

弧形钢闸门主框架柱计算长度系数实用计算方法

申永康¹, 王正中², 邵建华¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:通过分析现行弧形钢闸门支臂稳定设计方法的不足,参考修订后的 GB 50017—2003《钢结构设计规范》,利用能量法,选择恰当的挠曲函数,提出弧形钢闸门主框架柱计算长度系数的实用计算方法。该方法计算简单方便,物理概念明确,计算结果准确,可方便工程设计。

关键词:弧形钢闸门;主框架柱;计算长度系数;门式框架

中图分类号: TU311.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7647(2006)04-0056-03

Practical method for calculating effective length coefficient for pillar of main frame of steel arc gates//SHEN Yong-kang¹, WANG Zheng-zhong², SHAO Jian-hua¹(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: According to an analysis of shortcomings of the pillar stability design method for steel arc gates currently used and the revised Code for Design of Steel Structure GB 50017-2003, a practical method for calculation of the effective length coefficient for the pillar of main frame of arc gates was proposed by use of the energy method and selection of a rational deflection function. The method is simple and accurate in computation, clear in physical conception, and convenient for engineering design.

Key words: steel arc gate; pillar of main frame; effective length coefficient; portal frame

弧形钢闸门支臂是主框架承受水压的主要构件,屈曲问题很突出,国内外曾有多起弧形钢闸门因支臂屈曲而破坏的事故。现行 SL 74—95《水利水电工程钢闸门设计规范》^[1](以下简称现行《规范》)虽给出了弧形钢闸门主框架柱计算长度系数推荐数值范围,并在规范编制说明中给出了基于弧形钢闸门框架支臂弹性屈曲分析的精确解析计算公式及图表,但公式为超越方程,求解很不方便,推荐的数值范围无确定性而且误差较大。随着大型有限元软件的开发,文献[2-3]利用有限元分析软件(程序)对弧形钢闸门支臂的空间屈曲进行了研究,分析了影响弧形钢闸门支臂屈曲的因素。有限元法计算虽然比较高效,且较真实地反映了整体结构各构件的协调作用,但在工程设计中运用不是很方便。简单、合理、有效的平面体系计算公式肯定会更受工程界的欢迎。本文根据现行《规范》对弧形钢闸门主框架构造的要求,利用能量法,选择恰当的挠曲函数,提出弧形钢闸门主框架柱计算长度系数的实用计算方法。

1 理论分析

1.1 模型与屈曲模式

现行《规范》对弧形钢闸门主横梁门式框架的计

算模型如图 1 所示。

在临界荷载范围内,将横梁上承受的均布荷载(水压力)简化为作用在柱上的集中荷载,即门式框架荷载可表示为图 1(a)所示。由于侧轮与侧墙之间有间隙,且止水橡皮可以产生压缩变形,因而框架可能产生侧移屈曲,其失稳的临界荷载当然远小于对称屈曲的临界荷载。上述框架产生的侧移屈曲为有限侧移(弱支撑框架),并非一般的自由侧移。根据两侧橡皮止水的接触情况,屈曲柱的变形可表示为图 1(b)和图 1(c)两种型式。图中 $r_1\theta_1$ 和 $r_2\theta_2$ 分别为柱脚和柱顶的抗弯力矩,其中 r_1 和 r_2 为相应支座的抗弯弹簧系数; $t = k_b\delta$ 为橡皮止水的弹性抗力, k_b 为止水橡皮的抗侧移弹簧系数。

现行《规范》弧形钢闸门主框架柱的屈曲模式是依据原 GBJ 17—88《钢结构设计规范》分为无侧移屈曲与有侧移屈曲两种屈曲模式。修订后的 GB 50017—2003《钢结构设计规范》^[4]将框架分为无支撑的纯框架和有支撑框架两种,其中有支撑框架根据抗侧移能力的大小,分为强支撑框架和弱支撑框架。无支撑的纯框架按原有侧移框架确定柱的计算长度系数,强支撑框架按原无侧移框架确定柱的计算长度系数,弱支撑框架则按有侧移与无侧移的轴

