

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.11.004

Q345 钢轴心受力构件高温下设计参数与可靠度分析

王卫永^{a,b}, 夏月^a

(重庆大学 a.土木工程学院;b.山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045)

摘要:我国现行的钢结构设计规范中提出了各类钢材常温下设计指标,但尚未有高温下的设计指标。为了分析高温下钢材的设计指标,收集了 152 组 Q345 钢材高温材料性能数据,得到 Q345 钢材高温下材料性能不定性的统计参数;利用 ABAQUS 建立有限元模型,计算高温下 Q345 轴心受力构件承载力 360 组,从而获得 Q345 钢轴心受力构件高温下计算模式不定性的统计参数;基于统计结果采用一次二阶矩法,通过 MATLAB 编制程序提出了 Q345 钢轴心受力构件高温下抗力分项系数。对提出的系数进行可靠度校核分析,结果表明,满足建筑火灾下的可靠度要求,具有较好的可靠性。

关键词:高温;可靠度;抗力分项系数;轴心受力构件

中图分类号:TU392

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)11-031-11

Design parameters and reliability analysis of Q345 steel axial loading member under high temperature

WANG WeiYong^{a,b}, XIA Yue^a

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: In current Chinese code for design of steel structures, the design values of all kinds of steel at ambient temperature have been listed, but there is no design value for steel at high temperature. In order to analyze the design values of steel under high temperature, 152 groups of mechanical properties of Q345 steel at high temperature were collected and the statistical parameters of material property uncertainties of Q345 steel under high temperature were obtained. The finite element model was established in the general finite element software ABAQUS to calculate the ultimate loading capacity of 360 groups of Q345 steel axial loading member under high temperature and the statistical parameters of model uncertainties of Q345 steel axial loading member under high temperature were generated. The partial factors for resistance of Q345 steel under high temperature were proposed by using the first-order second-moment reliability method which was programmed through Matlab and the reliability of the proposed resistance partial factors were checked. The result meets the reliability requirement of building in fire and have sufficient reliability.

Keywords: high temperature; reliability; resistance partial factor; axial loading member

收稿日期:2018-06-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678090)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51678090).

作者简介:王卫永(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事结构抗火性能研究,(E-mail)wywang@cqu.edu.cn。

由于缺少高温下钢材的设计指标,目前高温下钢结构承载力设计一直使用标准值,导致设计人员高估火灾下结构承载力,造成不安全。因此,有必要研究高温下钢材的设计参数。

上世纪 70 年代,Lind 等提出验算点法,指出可靠度指标 β 的几何意义^[1]。Rackwitz 等将验算点法运用到非正态的空间里,得到当量正太化法^[2]。由于通俗易懂,《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)^[3]和国际结构安全度联合会(the joint committee on structural safety,JCSS)均推荐使用当量正太化法(因为 JCSS 的推荐使用,当量正太化法又简称 JC 法)。从 20 世纪 50 年代开始,我国开始着手可靠度理论研究。从 20 世纪 60 年代开始,我国学者开始展开结构安全度的讨论^[4]。自 GBJ17—1988《钢结构设计规范》实施起,我国钢结构设计除对疲劳计算外,均采用了基于概率理论的极限状态设计法,以分项系数的表达式进行计算^[5]。文献[6-10]对钢材设计参数进行了研究。然而,这些设计法仅运用在常温情况,高温下结构可靠度的研究还有待进行。

Q345 钢是用建筑结构中主要使用的钢材。综合考虑 Q345 钢材高温下的计算模式不定性、几何参数不定性、材料性能不定性,采用一次二阶矩法,计算得到 Q345 轴心受力构件高温下抗力分项系数值,供有关设计参考。

1 高温下抗力参数不定性统计分析

1.1 高温下材料性能不定性统计分析

材料性能不定性是指结构构件材料的性能值与标准构件材料的性能值之比。它反映了实际生产过程中材质、环境、工艺、加载方式等因素变化对于材料性能的影响。高温下材料性能不定性一般包括 2 个方面的影响,一部分为标准试件测得屈服强度与规范标准值屈服强度之比,即材料强度不定性 K_f ,另一部分考虑结构构件屈服强度与标准试件中屈服强度之比 K_0 。高温下材料性能的不定性采用随机变量 K_m 表示:

$$K_m = \frac{f_c}{f_k} = K_0 \cdot K_f = \frac{f_c}{f_s} \cdot \frac{f_s}{f_k}, \quad (1)$$

式中: f_c 为结构构件屈服强度; f_s 为标准试件屈服强度; f_k 为标准试件屈服强度标准值。 K_0 表示加载速度和试验机柔度共同影响的参数,按照随机变量考虑。高温下加载速度和试验机柔度对材料的影响相差不大,根据已有研究成果^[11]取试验影响因素不定性平均值 $\mu_{K_0} = 0.9$,变异系数 $\delta_{K_0} = 0.011$ 。

