

钢闸门面板弹塑性调整系数的研究

王正中

(西北农业大学水利与建筑工程学院, 陕西杨陵 712100)

摘要 通过对弹塑性调整系数 α 规范值、按弹塑性薄板理论和弹性薄膜理论确定的值, 以及有限元计算和实验研究结果的全面分析, 提出四边固支钢面板的极限承载力应按承受弯应力、剪应力和中曲面内应力的大挠度中等刚度板的屈服模式确定。在确定弹塑性调整系数 α 合理值时, 应考虑材料的强度储备和结构的极限承载力两个方面, 从而求出更切合实际的弹塑性调整系数 α 的理论值, 此值可供设计和修订规范时参考。

关键词 钢闸门, 钢面板, 极限荷载, 大挠度理论, 弹塑性调整系数

中图分类号 TV663.4, TV34, TB125

1 问题的提出

钢闸门在水利水电及航运工程中应用非常广泛, 研究^[1]表明, 影响其整体经济性的主要因素之一是面板的厚度。为了充分发挥材料的潜力, 规范^[2]中已建议按弹性薄板理论进行设计, 将实际荷载除以约为1.5的弹塑性调整系数 α ; 但进一步的试验研究^[3]和理论研究^[4,5]表明: 该弹塑性调整系数的合理值取值不止1.4或1.5(与 a/b 有关), 而是大于该值。文献[4]中, 我们仅按薄板弯曲理论及结构塑性极限分析理论, 用屋顶形塑性铰线模式研究了 α 的合理取值。但文献[3]以及有限元计算^[6,7]均否定了该模式的合理性, 认为破坏是由弯矩和板内张力引起的, 屈服破坏形式呈“面包”状光滑曲面而无铰线形成; 加之该模式屈服范围较大, 同时没有考虑材料自身的强度储备。故本文按中等刚度板的大挠度理论, 分析其应力状态及极限荷载, 从而求出了更切合实际的 α 值, 供设计及制定规范参考。

2 大挠度下中等刚度板的基本微分方程

按大挠度理论考虑, 中等刚度板的应力状态可以看成是两种状态叠加的结果: 一是对应于沿板厚均匀分布的应力; 另一种是对应于弯曲应力。为方便, 用 σ_x^0 和 σ_y^0, τ^0 表示中曲面应力, 用 $\sigma'_x, \sigma'_y, \tau'$ 表示弯曲应力。若以板平面为 xy 平面, 垂直于板平面的方向为 z 轴正方向, 为求解方便, 根据大挠度下中等刚度板的基本微分方程^[8]及变分原理^[9], 将平衡微分方程表示为

$$\iint_{\mu} X \delta \tau w dx dy = 0 \tag{1}$$

$$\nabla^2 \nabla^2 \Phi = E [(\mathcal{J}W/\partial x \partial y)^2 - (\mathcal{J}w/\partial y^2) \cdot (\mathcal{J}w/\partial x^2)] \tag{2}$$

其中 $\sigma_x^0 = \mathcal{J}\Phi/\partial y^2, \sigma_y^0 = \mathcal{J}\Phi/\partial x^2, \tau^0 = -\mathcal{J}\Phi/\partial x \partial y$ (3)

收稿日期: 1994-04-27
校青年科学基金资助项目

$$\begin{cases} \sigma'_x = -Ez/(1-\mu^2) \cdot [(\partial^2 w/\partial x^2) + \mu \cdot (\partial^2 w/\partial y^2)] \\ \sigma'_y = -Ez/(1-\mu^2) \cdot [(\partial^2 w/\partial y^2) + \mu \cdot (\partial^2 w/\partial x^2)] \\ \tau' = -Ez/(1+\mu) \cdot (\partial^2 w/\partial x \partial y) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} X = D \nabla^2 \nabla^2 w - h \cdot [(\partial^2 \Phi/\partial y^2) \cdot (\partial^2 w/\partial x^2) - 2 \cdot (\alpha^2 \Phi/\partial x \partial y) \cdot (\partial^2 w/\partial x \partial y) \\ + (\partial^2 \Phi/\partial x^2) \cdot (\partial^2 w/\partial y^2)] - q \end{aligned} \quad (5)$$

