

水闸钢闸门可靠指标及分项系数的校准

周美英¹, 周建方¹, 李典庆²

(1. 河海大学机电工程学院, 江苏 常州 213022; 2. 上海交通大学船舶与海洋工程学院, 上海 200030)

摘要:分析水闸钢闸门所受静水压力的统计参数, 采用 JC 法对水闸钢闸门构件的可靠指标进行初步校准, 计算结果表明: 闸门构件可靠指标满足一级建筑物的安全水准; 提出钢闸门结构设计目标可靠指标的取值建议. 根据可靠指标及用钢量与现行规范校准的目标可靠指标及用钢量相比变化不大的原则, 采用最小二乘法优化得到结构系数的取值为 1.45.

关键词:钢闸门; 可靠指标; 分项系数; 结构系数; 校准

中图分类号:TV663.4

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2003)06-0017-04

有关文献^[1,2]对在水库中工作的钢闸门进行了可靠指标的校准, 并确定了相应的分项系数设计表达式. 本文则主要以在水闸中工作的钢闸门为研究对象, 首先分析钢闸门所受的静水压力的统计参数, 在此基础上采用 JC 法对钢闸门各种构件进行了可靠指标校准, 提出了结构设计的目标可靠指标建议值. 然后按照 GB50199-94《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》(以下简称《水工统标》)规定的原则, 着重对分项系数设计表达式中结构系数的取值进行了计算, 提出了结构系数的取值建议. 本文为闸门设计规范采用概率极限状态设计法提供了一些基本思路, 结果可供闸门设计规范修订时参考.

1 荷载的统计参数

文献[3]对水闸上游水位变化规律进行了统计分析, 得到上游水位变化规律及水闸上游设计水位与多年平均最高水位之间的关系. 由于黄海侧和长江侧设计潮位数据较少, 其误差较大, 应该进一步分析. 沿内河水闸水位的统计数据较多, 可信度大, 因此本文主要利用内河水闸水位的统计参数对在内河中工作的闸门进行可靠指标及分项系数的校准.

1.1 静水压力的统计参数

1.1.1 静水压力的数字特征

根据文献[3]对 69 座水闸内河侧最高水位的统计, 内河上游设计水位 Z_d 与其多年平均最高水位 Z_u 之差 $Z_d - Z_u$ 的均值、标准差、变异系数分别为 0.5365 m, 1.658 9 m, 3.091 8, 且 Z_d 与 Z_u 有如下的关系:

$$Z_d = -0.34 + 1.12 Z_u \quad (1)$$

对闸门结构, 所关心的是作用于闸门结构上的水头 Z_s 的统计参数, 因此必须将水位转换为水头, 即有

$$Z_s = Z - Z_0 \quad (2)$$

式中: Z 为闸门上游水位, m; Z_0 为闸门下游水位, m.

根据《水工统标》和水工建筑物荷载设计规范知静水压力分项系数为 1, 因此设计水位即为标准水位, 即有 $Z_d = Z_{\text{标准}}$, 从而设计水头为

$$Z_{s\text{设计}} = Z_{\text{标准}} - Z_{0\text{设计}} \quad (3)$$

令 $K_{Z_s} = u_{Z_s} / Z_{s\text{设计}}$, 即水头均值与设计值之比, 联立式(2)和式(3), 经过推导可得

$$K_{Z_s} = 0.893 + \frac{0.304 - 0.107 Z_{0\text{设计}}}{Z_{s\text{设计}}} \quad (4)$$

由于内河闸门一般较小, 这里取 $Z_{s\text{设计}} = 5$ m, 10 m 来计算(这两个数据包括了绝大部分情况). 由于 $Z_{0\text{设计}}$ 一般较小, 可得:

$$K_{Z_s} \approx 0.95 (Z_{s\text{设计}} = 5 \text{ m})$$

$$K_{Z_s} \approx 0.92 (Z_{s\text{设计}} = 10 \text{ m})$$

另有

$$\sqrt{\sigma_{Z_d}^2 + \sigma_{Z_u}^2} = 1.6589 \quad (5)$$

式中: $\sigma_{Z_d}, \sigma_{Z_u}$ 分别为 Z_d, Z_u 的标准差. 由于 Z_d 与 Z_u 相差不大, 可以近似取 $\sigma_{Z_d} = \sigma_{Z_u}$, 再结合式(3)可得水头的变异系数 δ_{Z_s} 为

$$\delta_{Z_s} \approx 0.26 (Z_{s\text{设计}} = 5 \text{ m})$$

$$\delta_{Z_s} \approx 0.13 (Z_{s\text{设计}} = 10 \text{ m})$$

由于文中水位的数据是多年的统计数据,因此上述 K_{Z_s}, δ_{Z_s} 可以近似作为设计基准期内静水压力的统计参数 $K_{Z_s T}, \delta_{Z_s T}$. 分别取 $K_{Z_s T} = 0.90, 0.95$, 变异系数取 $\delta_{Z_s T} = 0.10, 0.15, 0.20, 0.25$.