对于高温下材料强度不定性 K_f ,收集了国内 10 个钢厂生产的 Q345 钢试验数据 152 组^[12],分别得到了 Q345 钢试件从 100 °C 到 600 °C 的应力-应变曲线。由于钢材高温下没有明显的屈服台阶,因此,没有统一标准的屈服强度值。ECCS 取应变为 0.5% 时的强度为屈服强度,英国规范取应变为 0.5%、1.5%、2.0% 的强度为屈服强度,欧洲标准以应变为 2.0% 的强度为屈服强度。分别得到了各个温度下残余应变为 0.2%,材料应变分别为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0% 时的强度(见表 1),分别考虑各自高温下材料强度不定性。

《建筑结构可靠度设计统一标准》指出:材料性能的概率分布函数和各种统计参数,应在试验数据的基础上,应用参数估计和概率分布的假设检验方法确定^[3]。因此,采用 K-S 假设检验法(显著性水平为 0.05),对收集数据假定分布为正态分布或对数正态分布进行检验,见表 1。

表 1 Q345 钢材高温下强度统计分析及假设检验结果

Table 1 Statistical analysis of the yielding strength of Q345 steel under high temperature and hypothesis test results

应变/%	温度/°C	K-S 检验		屈服强度 平均值/MPa	屈服强度 标准差/MPa	变异系数 δ_{K_f}	屈服强度 标准值/MPa	材料强度不定性 平均值 μ_{K_f}
		正态分布	对数正 态分布					
0.2	100	通过	通过	353.715	19.142	0.054	322.227	1.098
	200	通过	通过	340.157	26.922	0.079	295.871	1.150
	300	通过	通过	308.164	32.602	0.106	254.534	1.211
	400	通过	通过	287.028	30.489	0.106	236.873	1.212
	500	通过	通过	238.502	25.575	0.107	196.431	1.214
	600	通过	通过	174.177	15.619	0.090	148.485	1.173

续表 1

应变/%	温度/℃	K-S 检验		屈服强度 平均值/MPa	屈服强度 标准差/MPa	变异系数 δ_{K_f}	屈服强度 标准值/MPa	材料强度不定性 平均值 μ_{K_f}
		正态分布	对数正 态分布					
0.5	100	通过	通过	354.900	21.026	0.059	320.312	1.108
	200	通过	通过	336.400	20.662	0.061	302.410	1.112
	300	通过	通过	320.727	24.393	0.076	280.601	1.143
	400	通过	通过	303.000	24.839	0.082	262.139	1.156
	500	通过	通过	263.182	22.798	0.087	225.679	1.166
	600	通过	通过	188.273	15.480	0.082	162.809	1.156
1.0	100	通过	通过	361.300	20.543	0.057	327.507	1.103
	200	通过	通过	346.800	14.543	0.042	322.876	1.074
	300	通过	通过	347.000	20.528	0.059	313.231	1.108
	400	通过	通过	339.818	21.372	0.063	304.661	1.115
	500	通过	通过	304.091	27.340	0.090	259.116	1.174
	600	通过	通过	210.182	17.331	0.082	181.672	1.157
1.5	100	通过	通过	370.800	20.504	0.055	337.071	1.100
	200	通过	通过	361.700	15.875	0.044	335.586	1.078
	300	通过	通过	375.546	30.287	0.081	325.724	1.153
	400	通过	通过	376.364	29.422	0.078	327.964	1.148
	500	通过	通过	330.455	28.811	0.087	283.060	1.167
	600	通过	通过	222.182	17.702	0.080	193.062	1.151
2.0	100	通过	通过	387.200	24.316	0.063	347.199	1.115
	200	通过	通过	380.300	22.106	0.058	343.936	1.106
	300	通过	通过	404.636	35.638	0.088	346.012	1.169
	400	通过	通过	406.364	33.452	0.082	351.335	1.157
	500	通过	通过	351.636	32.244	0.092	298.596	1.178
	600	通过	通过	230.818	18.082	0.078	201.073	1.148

注:材料屈服强度标准值采用: $f_k = \mu_f - 1.645\sigma_f$ 计算,变异系数采用: $\delta = \sigma/\mu$ 计算。

