\pi}{\mu}] \sin \frac{\pi}{\mu} - [(r_1 + r_2) \left(\frac{\pi}{\mu} \right)^4 - (r_1 + r_2) R \left(\frac{\pi}{\mu} \right)^2 - r_1 r_2 R] \cos \frac{\pi}{\mu} - 2 r_1 r_2 R \right\} = 0 \quad (31)$$

由公式(31)知， μ 是随着 r_1 、 r_2 和 R 而变化，据规范规定，横梁与支臂的单位刚度比 $K_2 = 4 \sim 8$ ，为安全计，取 $K_2 = 4$ ， $K_1 = 5$ ，则 $r_1 = 4 \times 5 = 20$ ， $r_2 = 6 \times 4 = 24$ 。

将上述二值代入(31)式，按表3的 R 值即可求得相应的 μ 值，列入表5。

 μ 值

表5

L(M)		5	10	15	20
弧门类别	二支臂	0.60	0.70	0.60	0.58
	三支臂	0.72	(0.79)	0.73	0.61
潜孔弧门	二支臂	(0.92)	0.82	0.69	0.58

将 $r_1 = 20$ ， $r_2 = 24$ 代入公式(31)，整理得

$$R = \frac{\left(\frac{\pi}{\mu} \right)^5 \sin \frac{\pi}{\mu} - 44 \left(\frac{\pi}{\mu} \right)^4 \cos \frac{\pi}{\mu} - 480 \left(\frac{\pi}{\mu} \right)^3 \sin \frac{\pi}{\mu}}{\left(\frac{\pi}{\mu} \right)^3 \sin \frac{\pi}{\mu} - 44 \left(\frac{\pi}{\mu} \right)^2 \cos \frac{\pi}{\mu} - 436 \frac{\pi}{\mu} \sin \frac{\pi}{\mu} - 480 \cos \frac{\pi}{\mu} + 960} \quad (32)$$

按(32)式可绘制 $R \sim \mu$ 关系曲线, 示于图10。图中 $\mu_{\max} = 1.09$, 相当于自由侧

移情况, 即 $R = 0$; $\mu_{\min} = 0.58$, 相当于无侧移情况, 即令 $R = \infty$ 代入(31)式求得, 此时将框架视为对称变形, 就是说在(31)式中的 r_2 应为

$$r_2 = 2 \frac{i_{\text{横}}}{i_{\text{支}}} = 2 \times 4 = 8。$$

图中的曲线表明, 当

$\mu_{\min} = 0.58$ 时, 曲线由约束侧移转入无侧移的情况, 故这时曲线出现为平行于 y 轴的直线, 它与参数 R 无关。

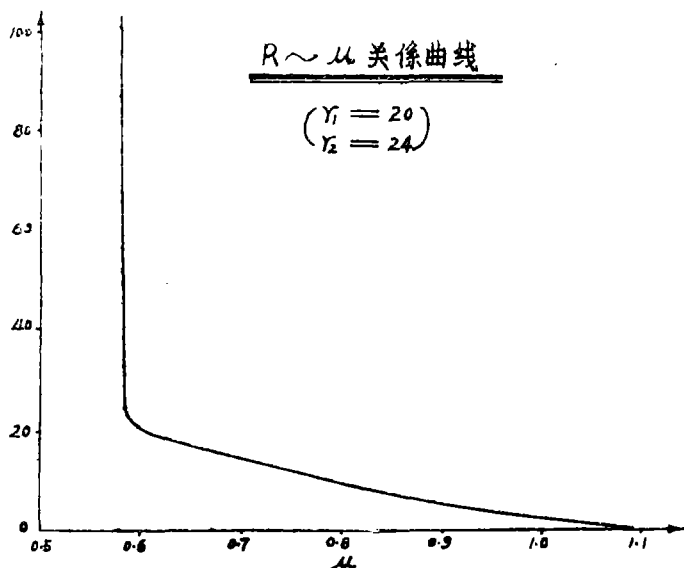


图 10

4、将支臂视为上端弹性抗转支承, 下端铰接和约束侧移的压杆。

球铰属于这种类型。由于铰轴与轴套之间的配合间隙, 引起了非弹性角变位, 由此使支臂上端的侧移值 δ 若大于 $[\delta]$ (见表8后的注)时, 亦属此类型。令 $R_1 = 0$, 从而得 $r_1 = 0$, 将此值代入稳定方程的通式(22)式中, 并将(24)式亦代入, 整理得:

$$\tan \frac{\pi}{\mu} = \frac{\frac{R}{\pi} - \frac{\pi}{\mu}}{\frac{R}{\left(\frac{\pi}{\mu}\right)^2} + \frac{R}{r_2} - \left(\frac{\pi}{\mu}\right)^2 \frac{1}{r_2}} \quad (33)$$