1.1.2 静水压力的分布

文献[3]说明内河最高水位总体不拒绝正态分布、对数正态分布、极值 I 型分布,但正态分布最优,所以本文也将门前水位作为正态分布.由于闸门上的作用水头与水位具有式(2)的线性关系,所以二者具有相同的分布,即 Z 为正态分布时, Z_s 也为正态分布,又由于静水压力与水头成线性关系,所以静水压力也为正态分布.

1.2 其他荷载

在闸门运行过程中,除了静水压力外,还有一些其他荷载,如泥沙压力、波浪压力、启闭力等.对于这些荷载,目前还缺乏统计参数,本文统一将它们归为 1 个荷载变量 Q ,文献[4]将其设计基准期内最大值的均值与标准值之比取为 $K_{QT} = 0.7$,变异系数为 $\delta_{QT} = 0.29$,也为正态分布.

在对现行闸门规范进行可靠指标校准时,根据《水工统标》中有关荷载效应组合的规定,其他荷载应该取年内的统计参数,因此应该采用文献[5]中的公式将上述设计基准期内统计参数转化为年内的统计参数,计算可得荷载 Q 年内的统计参数 $K_{Qi} = 0.53, \delta_{Qi} = 0.14$,为正态分布.

2 抗力的统计参数

结构构件抗力的随机性是由材料机械性能和几何尺寸的变异以及结构设计计算模式的不确定性引

起的,其统计参数应由相应的设计规范进行调查统计或试验分析求出.文献[6]对闸门构件抗力的统计参数进行了分析,认为将抗力的统计参数取为 GB50068-2001《建筑结构可靠度设计统一标准》提供的数据是可行的,具体数值见文献[6],抗力为对数正态分布.

3 闸门构件的可靠指标

对所有可能的荷载组合进行校准,显然是不切实际的,应以一些基本的、起主要作用的荷载组合进行校准.在闸门结构设计中,最基本的组合是仅有静水压力水头 Z_s ,它起控制作用.为了使结果更为准确,本文还对 Z_s 和 Q 组合进行了校准,相应的极限状态方程为

$$R - S_{Z_s} = 0 \tag{6}$$

$$R - S_{Z_s} - S_Q = 0 \tag{7}$$

式中: S_{Z_s} 是静水压力引起的荷载效应; S_Q 是 Q 引起的荷载效应.在 Z_s 和 Q 组合时,参考有关工程实例可得荷载效应比 $\rho = S_{Z_s K} / S_{QK}$ 为 0.01 ~ 0.30,本文取 $\rho = 0.01, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$ 来校准构件的可靠指标.

表 1 是仅有静水压力作用下各构件的可靠指标,可以看出, $K_{Z_s T}, \delta_{Z_s T}$ 8 种组合下各构件可靠指标的平均值与用 $K_{Z_s T} = 0.95, \delta_{Z_s T} = 0.15$ 算得的可靠指标值相差不大于 0.05.为了简化计算,即取 $K_{Z_s T} = 0.95, \delta_{Z_s T} = 0.15$ 作为静水压力的统计参数.采用式(7)计算出 Z_s 和 Q 组合下各构件的可靠指标(见表 2),表 2 中可靠指标是 7 个荷载效应比下的平均值.