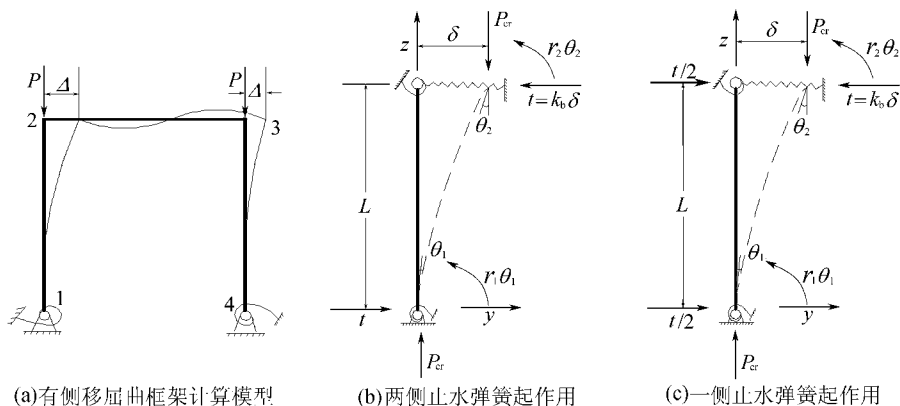


图1 主横梁门式框架计算简图及屈曲柱

心压杆的稳定系数考虑抗侧刚度的插值得到柱的轴心压杆稳定系数,无直接确定柱的计算长度系数的方法。SL74—95《水利水电工程钢闸门设计规范》编制说明中精确计算公式的约束条件与GB50017—2003《钢结构设计规范》对有侧移及无侧移的规定不符。传统的无侧移屈曲及有侧移屈曲为框架柱屈曲的两个极端(限)状态,实际工况的框架柱的屈曲应该属于在一定抗侧刚度下的屈曲,其屈曲模态一定介于无侧移和有侧移这两种极端状态之间,为有限侧移的屈曲模态。根据弧形钢闸门主横梁门式框架的构造特征及GB50017—2003《钢结构设计规范》的规定,弧形钢闸门主横梁门式框架的屈曲模态为弱支撑框架有限侧移反对称屈曲。

1.2 公式推导

根据能量法、势能驻值原理及里兹法建立有限侧移反对称屈曲框架柱计算长度系数实用计算公式,计算简图如图2所示。

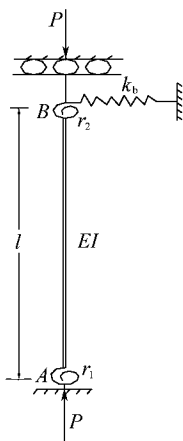


图2 可移动弹簧铰构件计算简图

有限侧移框架柱计算长度系数实用计算方法应变能表达式为^[5]

$$U = \int_0^l \frac{EI}{2} (y'')^2 dx + \frac{1}{2} r_1 \theta_1^2 + \frac{1}{2} r_2 \theta_2^2 + \frac{1}{2} k_b \delta^2 \quad (1)$$

式中: $r_1 \theta_1$ 和 $r_2 \theta_2$ 分别为柱脚和柱顶的抗弯力矩, r_1 为柱脚支座抗弯弹簧系数, r_2 为柱顶支座抗弯弹簧系数; k_b 为柱顶支座抗侧移弹簧系数。

主弯矩对有侧移反对称框架屈曲荷载的影响很小,常可忽略不计^[3-5],故外力势能表达式为

$$V = -W = -\frac{P}{2} \int_0^l (y')^2 dx \quad (2)$$

根据能量原理及势能驻值原理可得

$$\Pi = U + V \quad (3)$$

$$\delta \Pi = 0 \quad (4)$$

根据计算模型假设,主横梁门式框架柱的约束为柱下端弹性铰接约束,上端为有限侧移弹性铰接约束,如图2所示,满足弧形钢闸门主框架柱端约束的挠屈曲线可假定为

$$y = c_1 \sin \frac{\pi z}{l} + c_2 \sin \frac{\pi z}{2l} \quad (5)$$

经验证,式(5)满足柱脚弹性铰支柱端有限侧移弹性铰约束的模型假设约束条件。

根据现行《规范》简化 $R_1 = \frac{r_1 l}{EI}$, $R_2 = \frac{r_2 l}{EI}$, $R = \frac{k_b l^3}{EI}$, $k = \frac{P}{EI}$, 式(5)代入式(3)和式(4)化简后为

$$(kl)^4 - a(kl)^2 + b = 0 \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} a = 10.72 + 2.81 R_1 + 2.44 R_2 + 0.99 R \\ b = 8.31 + 9.67 R_1 + 6.02 R_2 + 9.77 R + 1.98 R_2 R + 4.88 R_1 R_2 + 1.98 R_1 R \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)解得

$$(kl)^2 = \frac{a - \sqrt{a^2 - 4b}}{2} \quad (8)$$

根据文献[4-5],计算长度系数可表达为

$$\mu = \frac{\pi}{kl} = \frac{\sqrt{2}\pi}{\sqrt{a - \sqrt{a^2 - 4b}}} \quad (9)$$

式(9)即为弧形钢闸门主横梁门式框架柱计算长度系数的实用计算公式。

1.3 有侧移反对称屈曲模态框架柱计算长度系数实用计算公式的探讨

式(9)实质上为有限侧移反对称屈曲模态框架柱计算长度系数的实用计算公式。另外,根据式(9)可推导出一个新的有侧移反对称屈曲模态框架柱计算长度系数的实用计算公式。

根据有侧移屈曲柱端约束条件,可以令 $R = 0$, 代入式(7)得

{ a有侧移 = 10.72 + 2.81R1 + 2.44R2
b有侧移 = 8.31 + 9.67R1 + 6.02R2 + 4.88R1R2 (10)