从表 1 可知,屈服强度数据全部满足正态分布或对数正态分布(0.05 显著水平),可采用正态分布处理材料强度的概率分布。

得到 Q345 钢高温下材料性能不定性 K_M 的表达式:

$$K_M = K_0 \cdot K_f, \quad (2)$$

$$\mu_{K_M} = \mu_{K_0} \cdot \mu_{K_f}, \quad (3)$$

$$\delta_{K_M} = \sqrt{\delta_{K_0}^2 + \delta_{K_f}^2}. \quad (4)$$

根据式(2)~式(4)结合表 1 及 μ_{K_0} 、 δ_{K_0} , 可得到 Q345 高温下材料不定性统计参数,见表 2。

表 2 Q345 钢材高温下材料不定性统计参数

Table 2 Statistical parameters of material property uncertainties of Q345 steel under high temperature

应变/%		温度/°C					
		100	200	300	400	500	600
0.2	μ_{K_M}	0.988	1.035	1.090	1.091	1.093	1.056
	δ_{K_M}	0.055	0.080	0.106	0.107	0.108	0.090
0.5	μ_{K_M}	0.997	1.001	1.029	1.040	1.050	1.041
	δ_{K_M}	0.060	0.062	0.077	0.083	0.087	0.083
1.0	μ_{K_M}	0.993	0.967	0.997	1.004	1.056	1.041
	δ_{K_M}	0.058	0.043	0.060	0.064	0.091	0.083
1.5	μ_{K_M}	0.990	0.970	1.038	1.033	1.051	1.036
	δ_{K_M}	0.056	0.045	0.081	0.079	0.088	0.080
2.0	μ_{K_M}	1.004	0.995	1.052	1.041	1.060	1.033
	δ_{K_M}	0.064	0.059	0.089	0.083	0.092	0.079

1.2 高温下几何参数不定性统计分析

高温下几何特征不定性是指结构构件由于制作误差等原因造成的几何特性的变化。代表构件实际的尺寸在设计、制作、安装结束后产生的差异。采用随机变量 K_A 表示高温下结构几何特征的不定性,有:

$$K_A = \frac{a}{a_K}, \quad (5)$$

式中: a 为构件实际几何参数值, a_K 为构件标准几何参数。

2012 年,中冶建筑研究总院在 GB50017—2012《钢结构设计规范》修订时,收集了国内 10 余家钢结构加工企业的几何参数实测值,经过分析得到了钢结构几何参数不定性的统计参数。由于高温下钢材的几何参数不定性与常温下数值相同,可以使用此次调研结果得到的统计参数。取几何参数不定性平均值 $\mu_{K_A} = 0.98$,变异系数 $\delta_{K_A} = 0.050$ 。

1.3 高温下构件计算模式不定性统计分析

高温下构件计算模式不定性是指确定构件强度、刚度和稳定时所采用的基本假设条件以及计算公式近似性或经验性等因素引起的结构构件抗力差异。若构件高温下计算模式的不定性采用随机变量 K_P 表示:

$$K_P = K_{P1} \cdot K_{P2} = \frac{P_{EXP}}{P_{FEA}} \cdot \frac{P_{FEA}}{P_K}, \quad (6)$$

式中: P_{EXP} 、 P_{FEA} 、 P_K 分别表示结构构件抗力的试验值、理论值(有限元分析值)、规范值。

关于构件高温下轴心受力构件恒温升载承载力试验数据极少,因此,不考虑 K_{P1} 的影响。文中计算了轴心受力构件有限元模型 360 组,其中,轴压构件分别考虑了截面类别、失稳模态、长细比等影响因素,得到轴压构件高温下计算模式不定性参数: $\mu_{K_{PC}} = 1.020$,变异系数 $\delta_{K_{PC}} = 0.081$;轴拉构件: $\mu_{K_{PT}} = 1.030$,变异系数 $\delta_{K_{PT}} = 0.006$ 。

1.4 高温下构件抗力不定性分析

高温下结构抗力 R 可以表示为

$$R = R_K \cdot K_M \cdot K_A \cdot K_P = R_K \cdot K_R, \quad (7)$$

式中: R_K 为抗力标准值; K_R 为抗力不定性系数。与之对应的结构抗力不定性平均值、变异系数为

$$\mu_{K_R} = \mu_{K_M} \cdot \mu_{K_A} \cdot \mu_{K_P}, \quad (8)$$

$$\delta_{K_R} = \sqrt{\delta_{K_M}^2 + \delta_{K_A}^2 + \delta_{K_P}^2}. \quad (9)$$

由式(8)~式(9)及上文计算数据可得 Q345 高温下轴心受力构件抗力不定性统计参数,见表 3。

表 3 Q345 钢轴心受力构件高温下抗力不定性统计参数

Table 3 Statistical parameters of resistance uncertainties of Q345 steel axial loading member under high temperature