综合表 1 与表 2,可以得到闸门总体目标可靠指标: 3.385(Q235), 3.550(Q345).考虑规范制定的

表 1 静水压力作用下各构件的可靠指标

构件	钢材 种类	可靠指标 β 值								平均
		$K_{Z_s T} = 0.90$				$K_{Z_s T} = 0.95$				
		$\delta_{Z_s T} = 0.10$	0.15	0.20	0.25	$\delta_{Z_s T} = 0.10$	0.15	0.20	0.25	
轴 拉	Q235	4.215	3.606	3.113	2.719	3.841	3.275	2.817	2.453	3.255
	Q345	4.546	3.845	3.291	2.856	4.148	3.494	2.979	2.578	3.467
轴 压	Q235	4.032	3.454	2.983	2.606	3.663	3.127	2.691	2.344	3.113
	Q345	4.209	3.488	2.939	2.520	3.786	3.123	2.621	2.240	3.116
偏压(平面内)	Q235	4.142	3.556	3.078	2.694	3.775	3.230	2.786	2.431	3.212
	Q345	4.464	3.790	3.253	2.829	4.073	3.445	2.946	2.554	3.419
偏压(平面外)	Q235	4.026	3.553	3.145	2.802	3.705	3.262	2.878	2.558	3.241
	Q345	4.091	3.601	3.180	2.829	3.765	3.305	2.911	2.582	3.283
型钢梁(塑性破坏)	Q235	4.076	3.588	3.168	2.818	3.750	3.292	2.898	2.571	3.270
	Q345	4.315	3.771	3.313	2.935	3.973	3.463	3.033	2.679	3.435
型钢梁(弹性失稳)	Q235	3.980	3.457	3.019	2.660	3.634	3.147	2.739	2.407	3.130
	Q345	4.272	3.673	3.183	2.789	3.905	3.346	2.889	2.524	3.323
组合梁(受弯破坏)	Q235	4.141	3.570	3.100	2.720	3.780	3.248	2.811	2.459	3.229
	Q345	4.452	3.796	3.269	2.851	4.068	3.456	2.966	2.579	3.430
组合梁(受剪破坏)	Q235	3.511	3.086	2.718	2.411	3.192	2.798	2.457	2.173	2.793
	Q345	3.725	3.251	2.849	2.517	3.392	2.951	2.578	2.271	2.942

表2 Z_s 和 Q 组合下各构件的可靠指标

钢材种类	可靠指标 β 值								平均
	轴拉	轴压	偏压		型钢梁		组合梁		
			平面内	平面外	塑性破坏	弹性失稳	受弯破坏	受剪破坏	
Q235	3.936	3.779	3.881	3.843	3.881	3.765	3.890	3.372	3.615
Q345	4.194	3.852	4.133	3.895	4.077	3.998	4.135	3.549	3.780

一般原则,对上述数值进行处理,建议将目标可靠指标定为:3.4(Q235),3.6(Q345)。

以上是对安全系数 $k = 1.5$ (安全级别为Ⅱ级)的闸门进行的可靠指标校准.对 $k = 1.67$ (安全级别为Ⅰ级)的大型工作闸门及 $k = 1.43$ (安全级别为Ⅲ级)的小型闸门也分别进行了计算.限于篇幅,这里不给出具体结果.对于大型工作闸门,其可靠指标比 $k = 1.5$ 时增加 0.7,对于小型工作闸门,其可靠指标比 $k = 1.5$ 时减小 0.3.据此可以得到大型工作闸门的目标可靠指标为:4.1(Q235),4.3(Q345),小型闸门的目标可靠指标为:3.1(Q235),3.3(Q345)。

对静水压力为对数正态分布及极值Ⅰ型分布进行计算,结果见图1.由图1可以看出,静水压力为正态分布时可靠指标最大;除了受剪构件可靠指标较低外,其余构件的可靠指标基本一致.为了反映荷载效应比 β 随 ρ 的变化情况,图2给出了轴拉构件在 Z_s 和 Q 组合下 β 随 ρ 的变化情况.可以看出, β 随 ρ 的增大而增大, β 与 ρ 近似成线性关系.当 ρ 在 0.01~0.30 之间变化时, β 增大 0.9 左右. β 对 ρ 的取值比较敏感,应进一步研究 ρ 的取值。