将式(10)代入式(9),可直接计算有侧移反对称屈曲模态框架柱计算长度系数。

当 $R_1 = 0$ 时,主框架梁柱线刚度比 K_b 在常用工程范围($K_b = 1 \sim 10$)内式(9)计算误差不是很大,最大误差为 1.9%,当 K_b 太小时,误差较大。 R_1 较小时式(9)计算误差可以满足工程精度要求。

1.4 参数的确定

参数 R_1, R_2, R 的合理确定对式(9)的使用关系重大,参数 R_1, R_2, R 的确定与系数 r_1, r_2, k_b 有关。当柱脚采用球铰时为铰接;当采用圆柱铰时,一部分视为铰接,一部分视为弹性支撑。根据文献[2],有限元计算结果显示两种不同柱铰支撑条件对支臂临界荷载几乎没有影响。一般弧形钢闸门支铰可认为铰接, $r_1 = 0$ 即 $R_1 = 0^{[1]}$;主框架柱与横梁为刚性连接,屈曲模态为反对称屈曲, $r_2 = \frac{6EI_b}{l_b}$, 即 $R_2 = \frac{6EI_b/l_b}{EI_c/l_c} = 6K_b$, 其中 $K_b = \frac{EI_b/l_b}{EI_c/l_c}$ 为梁与柱的线刚度比; k_b 为实际橡皮止水的抗侧移弹簧系数,可按实际橡皮止水弹簧系数确定后计算 R 值,也可参考规范图表给出 R 值。

2 算例及公式精度分析

2.1 算例计算

弧形钢闸门两侧止水弹簧起作用时 $R = 9.8343$, 一侧止水弹簧起作用时 $R = 4.9172$, $R_1 = 0$, $R_2 = 6K_b$, 分别计算 $K_b = 4$ 时柱的计算长度系数。现行《规范》推荐主横梁门式弧形钢闸门支臂计算长度系数取值范围为 $1.2 \sim 1.5^{[1]}$ 。

将 R, R_1, R_2 分别代入式(7),计算得 a, b 后代入式(9),计算结果及现行《规范》说明中精确计算公式计算结果(以下简称精确值)见表 1。

表 1 两类主横梁门式弧形钢闸门支臂计算长度系数

R	μ		精度/%	
	精确值 (最大值)	本文公式 计算值	本文公式计算值 与精确值误差	现行《规范》推荐值 与精确值误差
9.8343	1.001	0.972	- 2.89	19.88 ~ 49.85
4.9172	1.255	1.240	- 1.19	- 4.38 ~ 19.52

2.2 精度分析

通过大量算例分析,式(9)在工程实用弧形钢闸门主框架梁柱线刚度比 $K_b = 4 \sim 10$ 常用范围内计算柱的计算长度系数与精确值最大误差为 - 3.7%,精度满足工程要求;式(9)对单层单跨柱脚铰接柱顶刚接框架柱的计算长度系数的计算精度在 $K_b = 0 \sim 20$ 常用范围内满足工程要求。当弧形钢闸门主框架柱的柱顶为一侧弹簧起作用时计算精度在 $K_b = 0 \sim 20$ 常用范围内可达到工程精度要求;当弧形钢闸门主框架柱的柱顶为两侧弹簧起作用时,本文公式计算误差偏大,但在 $K_b = 4 \sim 10$ 常用范围内,计算精度可达到工程精度要求。现行《规范》推荐值与精确值的误差最大接近 50%,很不精确。

3 结 语

本文结合现行 GB 50017—2003《钢结构设计规范》,分析弧形钢闸门主框架柱的屈曲模态,利用能量法提出弧形钢闸门主框架柱计算长度系数的实用计算公式。该公式形式简洁、计算结果准确及物理概念清晰,可以扩展到有侧移框架柱计算长度系数的计算。本文计算公式计算结果偏小,可以参考文献[5]对其进行剪切变形、不同荷载分布条件等修正,使其结果更加符合具体工况。本文公式是基于弧形钢闸门矩形主框架模型推导的,适用于计算弧形钢闸门 I 形主框架支臂的计算长度系数;通过考虑轴力对横梁强度的折减,适用于计算弧形钢闸门梯形主框架支臂的计算长度系数;当弧形钢闸门主框架柱的柱顶为两侧弹簧起作用时,其计算模型有待更进一步的研究,主要原因是需要考虑水平荷载对框架稳定性的影响及框架整体稳定的二阶效应即 $P - \Delta$ 效应等因素的影响。现行《规范》说明中对参数 R_1, R_2 和 R 的确定比较粗糙,有必要进一步详细研究。

参考文献:

[1] SL74—95,水利水电工程钢闸门设计规范[S].
[2] 曹青,才君眉,王光纶.弧形钢闸门支臂空间屈曲荷载影响因素的研究[J].水力发电,2002(1):33-36.
[3] 李文娟,沈炜良,马兆敏.弧形钢闸门三维有限元分析[J].山东大学学报:工学版,2003,33(3):265-270.
[4] GB 50017—2003,钢结构设计规范[S].
[5] 陈骥.钢结构稳定理论与设计[M].北京:科学出版社,2001:116-202.

(收稿日期:2005-05-19 编辑:熊水斌)