应变 / %		温度 / °C						
		100	200	300	400	500	600	
0.2	μ_{K_R}	轴拉	0.997	1.044	1.100	1.101	1.103	1.066
		轴压	0.988	1.034	1.089	1.090	1.092	1.055
	δ_{K_R}	轴拉	0.075	0.094	0.118	0.118	0.119	0.103
		轴压	0.110	0.124	0.143	0.143	0.144	0.131
0.5	μ_{K_R}	轴拉	1.007	1.011	1.038	1.050	1.059	1.051
		轴压	0.997	1.001	1.028	1.040	1.049	1.040
	δ_{K_R}	轴拉	0.079	0.080	0.092	0.097	0.101	0.097
		轴压	0.113	0.114	0.122	0.126	0.129	0.126
1.0	μ_{K_R}	轴拉	1.002	0.976	1.006	1.013	1.066	1.051
		轴压	0.992	0.966	0.997	1.003	1.056	1.041
	δ_{K_R}	轴拉	0.077	0.066	0.079	0.081	0.104	0.097
		轴压	0.111	0.105	0.113	0.115	0.131	0.126
1.5	μ_{K_R}	轴拉	0.999	0.979	1.047	1.043	1.061	1.045
		轴压	0.990	0.970	1.037	1.032	1.050	1.035
	δ_{K_R}	轴拉	0.076	0.068	0.096	0.094	0.101	0.095
		轴压	0.111	0.105	0.125	0.124	0.130	0.125
2.0	μ_{K_R}	轴拉	1.013	1.005	1.062	1.051	1.070	1.043
		轴压	1.003	0.990	1.052	1.041	1.059	1.033
	δ_{K_R}	轴拉	0.081	0.078	0.102	0.097	0.105	0.094
		轴压	0.115	0.112	0.130	0.126	0.133	0.124

2 高温下目标可靠度选取和荷载不定性统计分析

2.1 高温下目标可靠度选取

根据《建筑结构可靠度设计统一标准》规定,对于常温下的安全等级为二级,可靠度指标 β 取 3.2,目标可靠率为 99.93%^[5]。然而,针对火灾下的建筑,只需保证火灾下的人员安全逃生,目标可靠度选取过高则造成浪费,因此,综合考虑选取目标可靠指标 $\beta=1.65$,目标可靠概率为 95%时的可靠指标。

2.2 高温下荷载不定性统计分析

荷载可作为随机变量,荷载不定性可表示为荷载平均值与标准值之间的比值。对于常见的永久荷载、办公室和住宅楼面活荷载、风荷载的统计分析已有统计研究^[13]。

火灾对结构的荷载作用考虑 2 个因素的影响:一部分是火灾荷载密度的影响,即可燃物燃烧所能产生的全部热量与房间面积的比值,它决定了火灾下建筑物所能达到的温度。第二部分是考虑火灾温度下结构产生的温度内力的影响,这和构件自身的刚度、构件形式和所处位置有关。由于结构构件刚度、连接形式和构件位置的不定性统计几乎没有,所以,保守地取火灾荷载不定性的值为火灾对结构荷载的不定性。关于火灾下的荷载统计分析,对《我国典型既有建筑火灾荷载的标准值》^[14]中的统计数据进行处理分析,得到办公楼火灾荷载平均值为 0.548,变异系数为 0.346;住宅火灾荷载平均值为 0.579,变异系数为 0.306。荷载不定性

统计参数,如表 4 所示。

表 4 荷载不定性统计参数
Table 4 Statistical parameters of load uncertainties

荷载种类	平均值	变异系数	分布类型
永久荷载 G	1.060	0.070	正态分布
办公楼面活荷载 $Q_{\text{办}}$	0.524	0.288	极值 I 型分布
住宅楼面活荷载 $Q_{\text{住}}$	0.644	0.230	极值 I 型分布
风荷载	0.908	0.193	极值 I 型分布
办公楼火灾荷载 $F_{\text{办}}$	0.548	0.346	极值 I 型分布
住宅火灾荷载 $F_{\text{住}}$	0.579	0.306	极值 I 型分布

2.3 荷载组合

根据《建筑钢结构防火技术规范》GB 51249—2017^[15]中关于火灾下的荷载组合规定,具有 4 种组合形式:

$$\begin{aligned} \text{组合 1: } G + Q_{\text{办}} + F, & R_K \geq S_{GK} + 0.7S_{Q_{\text{办}}} + S_{F_{\text{办}}}. \\ \text{组合 2: } G + Q_{\text{办}} + F + W, & R_K \geq S_{GK} + 0.7S_{Q_{\text{办}}} + S_{F_{\text{办}}} + 0.4S_W. \\ \text{组合 3: } G + Q_{\text{住}} + F, & R_K \geq S_{GK} + 0.7S_{Q_{\text{住}}} + S_{F_{\text{住}}}. \\ \text{组合 4: } G + Q_{\text{住}} + F + W, & R_K \geq S_{GK} + 0.7S_{Q_{\text{住}}} + S_{F_{\text{住}}} + 0.4S_W. \end{aligned}$$