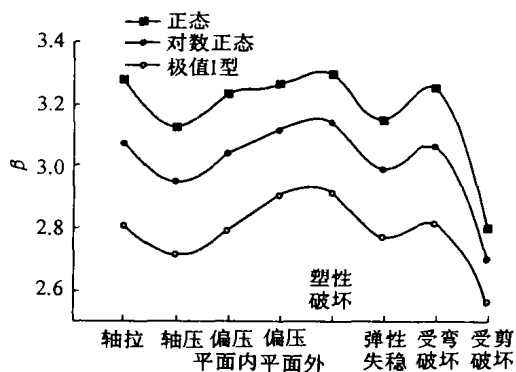


图1 静水压力取不同分布时各构件的可靠指标

4 分项系数的确定

由于闸门设计规范的制定必须以《水工统标》的

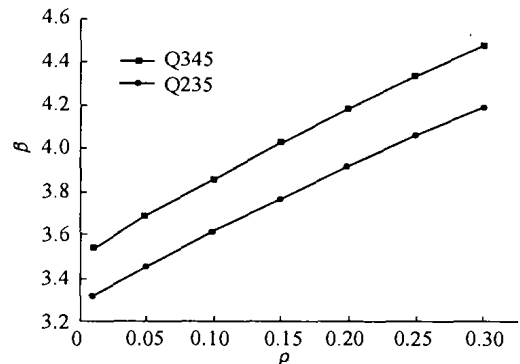


图2 可靠指标 β 随荷载效应比 ρ 的变化

规定为准则,因此当闸门设计规范采用概率极限状态设计原则时,也必须按照《水工统标》规定的承载能力极限状态基本组合的设计表达式设计,即有:

$$\gamma_0 \Psi S(\gamma_c F_{ck}, \gamma_Q F_{Qk}, a_k) \leq \frac{1}{\gamma_d} R\left(\frac{f_k}{\gamma_m}, a_k\right) \quad (8)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; Ψ 为设计状况系数; γ_c, γ_Q 分别为永久作用及可变作用的分项系数; γ_d 为结构系数; γ_m 为材料性能分项系数。

分项系数 $\gamma_0, \Psi, \gamma_c, \gamma_m$ 可以直接取文献[2]的数值,这里就不再赘述.参考 DL5077-1997《水工建筑物荷载设计规范》,可以将荷载 Q 的分项系数 γ_Q 取为 1.2.由于荷载的统计参数不同,因此结构系数 γ_d 不能直接取文献[2]的数据,而应另作分析.根据文献[2]给出的 γ_d 的计算方法,可以得到水闸闸门的结构系数,见表3。

表3 钢闸门在不同荷载组合下的 γ_d

钢材种类	目标可靠指标	不同荷载组合下的 γ_d		γ_d 平均值	γ_d 建议值
		Z_s	Z_s 和 Q		
Q235	3.4	1.477	1.395	1.436	1.45
Q345	3.6	1.470	1.367	1.419	1.40

4.1 可靠指标的比较

为了比较所取结构系数的合理性,将上面所定的结构系数数值代入式(8),按式(8)设计的构件可靠指标值与原规范校准的可靠指标值的比较见表4。

表4 可靠指标的比较

钢材种类	荷载组合	规范校准的目标可靠指标 β_r	按式(8)设计的可靠指标 β_d		$\beta_d - \beta_r$	
			$\gamma_d = 1.40$	$\gamma_d = 1.45$	$\gamma_d = 1.40$	$\gamma_d = 1.45$
Q235	Z_s	3.155	3.024	3.225	-0.131	0.070
Q345	Z_s	3.302	3.085	3.296	-0.217	-0.006
Q235	Z_s 和 Q	3.615	3.610	3.818	-0.005	0.208
Q345	Z_s 和 Q	3.780	3.709	3.928	-0.071	0.148

由表4可以看出,当 $\gamma_d = 1.45$ 时,按式(8)设计的构件可靠指标比原规范校准的可靠指标略高一些.当 $\gamma_d = 1.40$ 时,按式(8)设计的构件可靠指标比原规范校准的可靠指标略低,但总体变化不大.考虑到目前各规范可靠指标应适当提高的建议^[7],本文将 γ_d 暂定为1.45.

4.2 用钢量的比较

为了保证修订规范的连续性,按式(8)设计时的用钢量 A_2 应与按现行闸门设计规范设计时的用钢量 A_1 相当或差别不大,根据文献[2]的计算方法可得两者的用钢量之比.

静水压力作用时:

$$Q235, \gamma_d = 1.40 \text{ 时: } A_2/A_1 = 0.974$$

$$Q235, \gamma_d = 1.45 \text{ 时: } A_2/A_1 = 1.009$$

$$Q345, \gamma_d = 1.40 \text{ 时: } A_2/A_1 = 0.961$$

$$Q345, \gamma_d = 1.45 \text{ 时: } A_2/A_1 = 0.996$$

由上述结果可以看出,当 $\gamma_d = 1.40$ 时,按式(8)设计的用钢量与按原规范设计的用钢量相比差值为 -2.6% (Q235), -3.9% (Q345).当 $\gamma_d = 1.45$ 时,用钢量之比差值为 -0.4% (Q235), 0.9% (Q345).图3给出了在 Z_s 和 Q 组合下的两者用钢量之比.