$$D = Eh^3/12(1-\mu^2)$$

式中 E 为材料弹模; μ 为泊松比; w 为板的挠度函数。

3 四边固支矩形钢面板的解

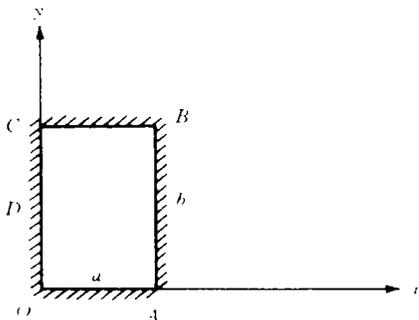
闸门面板每一小区格可看成法向均布荷载作用下的四边固支钢面板, 板边缘的位移与支承梁的变形协调一致, 在荷载方向上边缘保持为直线, 取附图坐标系, 根据边界条件: $x=0, x=a$ 时, $w=0, \partial w/\partial x=0$;

$y=0, y=b$ 时, $w=0, \partial w/\partial y=0$ 。

取一挠度的近似表达式:

$$w = f \sin \alpha x \cdot \sin \beta y \quad (6)$$

其中 $\alpha = \pi/a, \beta = \pi/b$ (7)



附图 板坐标布置

将(6)式代入应变协调式(2), 整理后得

$$\begin{aligned} \nabla^2 \nabla^2 \Phi = (Ef^2 \alpha^2 \beta^2 / 2) \cdot \cos 2\alpha x + \cos 2\beta y - \cos 4\alpha x - \cos 4\beta y \\ + \cos 4\alpha x \cos 2\beta y + \cos 2\alpha x \cos 4\beta y - 2\cos 2\alpha x \cos 2\beta y \end{aligned} \quad (8)$$

该方程的特殊解为

$$\begin{aligned} \Phi_1 = \{ (1/32) \cdot [(\beta^2/\alpha^2) \cdot \cos 2\alpha x + (\alpha^2/\beta^2) \cdot \cos 2\beta y] \\ - (1/512) \cdot [(\beta^2/\alpha^2) \cdot \cos 4\alpha x - (\alpha^2/\beta^2) \cdot \cos 4\beta y] \\ + (\alpha^2 \beta^2 / 32) \cdot [\cos 4\alpha x \cos 2\beta y / (4\alpha^2 + \beta^2) + \cos 2\alpha x \cos 4\beta y / (\alpha^2 + 4\beta^2) \\ - \alpha^2 \beta^2 \cos 2\alpha x \cos 2\beta y / 16(\alpha^2 + \beta^2)] \} \end{aligned} \quad (9)$$

设边缘的约束施加于板边的拉应力的平均值分别为 \bar{p}_y, \bar{p}_x , 则应考虑齐次方程 $\nabla^2 \Phi = 0$ 的解 Φ_2 , 则

$$\Phi_2 = \bar{p}_x x^2 / 2 + \bar{p}_y y^2 / 2 \quad (10)$$

显然, $\Phi_1 + \Phi_2$ 仍满足于应变协调方程, 故方程(8)的解为:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (11)$$

根据应力函数(3)式, 知中曲面内的应力为

$$\begin{aligned} \sigma'_x &= \partial^2 \Phi / \partial y^2 \\ &= -Ef^2 \alpha^2 \{ (1/8) \cdot \cos 2\beta y - (1/32) \cdot \cos 4\beta y \\ &\quad + (\beta^4/8) \cdot [\cos 4\alpha x \cos 2\beta y / (4\alpha^2 + \beta^2)^2 + 4\cos 2\alpha x \cos 4\beta y / (\alpha^2 + 4\beta^2)^2] \\ &\quad - \beta^4 \cos 2\alpha x \cos 2\beta y / 4(\alpha^2 + \beta^2)^2 \} + \bar{p}_y \end{aligned} \quad (12)$$