根据超越方程(33)式, 制成 $R \sim \mu$ 关系曲线, 示于图11。再根据表3中的 R 值, 可求得相应的 μ 值, 列于表6。

图11中 $\mu_{\min} = 0.77$ 是按框架无侧移产生对称变形求得, 故图中的相应曲线段, 已成为平行于 y 轴的一直线, 它与参数 R 无关。

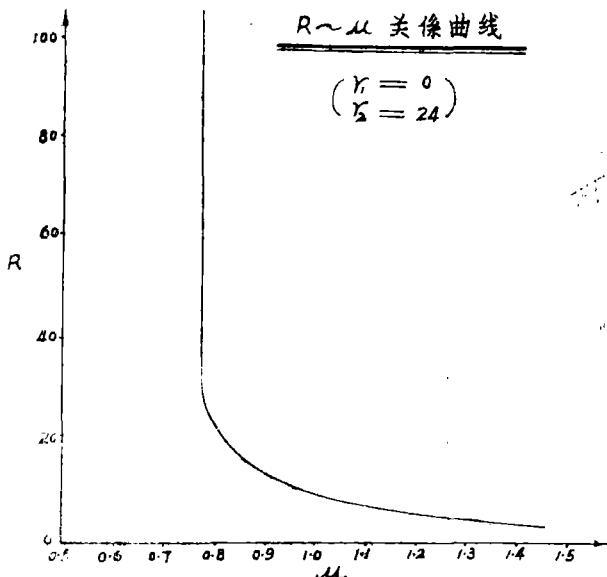


图 11

μ 值 表 6

弧门类别 \ L(M)		5	10	15	20
露顶弧门	二支臂	0.82	0.88	0.82	0.78
	三支臂	0.91	(1.00)	0.91	0.83
潜孔弧门	二支臂	(1.28)	1.05	0.88	0.79

(五) 影响支臂计算长度系数的因素

1、支铰非弹性角变位的影响

对园柱铰弧门，支铰非弹性角变位，对 μ 值的影响是较大的。现以调查的 15 扇弧门为例，按规范规定，铰轴与轴套的配合应为 $\frac{D_4}{dc_6}$ ，据此规定，应用上述 15 例的实际尺寸，算得弧门支臂上端，由于支铰非弹性角变位引起的最大侧移值为 δ_1 。然后，再根据该 15 扇弧门设计采用的铰轴与轴套的配合公差，求得弧门支臂上端，由于支铰非弹性角变位引起的相应侧移值为 δ_2 。由此发现：在 15 扇弧门中，有 8 扇弧门 $\delta_2 > [\delta]$ ，有 12 扇弧门 $\delta_1 > [\delta]$ ，说明这些弧门支铰的转动，系非弹性角变位，不会产生抗转的弯矩 $R_1 \theta_1$ ，虽然有转角 θ_1 ，但是 $R_1 = 0$ ，因此，这种园柱铰就近似于铰接情况，其 μ 值应按（四）中第 4 种情况确定。当 $\delta < [\delta]$ 者，则属弹性支承，其 μ 值应按（四）中第 3 种情况考虑。

2、侧移的影响

为了分析侧移对计算长度系数影响的程度，按照压杆稳定方程的通式（22），求得支臂在各种支承和无侧移、约束侧移、自由侧移等情况下的 μ 值，列入表 7。

$\mu_{约}$ 、 $\mu_{自}$ 、 $\mu_{无}$ 值

表 7

杆端情况 \ 侧移性质	上端—铰接 下端—铰接	上端—固定 下端—固定	上端—弹性支承 下端—弹性支承	上端—弹性支承 下端—铰接	上端—固定 下端—铰接
无侧移 $\mu_{无}^*$	1	0.5	0.58	0.77	0.7
约束侧移 $\mu_{约}$	1.31	0.85	0.92	1.28	1.19
自由侧移 $\mu_{自}$	∞	1.0	1.09	2.09	2.0
$\frac{\mu_{约}}{\mu_{无}}$	1.31	1.7	1.59	1.66	1.7
$\frac{\mu_{自}}{\mu_{无}}$	∞	2.0	1.88	2.71	2.86
$\frac{\mu_{自}}{\mu_{约}}$	∞	1.18	1.19	1.63	1.68

* 表中无侧移的 $\mu_{\text{无}}$ 值, 系将框架视为对称变形, 按通式 (22) 求得, 即公

$$\text{式 (7) 变为 } R_2 = 2 i_{\text{横}}, \text{ 相应通式 (22) 中的 } r_2 \text{ 为 } r_2 = 2 \frac{i_{\text{横}}}{i_{\text{支}}}.$$

从表 7 知, 一般 $\frac{\mu_{\text{约}}}{\mu_{\text{无}}} = 1.3 \sim 1.7$, $\frac{\mu_{\text{自}}}{\mu_{\text{无}}} = 1.9 \sim 2.9$, $\frac{\mu_{\text{自}}}{\mu_{\text{约}}} = 1.2 \sim 1.7$ ($\mu_{\text{无}}$

——无侧移的计算长度系数, $\mu_{\text{约}}$ ——约束侧移的计算长度系数, $\mu_{\text{自}}$ ——自由侧移的计算长度系数), 从这些比值说明, 侧移的影响是不可忽视的。