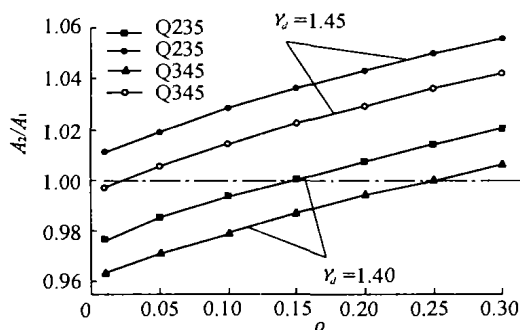


图3 Z_s 和 Q 组合下构件用钢量的比较

从图3可以看出,当 $\gamma_d = 1.40$, $\rho = 0.01 \sim 0.30$ 时,用钢量之比差值为 $-2.4\% \sim 2.0\%$ (Q235), $-3.7\% \sim 0.6\%$ (Q345).当 $\gamma_d = 1.45$ 时,用钢量之比差值为 $1.1\% \sim 5.6\%$ (Q235), $-0.3\% \sim 4.2\%$ (Q345). $\gamma_d = 1.40$ 时用钢量减少,这将导致可靠指标降低.考虑到可靠指标应适当提高的建议^[7],再结合可靠指标的比较,建议将结构系数最终定为 $\gamma_d = 1.45$.

由上述计算结果可以发现,本文确定的结构系数与文献[4]确定的结构系数相同,说明尽管闸门所受的荷载不同,目标可靠指标不同,但是其结构系数却是相同的.进而可以推论,对于其他类型工作闸门的结构系数也可取为1.45.

5 结 论

a. 相对来说,受剪破坏时的可靠指标较低,这与一般钢结构的分析结果是一致的.虽然在实际闸门结构设计中,剪切往往不起控制作用,但是从所有构件可靠指标应一致来说,今后修订规范时应提高剪切时的可靠指标.

b. 建议以后修订闸门设计规范时可将目标可靠指标确定为:大型工作闸门为4.1(Q235), 4.3(Q345),中型工作闸门为3.4(Q235), 3.6(Q345),小型工作闸门为3.1(Q235), 3.3(Q345).总体来讲,闸门设计规范的可靠指标大于钢结构设计规范的目标可靠指标3.2,其原因是闸门设计规范所采用的安全系数大于原钢结构设计规范的安全系数.

c. 各类闸门分项系数设计表达式中的结构系数可统一取为1.45.

参考文献:

- [1] 周建方,周美英,李典庆.水工钢闸门可靠度校准分析[J].金属结构,2001(3):12~17.
- [2] 周建方,李典庆.水工钢闸门结构系数的确定[J].长江科学院院报,2002,19(5):34~37.
- [3] 许萍,周建康,费勤贵.水闸上游水位变化规律统计分析[J].扬州大学学报,2001,4(3):34~37.
- [4] 周建方.《水利水电工程钢闸门设计规范》可靠度初校[J].水利学报,1995(11):24~30.
- [5] 赵国藩,金伟良,贡金鑫.结构可靠度理论[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [6] 周建方,李典庆.用层次分析法对弧形钢闸门主框架可靠性评估[J].水运工程,2002(7):13~16.
- [7] 唐美树.关于结构安全度与耐久性的思考和意见[J].建筑结构,2000,30(12):58~59.

(收稿日期:2003-05-22 编辑:傅伟群)

(上接第16页)

- [6] 地质矿产部,国土资源部.全国地质灾害情况通报[R].1995~1999.
- [7] 段永侯.中国地质灾害[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [8] 国土资源部.我国主要城市和地区地下水水情通报[R].1997~2000.
- [9] 高建国.中国减灾史话[M].北京:大众出版社,1999.
- [10] 王园,王沁,何蕴龙,等.西安地裂灾害问题数据本构分析[J].西安工程学院学报,1998,20(1):41~45.
- [11] 王景明,王春梅,刘科.地裂缝及其灾害研究的新进展[J].地球科学进展,2001,16(3):303~313.
- [12] 任鲁川.区域自然灾害风险分析研究进展[J].地球科学进展,1999,14(3):243~246.

(收稿日期:2003-04-28 编辑:傅伟群)