其中, G 为永久荷载; $Q_{\text{办}}$ 为办公楼面活荷载; $Q_{\text{住}}$ 为住宅楼面活荷载; F 为火灾荷载; W 为风荷载; S_{GK} 为永久荷载效应值; $S_{Q_{\text{办}}}$ 为办公楼面活荷载效应值; $S_{F_{\text{办}}}$ 为办公楼火灾荷载效应值; S_W 为风荷载效应值; $S_{Q_{\text{住}}}$ 为住宅楼面活荷载效应值; $S_{F_{\text{住}}}$ 为住宅火灾荷载效应值。

定义火灾荷载恒载比 ρ 为

$$\rho = \frac{\text{火灾荷载标准值}}{\text{永久荷载标准值}}. \quad (10)$$

定义可变荷载比 ρ_{V1} 、 ρ_{V2} 为

$$\rho_{V1} = \frac{\text{楼面活载标准值}}{\text{火灾荷载标准值}}. \quad (11)$$

$$\rho_{V2} = \frac{\text{风荷载标准值}}{\text{楼面活载标准值}}. \quad (12)$$

按照以上荷载组合, ρ 、 ρ_{V1} 、 ρ_{V2} 均考虑 0.25、0.5、1.0、2.0 共 4 种情况。

3 高温下抗力分项系数的计算

3.1 抗力分项系数的计算及分析

假设极限状态方程为

$$Z = R - N_G - N_Q - N_F - N_W, \quad (13)$$

式中: R 为结构抗力效应; N_G 为永久荷载效应; N_Q 为可变荷载效应; N_F 为火灾荷载效应; N_W 为风荷载效应。抗力效应 R 服从对数正态分布,采用《建筑结构可靠度设计统一标准》^[5]推荐使用 JC 法,通过 MATLAB 软件求解得到不同荷载组合、不同应变屈服强度、不同温度下的抗力分项系数,见表 5。

表 5 不同荷载组合下的抗力分项系数
Table 5 Partial factors for resistance under different load combinations

荷载组合	应变/%		温度/℃					
			100	200	300	400	500	600
组合 1	0.2	轴拉	0.921	0.899	0.879	0.879	0.878	0.891
		轴压	0.969	0.943	0.920	0.919	0.918	0.934
	0.5	轴拉	0.916	0.914	0.901	0.897	0.893	0.896
		轴压	0.964	0.961	0.946	0.941	0.936	0.940
	1.0	轴拉	0.918	0.933	0.916	0.912	0.891	0.890
		轴压	0.966	0.984	0.964	0.960	0.933	0.940
	1.5	轴拉	0.919	0.931	0.898	0.900	0.893	0.898
		轴压	0.968	0.981	0.942	0.944	0.936	0.943
	2.0	轴拉	0.913	0.917	0.892	0.896	0.889	0.899
		轴压	0.960	0.965	0.935	0.940	0.932	0.944
组合 2	0.2	轴拉	1.014	0.991	0.971	0.970	0.970	0.983
		轴压	1.070	1.042	1.016	1.016	1.015	1.031
	0.5	轴拉	1.009	1.007	0.994	0.989	0.985	0.989
		轴压	1.064	1.061	1.045	1.039	1.034	1.039
	1.0	轴拉	1.011	1.027	1.009	1.005	0.983	0.988
		轴压	1.066	1.085	1.064	1.059	1.031	1.039
	1.5	轴拉	1.013	1.025	0.990	0.992	0.985	0.991
		轴压	1.068	1.083	1.040	1.043	1.034	1.041
	2.0	轴拉	1.006	1.010	0.984	0.989	0.989	0.992
		轴压	1.060	1.065	1.033	1.039	1.029	1.043
组合 3	0.2	轴拉	1.062	1.033	1.008	1.007	1.006	1.023
		轴压	1.112	1.080	1.050	1.050	1.049	1.068
	0.5	轴拉	1.056	1.053	1.037	1.031	1.020	1.030
		轴压	1.105	1.102	1.084	1.077	1.071	1.076
	1.0	轴拉	1.058	1.077	1.056	1.056	1.023	1.030
		轴压	1.108	1.129	1.105	1.100	1.068	1.076
	1.5	轴拉	1.060	1.075	1.032	1.034	1.025	1.033
		轴压	1.110	1.127	1.078	1.081	1.071	1.079
	2.0	轴拉	1.051	1.057	1.024	1.030	1.021	1.034
		轴压	1.100	1.107	1.070	1.076	1.066	1.081
组合 4	0.2	轴拉	1.154	1.125	1.098	1.098	1.097	1.114
		轴压	1.218	1.186	1.157	1.156	1.155	1.174
	0.5	轴拉	1.147	1.145	1.128	1.122	1.117	1.121
		轴压	1.211	1.208	1.190	1.183	1.177	1.182
	1.0	轴拉	1.150	1.170	1.147	1.143	1.113	1.121
		轴压	1.214	1.236	1.211	1.206	1.174	1.182
	1.5	轴拉	1.152	1.167	1.123	1.126	1.116	1.124
		轴压	1.216	1.233	1.184	1.187	1.177	1.185
	2.0	轴拉	1.143	1.149	1.115	1.121	1.112	1.125
		轴压	1.206	1.212	1.176	1.182	1.172	1.187