为了确定边缘对板的拉应力的平均值,必须从边缘变形入手分析;由于四边的固定,以致于各对边的相对位移为零,得

$$\bar{p}_x = 3\pi^2 E f^2 / 32(1 - \mu^2) b^2 \cdot (\mu / \lambda^2 + 1) \quad (13)$$

$$\bar{p}_y = 3\pi^2 E f^2 / 32(1 - \mu^2) b^2 \cdot (1 / \lambda^2 + \mu) \quad (14)$$

将(13)式和(14)式代入(10)式,根据(11)式即可求出应力函数 Φ 的表达式,将 Φ, w 代入(5)式,得 X 的表达式(因该表达式很复杂,故这里省略)。将 X 的表达式代入平衡方程的变分形式(1)式,取钢材的 $\mu=0.3$,并进行积分整理得

$$q_i^* = [6.5(1/\lambda^2 + 1) + 12.2/(1 + \lambda^2)^2 + 7.5(1/\lambda^4 + 0.6/\lambda + 1)] \xi^3 + 9[3(1/\lambda^4 + 1) + 2/\lambda^2] \xi \quad (15)$$

$$\text{其中} \quad \xi = f/h, \lambda = a/b, q_i^* = (q/E)(b/h)^4 \cdot (1 - \mu^2) \quad (16)$$

4 极限荷载确定

由实验可知,四边固支钢面板在弹性阶段总是长边中点应力最大,亦即该点最先达到屈服极限,依次是跨中或短边中点,按板的弯曲理论推求其极限荷载时,我们曾采用塑性铰线法的屋顶型破坏模式,该模式的塑性影响区较大,不能满足正常使用极限要求。为了能反映实际的“面包”状光滑曲面屈服破坏特征,本研究采用长边中点板截面进入塑性状态,即按结构塑性极限分析理论的拉弯构件的极限条件进行处理。

4.1 长边中点各应力计算

长边中点坐标: $x=0, y=b/2$ 。中曲面内应力,由(12)式(13)式得

$$\sigma_x^0 = h^2 E \pi^2 \xi^2 / a^2 [3(\mu + \lambda^2) / 32(1 - \mu^2) + 5/32 + \lambda^4 / 4(1 + \lambda^2)^2 + \lambda^4 / 2(1 + 4\lambda^2)^2 - \lambda^4 / 8(4 + \lambda^2)^2] \quad (17)$$

弯曲应力,由(6)式及(4)式可得

$$\sigma_x = E h \cdot (1 - \mu^2) \cdot 2a^2 f = 2\pi^2 E \xi h^2 / a^2 (1 - \mu^2) \quad (18)$$

4.2 极限荷载确定

在弯矩和轴力共同作用下构件横截面完全屈服的极限条件^[10]是:

$$n + m = 1 \quad (19)$$

其中 $m = M_x / M_p = \sigma'_x / (1.5\sigma_s)$; $n = N / N_p = \sigma_x^0 / \sigma_s$ 。

由式求得极限状态下相对挠度 ξ :

$$\xi = \left\{ \sqrt{1.21 + 1.5\sigma_s a^2 / E \pi^2 h^2 \cdot [(1.8 + \lambda^4) / 9.6 - \lambda^4 / 4(1 + \lambda^2)^2]} - 1.1 \right\} / [(1.8 + \lambda^2) / 9.6 - \lambda^4 / 4(1 + \lambda^2)^2] \quad (20)$$

根据(20)式和(15)式可以求得 q_i^* ,再由(16)式得

$$q_i = 1.1 \lambda^4 E (h/a)^4 \cdot q_i^* \quad (21)$$

显然,该极限承载力 q_i 不仅与矩形的宽长比(λ)和板厚宽比(h/a)有关,同时也与材料的力学性能 E, σ_s, μ 有关。

根据文献[4]可知,矩形薄板在法向均布荷载作用下,弹性极限荷载为

$$q_e = 32(\lambda^4 + 4\lambda^2 / 7 + 1) \cdot (h/a)^2 \cdot [\sigma] / 21 \quad (22)$$