综上所述, 关于弧门支臂在各种不同支承和约束侧移或自由侧移情况下, 计算长度系数的最大理论值 μ_{max} , 列于表 8 中。

弧门支臂在各种支承情况下的 μ_{max} 值

表 8

杆端情况		(1)	(2)	(3)	(4)
		上端—弹性支承 下端—弹性支承	上端—铰接 下端—弹性支承	上端—弹性支承 下端—弹性支承	上端—弹性支承 下端—铰接
侧移性质		自由侧移	约束侧移	约束侧移	约束侧移
计算简图					
理论值	露顶弧门	1.09	1.00	0.79	1.00
μ_{max}	潜孔弧门		1.28	0.92	1.28
备注		园柱铰 ($\delta < [\delta]$)	园柱铰($\delta < [\delta]$) 考虑上端松动	园柱铰 ($\delta < [\delta]$)	球铰或 园柱铰($\delta > [\delta]$)

[注] 表中 δ ——由于支铰非弹性角变位, 引起弧门支臂上端的侧移值;

$[\delta]$ ——弧门支臂上端的允许侧移值, 即侧轮与侧墙的间隙, 或侧止水压板与侧墙的间隙, 二者之小值。

据调查, 我国已建成的弧形钢闸门中, 园柱铰支承的弧门占 90% 以上, 故表 8 中第 (3) 及第 (4) 种情况, 应用普遍, 一般不计算 δ 值时, 宜按表 8 中的第 (4) 种情况采用 μ 值。

结 束 语

1、方程式 (22) 是压杆稳定方程的通式, 不仅能用它来确定弧形钢闸门支臂, 在各种

支承条件和约束侧移（或自由侧移或无侧移）情况下的计算长度系数 μ 值；而且，对其它各种支承条件的压杆，这个通式亦是适用的。但是，计算自由侧移压杆时，通式中的 $R = 0$ ；计算无侧移压杆时，通式中的 $R = \infty$ ，且 $r_2 = 2 \frac{i_{\text{横}}}{i_{\text{支}}}$ 。

2、根据弧门的构造特点，考虑到制造、安装和运行中的不利因素，宜将弧门主横梁式框架视为约束侧移反对称变形确定 μ 值，比较符合实际。与自由侧移反对称变形比较， μ 值有显著差别。如对上端弹性支承，下端铰接的支臂，按约束侧移计算的 μ 值，仅为按自由侧移计算的 μ 值的61.2%（表7）。

3、关于弧形钢闸门支臂，在各种支承和约束侧移情况下的计算长度系数 μ 值，根据理论值（表8），考虑到某些预计不到的因素，参阅国外有关文献，对弧门支臂的推荐 μ 值，列入表9，设计时可酌情选用。

推 荐 μ 值 表 9

弧 门 类 别	主横梁式 园柱铰 $\delta < [\delta]$	主横梁式 园柱铰 $\delta > [\delta]$	主横梁式 球 铰
杆 端 情 况	上端—弹性支承 下端—弹性支承	上端—弹性支承 下端—近似铰接	上端—弹性支承 下端—理想铰接
侧 移 性 质	约 束 侧 移	约 束 侧 移	约 束 侧 移
推 荐 μ 值	1.0~1.1	1.2~1.5	1.3~1.5

参 考 文 献

- ① 水利水电工程钢闸门设计规范SDJ 13—78（试行）《水利电力出版社》。
- ② 弧形钢闸门主纵梁式支承框架型式及设计简图（机密）
水利电力部《水利水电工程钢闸门设计规范》修订组。
- ③ 弧形闸门主纵梁式支承框架计算方法的研究报告（讨论稿）（内部）。
武汉水利电力学院工程力学与工程结构实验室，1976.3。
- ④ 水工建筑物的高压弧形闸门 水电部第三工程局。
- ⑤ 弹性稳定理论 铁木辛柯 《科学出版社》 1965。
- ⑥ Handbook of structural stability. CRC Japan, Tokyo.
- ⑦ Steel structures (Design and behavior).
San Francisco, Toronto London, 1972。
- ⑧ 结构稳定 广东工学院《结构稳定》编写组，《中国建筑工程出版社》。
- ⑨ Thomas C. Kavanagh: Effective length of Framed Columns. Trans. ASCE Vol.127, part II, (1962)。

- ⑩ 日本“横山水库主泄水闸门振动试验”
辽宁水电设计院译、1966.3。
- ⑪ 江苏省嶂山闸弧形闸门振动及启闭力观测试验报告
南京水科所 1972.11。
- ⑫ 水工闸门振动的调查研究报告
西北农学院水利系 1974.11。
- ⑬ 单阶柱框架平面内计算长度系数的确定
《钢结构设计规范》计算组 1973.1。
- ⑭ 八盘峡水电站泄洪闸弧形闸门振动的原型观测报告
水电部第四工程局勘测设计研究院 1978.4。
- ⑮ 水工闸门技术特性汇编表（机密）
水电部东北勘测设计院 1974.11。
- ⑯ 水工钢闸门的现状与动向
水电部第四工程局勘测设计研究院 1978.3。