3.2 抗力分项系数的确定

从表 5 可以看出,在其他条件相同的情况下,轴压构件的抗力分项系数值总是大于轴拉构件,故初步取轴压构件结果作为高温下轴心受力构件的抗力分项系数。

以应变为 2% 的强度作为屈服强度组为例,分别绘制轴压构件在荷载组合 1、组合 2、组合 3、组合 4 下的抗力分项系数随温度变化,如图 1 所示。

由图 1 可知,在同一种荷载组合下,随着温度的增加,抗力分项系数先降低后基本保持不变。对于不同的荷载组合,荷载组合 4 抗力分项系数大小始终大于其他 3 种组合,即由恒载+住宅楼面活荷载+火灾荷载+风荷载这一荷载组合起控制作用,因此,Q345 钢轴心受力构件高温下抗力分项系数取值,见表 6。

表 6 Q345 钢轴心受力构件高温下抗力分项系数

Table 6 Partial factors for resistance of Q345 steel axial loading member under high temperature

应变/%	温度/°C						平均值
	100	200	300	400	500	600	
0.2	1.218	1.186	1.157	1.156	1.155	1.174	1.174
0.5	1.211	1.208	1.190	1.183	1.177	1.182	1.192
1.0	1.214	1.236	1.211	1.206	1.174	1.182	1.204
1.5	1.216	1.233	1.184	1.187	1.177	1.185	1.197
2.0	1.206	1.212	1.176	1.182	1.172	1.187	1.189

根据表 6 绘制各个应变标准下的抗力分项系数,如图 2 所示。

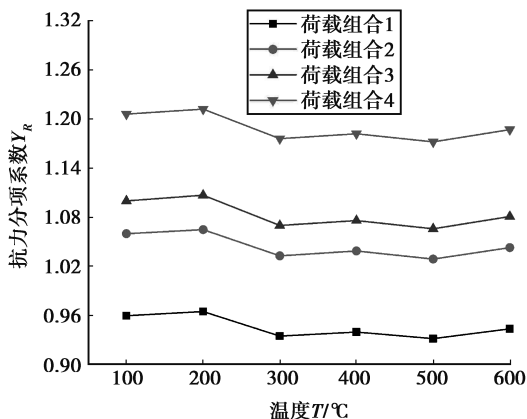


图 1 轴压构件不同荷载组合下的抗力分项系数

Fig.1 Partial factors for resistance of axial compression members under different load combinations

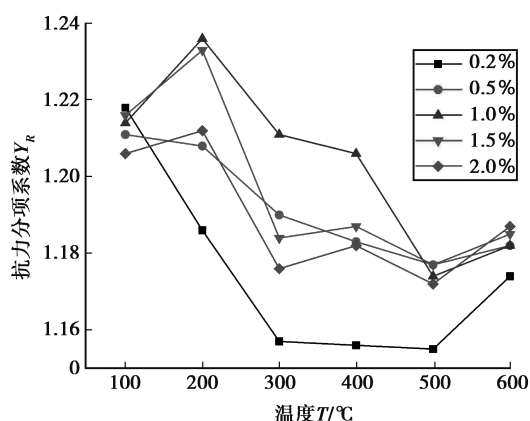


图 2 轴压构件不同应变下的抗力分项系数

Fig.2 Partial factors for resistance of axial compression members under different strain

轴压构件不同应变条件下的抗力分项系数比较,如图 2 所示,对于不同应变对应下的抗力分项系数没有明显的大小区分。取 100 °C ~ 600 °C 的平均值作为此应变条件下的抗力分项系数值,如表 6 所示。将高温下的抗力分项系数值与常温下 Q345 钢抗力分项系数 1.111 比较发现:对于任何应变条件下 Q345 钢高温下抗力分项系数值均大于常温下 Q345 钢的抗力分项系数,钢材火灾下的可靠度明显低于常温。