实际工程中,主要应力不许超过容许应力 $[\sigma]$,而 $[\sigma] = \sigma_s / 1.5$ 。

5 四边固支矩形钢面板弹塑性调整系数

前面已经根据弹性薄板的弯曲理论(认为是刚性板)求出了弹性极限荷载 q_e , 也根据大挠度理论(认为是中等刚度板, 这更接近实际一些)求出了塑性极限荷载 q_s 。根据弹塑性调整系数的定义, 知弹塑性调整系数。

$$\alpha_d = q_s/q_e \quad (23)$$

对于低碳钢, 暂取 $E=210 \text{ GPa}$, $\sigma_s=240 \text{ MPa}$

$$\alpha_d = [948(h/a)^2 q_s^* \cdot \lambda^4]/(\lambda^4 + 4\lambda^2/7 + 1) \quad (24)$$

(24)式即为按大挠度理论计算四边固支钢面板弹塑性调整系数的理论公式, 若 a/h 取 75, 100, 125, 150 值, 计算出 α 随 λ 变化值如附表。

附表 α_d 计算表

宽厚比 a/h	长宽比 l/λ									
	1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
75	2.28	2.20	2.18	2.17	2.16	2.16	2.15	2.15	2.15	2.15
100	2.50	2.49	2.48	2.47	2.47	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46
125	3.05	3.06	3.06	3.06	3.07	3.07	3.07	3.07	3.07	3.07
150	3.95	4.01	4.02	4.03	4.04	4.05	4.05	4.05	4.05	4.05

6 结 论

(1)按大挠度理论求出的弹塑性调整系数 α_d , 主要由板的宽厚比 a/h 和反映材料性质的 E, σ_s 决定, 而矩形的长宽比影响很小。

(2)按大挠度板弯曲理论及“面包”状曲面屈服模式真实地反映了钢闸门面板的受力机制及正常使用要求, 得出了科学的弹塑性调整系数 α_d 为修订规范提供科学依据, 亦为闸门整体优化设计创造了条件。

感谢西北工业大学张志镇教授、同济大学翁智远教授的帮助。

参 考 文 献

- 1 刘世康, 张家瑞. 主横梁式弧形闸门的优化设计. 水力发电, 1984, (6): 32~39
- 2 水利电力部. 水利水电工程钢闸门设计规范 SDJ13-78. 北京: 水利电力出版社, 1987
- 3 翁良正, 陶碧露. 钢闸门面板试验主要成果及建议. 水力发电, 1986(10): 28~36
- 4 王正中, 徐永前. 四边固支矩形钢面板弹塑性调整系数理论值. 水力发电, 1989(5): 39~44
- 5 王正中, 赵延凤, 徐永前. 按薄膜结构对钢面板弹塑性调整系数的探讨, 西北水资源与水工程, 1992(4): 39~46
- 6 王正中, 徐永前. 按薄膜结构对高水头平面钢闸门设计的探讨. 陕西水力发电, 1992, 8(1): 24~32
- 7 王正中, 赵延凤. 刘家峡深孔弧门按双向平面主框架分析计算. 水力发电, 1992, (7): 41~45
- 8 黄克智. 板壳理论. 北京: 清华大学出版社. 1987. 311~342
- 9 钱伟长. 变分法及有限元. 北京: 科学出版社. 1980. 176~184
- 10 徐秉业, 刘仁声. 结构塑性极限分析. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985. 241~247

Adjustment Factors for Elastoplasticity of Steel Gate Plates

Wang Zhengzhong

(The College of Hydraulic and Architectural Engineering, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi, 712100)

Abstract Based on the comprehensive analysis of the research achievements of the standard method, the finite element method, theory of small deflection and model test, this paper suggests that the ultimate load of the rectangular steel plate fixed at four

sides should be determined by the yield model of the large deflection plate with moderate rigidity including the bending stress, shearing stress and tensile stress. And both the material strength and the ultimate load of the structure should be taken into consideration so as to figure out the theoretical values of elast plastic adjustment factors, which can offer the references for the designing and revision of the standard.