4 高温下可靠度指标验算

针对第三节提出的抗力分项系数,通过 MATLAB 程序分别反算荷载组合 1~4 情况下,结构高温下的可靠度指标,检验是否满足初始设置的目标可靠度,结果如表 7 所示。

表 7 不同荷载组合下的可靠指标
Table 7 Reliability indexes under different load combinations

荷载组合	应变/%		温度/℃					
			100	200	300	400	500	600
组合 1	0.2	轴拉	3.457	3.310	3.146	3.141	3.135	3.243
		轴压	2.927	2.859	2.775	2.771	2.768	2.825
	0.5	轴拉	3.429	3.417	3.330	3.290	3.264	3.290
		轴压	2.915	2.910	2.869	2.848	2.837	2.849
	1.0	轴拉	3.441	3.525	3.429	3.408	3.243	3.290
		轴压	2.920	2.958	2.915	2.906	2.826	2.850
	1.5	轴拉	3.454	3.515	3.300	3.315	3.259	3.305
		轴压	2.928	2.954	2.854	2.861	2.833	2.856
	2.0	轴拉	3.408	3.438	3.254	3.290	3.233	3.315
		轴压	2.905	2.920	2.831	2.849	2.821	2.862
组合 2	0.2	轴拉	2.943	2.806	2.659	2.654	2.649	2.745
		轴压	2.411	2.360	2.296	2.293	2.291	2.334
	0.5	轴拉	2.917	2.905	2.824	2.787	2.764	2.787
		轴压	2.403	2.398	2.368	2.350	2.343	2.352
	1.0	轴拉	2.928	3.008	2.917	2.897	2.745	2.788
		轴压	2.406	2.437	2.402	2.395	2.334	2.352
	1.5	轴拉	2.941	2.999	2.797	2.810	2.759	2.801
		轴压	2.413	2.434	2.356	2.361	2.340	2.357
	2.0	轴拉	2.897	2.926	2.755	2.788	2.736	2.811
		轴压	2.395	2.407	2.338	2.352	2.331	2.362
组合 3	0.2	轴拉	2.370	2.320	2.262	2.259	2.257	2.296
		轴压	2.031	2.021	2.006	2.003	2.003	2.014
	0.5	轴拉	2.361	2.357	2.327	2.311	2.304	2.312
		轴压	2.030	2.029	2.023	2.017	2.017	2.018
	1.0	轴拉	2.364	2.395	2.361	2.354	2.297	2.313
		轴压	2.030	2.039	2.030	2.029	2.015	2.020
	1.5	轴拉	2.371	2.392	2.316	2.321	2.301	2.317
		轴压	2.034	2.039	2.020	2.021	2.016	2.019
	2.0	轴拉	2.353	2.366	2.300	2.313	2.293	2.322
		轴压	2.028	2.033	2.015	2.019	2.014	2.022
组合 4	0.2	轴拉	1.942	1.908	1.871	1.868	1.867	1.889
		轴压	1.657	1.662	1.664	1.661	1.662	1.661
	0.5	轴拉	1.936	1.933	1.914	1.901	1.898	1.903
		轴压	1.659	1.658	1.662	1.659	1.663	1.661
	1.0	轴拉	1.938	1.962	1.936	1.931	1.893	1.904
		轴压	1.657	1.660	1.659	1.660	1.662	1.662
	1.5	轴拉	1.944	1.960	1.905	1.909	1.895	1.906
		轴压	1.661	1.660	1.661	1.660	1.661	1.660
	2.0	轴拉	1.931	1.941	1.894	1.903	1.891	1.909
		轴压	1.659	1.661	1.661	1.661	1.663	1.662

从表 7 可知,组合 1~组合 4 的可靠度指标均大于设定的目标可靠度指标 1.65,满足要求。以应变为 2%,强度为屈服强度组为例,绘制轴压构件分别在荷载组合 1、组合 2、组合 3、组合 4 下的可靠度指标随温度变化,如图 3 所示。

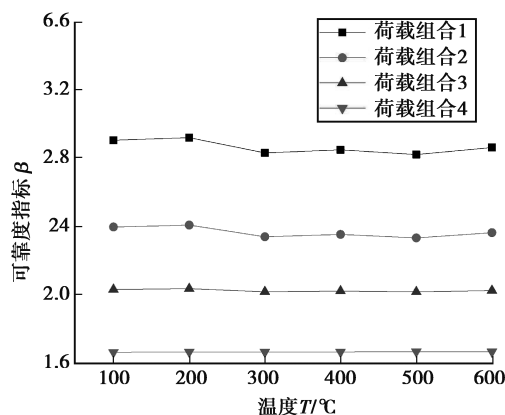


图 3 轴压构件不同荷载组合下的可靠度指标

Fig.3 Reliability indexes of axial compression members under different load combinations

由图 3 可知,在不同的荷载组合下,可靠度指标 β 的变化趋势:荷载组合 4 的可靠度指标始终小于其他 3 种组合,这个和前面的抗力分项系数的规律一致,抗力分项系数值越大,说明结构可靠度越低,可靠度指标则越小。

5 结 论

针对 Q345 高温下轴心受力构件的可靠度进行了研究。基于高温下构件材料性能不定性、几何参数不定性、计算模式不定性、设计目标可靠度及荷载统计分析,得出如下结论:

1) 提出高温下建筑结构目标可靠度指标 $\beta=1.65$ 。

2) 计算 Q345 钢轴心受力构件的高温下抗力不定性统计参数。采用一次二阶矩法,计算得到 Q345 轴心受力构件高温下抗力分项系数,并考虑其在不同荷载组合下的变化规律,最后提出了设计指标值。

3) 进行了可靠度指标校核,表明设计指标满足目标可靠度要求。

参考文献:

- [1] Hasofer A M. Exact and invariant second-moment code format [J]. Journal of Engineering Mechanics Division, 1974, 100:111-121.
- [2] Rackwitz R, Flessler B. Structural reliability under combined random load sequences [J]. Computers & Structures, 1978, 9(5):489-494.
- [3] 中华人民共和国建设部.GB50068—2001 建筑结构可靠度设计统一标准[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50068—2001 Unified standard for reliability design of building structures [M].Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.(in Chinese)
- [4] 蔡绍怀. 钢筋混凝土结构安全度问题的探讨[J]. 土木工程学报, 1962(2):33-40.
CAI Shaohuai. Discussion on safety degree of reinforced concrete structure [J]. China Civil Engineering Journal, 1962(2): 33-40.(in Chinese)
- [5] 中华人民共和国建设部.GBJ 17—1988 钢结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1989.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GBJ 17—1988 Code for design of steel structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1989.(in Chinese)
- [6] 施刚, 朱希. 国产高强度结构钢设计指标和可靠度分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(11):144-159.
SHI Gang, ZHU Xi. Design indexes and reliability analysis of domestic high-strength structural steels [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(11):144-159.(in Chinese)
- [7] 朱希, 施刚. 国产高强结构钢材性参数的统计与分析[J]. 建筑结构, 2015, 45(21):9-15.

- ZHU Xi,SHI Gang. Statistics and analysis of material properties of domestic high-strength structural steels [J]. Building Structure, 2015, 45(21):9-15.(in Chinese)
- [8] 施刚, 朱希. 高强钢压弯和受弯构件计算模式不定性研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(7):32-40.
SHI Gang, ZHU Xi. Research on resistance model uncertainty of high-strength steel members subjected to combined axial load and bending and flexural members [J]. Industrial Construction, 2016, 46(7):32-40.(in Chinese)
- [9] Meacham B J. Integrating human factors issues into engineered fire safety design [J]. Fire & Materials, 2015, 23(6): 273-279.
- [10] 施刚, 朱希. 高强钢轴心受压构件计算模式不定性研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(16):36-40.
SHI Gang, ZHU Xi. Research on resistance model uncertainty of high-strength steel axial compression members [J]. Building Structure, 2014, 44(16):36-40.(in Chinese)
- [11] 陈国兴, 李继华. 钢构件材料强度及截面几何特性的统计参数[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1985(1):24-26.
CHEN Guoxing, LI Jihua. Statistical parameters of material strength and geometric properties of shapes for steel members [J]. Journal of Chongqing Institute of Architecture and Engineering, 1985(1):24-26.(in Chinese)
- [12] 屈立军, 李焕群, 王跃琴, 等. 国产钢结构用 Q345(16Mn) 钢高温力学性能的恒温加载试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(7):33-40.
QU Lijun, LI Huanqun, WANG Yueqin, et al. Material properties of Q345(16Mn) steel under loading and constant temperature [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(7):33-40.(in Chinese)
- [13] 戴国欣, 夏正中. 建筑钢结构适用性分析[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(3):36-40.
DAI Guoxin, XIA Zhongzheng. Serviceability analysis of steel structural elements of buildings [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(3):36-40.(in Chinese)
- [14] 王金平. 我国典型既有建筑火灾荷载的标准值[C]// 合肥:2013 中国消防协会科学技术年会论文集,2013.
WANG Jinping. Standard value of fire load in typical existing buildings in China [C]//Hefei: Proceedings of the 2013 China Fire Society Science and Technology annual conference,2013.(in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB51249—2017. 建筑钢结构防火技术规范[S].北京:中国计划出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB51249—2017. Technical code for fire safety of steel structure in buildings [S]. Beijing: China Planning Press, 2006.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)