Key words steel gate, steel plate, ultimate load, theory of large deflection, elast plastic adjustment factor

·简讯·

本刊在中国科学引文数据库农林类核心期刊中名列第21位

据中国科学院文献情报中心中国科学引文数据库课题组统计,1989~1991年中国科学引文数据库中全国农林类期刊共有768种。采用绝对数量法对该类期刊的引文统计分析确定,农林类核心期刊为128种。《西北农业大学学报》在核心期刊中列居第21位。现将前50名核心期刊被引序次公布如下:

中国科学引文数据库农林类核心期刊(1989~1991)

序次	刊名	被引频次*				序次	刊名	被引频次*			
		1989	1990	1991	89~91			1989	1990	1991	89~91
1	中国农业科学	111(1)	111(2)	146(1)	368	25	浙江农业大学学报	15(30)	16(33)	29(14)	60
2	土壤学报	85(4)	131(1)	125(2)	341	27	江苏农业科学	17(24)	26(17)	16(38)	59
3	兽类学报	100(2)	74(4)	111(3)	285	27	土壤学进展	20(20)	17(32)	22(24)	59
4	作物学报	85(4)	71(5)	108(4)	264	29	南京林业大学学报	11(38)	25(19)	21(27)	57
5	林业科学	66(6)	100(3)	88(5)	254	30	华南农业大学学报	13(32)	23(24)	18(33)	54
6	水产学报	93(3)	70(7)	56(9)	219	30	中国油料	14(31)	22(26)	18(33)	54
7	北京农业大学学报	54(10)	71(5)	62(8)	187	32	热带作物学报	17(24)	14(38)	22(22)	53
8	园艺学报	56(7)	48(10)	73(7)	177	33	西南农业大学学报	9(50)	19(29)	23(23)	51
9	南京农业大学学报	36(11)	51(9)	85(6)	172	34	中国兽医科技	9(50)	16(33)	25(20)	50
10	北京林业大学学报	55(8)	60(3)	56(9)	171	35	土壤肥料	9(50)	15(36)	19(30)	43
11	淡水养鱼	55(8)	35(15)	29(14)	119	36	蚕业科学	11(38)	11(48)	19(30)	41
12	土壤通报	32(12)	39(11)	31(13)	102	37	中国蔬菜	10(43)	16(33)	14(43)	40
13	土壤	29(14)	35(16)	37(12)	101	38	湖南农业大学学报	10(43)	13(44)	16(38)	39
14	畜牧兽医学报	30(13)	24(22)	38(11)	92	38	农业环境保护	13(32)	14(38)	12(49)	39
15	水土保持通报	16(26)	39(11)	29(14)	84	38	种子	3(-)	22(26)	14(43)	39
16	林业科技通讯	19(21)	38(13)	26(19)	83	41	江苏农业学报	8(57)	13(44)	17(37)	38
17	农业机械学报	21(17)	25(19)	29(14)	75	41	中国果树	19(21)	12(47)	7(77)	38
18	原子能农业应用	22(16)	25(19)	22(24)	69	43	东北农学院学报	16(26)	10(54)	9(60)	35
19	华中农业大学学报	18(23)	23(24)	27(18)	68	44	浙江农业科学	10(43)	8(63)	16(38)	34
20	中国水土保持	27(15)	19(31)	21(27)	67	45	福建农学院学报	10(43)	7(75)	16(38)	33
21	水土保持学报	21(17)	22(26)	23(23)	66	45	上海农业科学	8(57)	14(38)	11(54)	33
21	西北农业大学学报	21(17)	20(29)	25(20)	66	47	华北农学报	5(83)	8(63)	19(30)	32
23	东北林业大学学报	16(26)	26(17)	20(29)	62	47	杂交水稻	8(57)	9(58)	15(42)	32
24	农业工程学报	10(43)	37(14)	14(43)	61	49	核农学报	3(-)	10(54)	18(33)	31
25	大豆科学	12(35)	24(22)	24(22)	60	50	北京农业工程大学学报	5(83)	15(36)	10(56)	30

* 括号内的数字表示该刊当年被引频次的序次,短横表示该刊未列入当年核心期刊。

(刘佩芬)