

文章编号: 1000-5013(2008)02 0284- 05

混凝土矩形柱的耐火极限分析及实用计算

徐玉野, 王全凤, 罗 漪

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 采用常温下和高温下混凝土矩形柱的试验结果, 验证数值模拟程序 RCSSCF 的有效性, 并分析各主要参数对《ISO 834 建筑构件耐火试验方法》规定的升温过程中混凝土矩形柱耐火极限的影响规律. 针对不同荷载比、计算长度、截面尺寸、荷载偏心率、配筋率和荷载角共 9 000 种工况, 进行四面受火时混凝土矩形柱的高温反应分析. 通过对大量计算结果的整理和分析, 给出了该类构件耐火极限的实用计算公式.

关键词: 混凝土; 柱; 耐火极限; 矩形截面; 实用计算

中图分类号: TU 375.301; TU 317+.1 文献标识码: A

正确把握钢筋混凝土柱式构件的耐火极限, 对提高该类结构的火灾安全性, 同时避免抗火设计的盲目性具有较重要的意义. 虽然通过耐火试验或全过程数值模拟可以确定钢筋混凝土柱的耐火极限, 但从工程设计角度来看不便于推广应用. 为此, 有必要建立既满足工程精度要求, 又便于工程设计人员掌握的钢筋混凝土柱式构件耐火极限的实用计算方法. 文[1] 针对不同轴压比、截面尺寸、配筋率和荷载偏心率共 480 种工况, 进行了钢筋混凝土柱的高温反应分析, 在计算结果的基础上定量给出了钢筋混凝土柱耐火极限的简化确定方法. 与文[1] 相比, 文[2] 也给出了四面受火时钢筋混凝土柱耐火极限的一种简化确定方法, 但考虑了受火方式和长细比的影响, 却忽略了钢筋的影响. 这里需要指出的是, 文[1-2] 给出的方法都是针对方形柱的情况, 其实用计算公式并不适合矩形柱的情况. 在国外, Tan 等^[3] 也给出了一种钢筋混凝土柱耐火极限的计算方法. 虽然文[3] 的方法考虑了矩形柱的情况, 但由于该方法计算过程需要分 3 个步骤且需经过反复试算, 不便在工程中推广应用. 针对上述问题, 本文就四面受火时钢筋混凝土矩形柱的耐火极限开展定量研究.

1 数值模型及其验证

钢筋混凝土矩形柱的高温数值模型, 如图 1 所示. 图 1 中, L 是柱的计算长度, $e_{0,y}$, $e_{0,z}$ 分别是荷载沿坐标轴 y , z 方向的偏心距(含初始缺陷), N 是轴力. 该模型将柱沿高度划分为若干小段, 假定每一小段内曲率线性变化, 利用虚梁法确定构件的实际变形. 程序的迭代过程、收敛准则及耐火极限的判定条件详见文[4-6]. 基于该模型的计算程序 RCSSCF, 求得四面受火方形柱的耐火极限与文[3] 中试验结果的对比, 如表 1 所示; 利用程序 RCSSCF, 求得的常温下双向偏压矩形柱的极限承载力与文[7] 中相应试验结果的对比, 如表 2 所示. 在表 1 中, 截面尺寸 $b \times h$ 为 305 mm \times 305 mm, 配筋率 ρ 为 2.19%; 表 2 中, 截面尺寸 $b \times h$ 为 100 mm \times 200 mm, 配筋率 ρ 为 2.14%, 圆柱体抗压强度 f 为 27 MPa, 柱长 L 为 1 200 mm; 其他相关参数分别是, 荷载为 N , 试验和计算耐火极限分别为 R_{exp} , R_c , 相对误差为 R_{rel} , 常温下试验和计算极限承载力分别为 $N_{u,exp}$, $N_{u,c}$, 相对误差为 e_{rel} . 表中柱的编号对应文[7] 中的编号. 分析过程中, 混凝土与钢筋的力学指标及应力-应变关系按文[8] 建议的方法确定. 从表 1, 2 可看出, 无论是常温下还是高温下, 本文计算结果总体上与试验结果

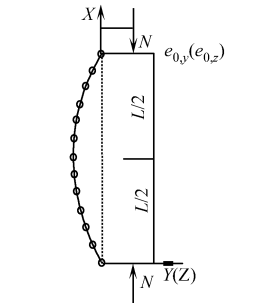


图 1 数值模型
Fig. 1 Numerical model

吻合较好.

表 1 耐火极限计算结果与试验结果的对比

Tab.1 Comparison between calculated fire resistance and experimental results					
试件编号	f/MPa	N/kN	$R_{\text{exp}}/\text{min}$	R_c/min	$R_{\text{rel}}/\%$
1	36.9	1 333	170	165	- 2.9
2	34.2	800	218	220	0.9
3	35.1	711	220	238	8.2
4	36.1	1 067	208	189	- 6.6

表 2 常温下极限承载力计算结果和试验结果的对比

Tab.2 Comparison between calculated ultimate strength and experimental results at room temperature					
柱编号	$e_{0,z}/\text{mm}$	$e_{0,y}/\text{mm}$	$N_{u,\text{exp}}/\text{kN}$	$N_{u,c}/\text{kN}$	$R_{\text{rel}}/\%$
RS0 2	40.0	0	206	192	- 6.8
RS30 2	34.6	20.0	217	212	- 2.3
RS45 2	28.3	28.3	239	242	1.3
RS60 2	20.0	34.6	295	289	- 2.0
RS90 2	0	40.0	443	423	- 4.5

2 影响因素分析

一般来说, 硅质骨料混凝土的应用比钙质骨料混凝土普遍, 因此本文以硅质骨料混凝土柱作为研究对象. 矩形柱的截面参数如图 2 所示. 下面通过典型算例, 分析各参数对火灾作用下矩形柱耐火极限的影响规律. 算例的基本条件: 荷载比 $\mu=0.5$, 计算长度 $L=3.0\text{ m}$, 截面厚度 $b=400\text{ mm}$, 截面高度 $h=500\text{ mm}$, 荷载角 $\alpha=90^\circ$, 荷载偏心率 $e=0.5$, 抗压强度 $f_c=30\text{ MPa}$, 纵筋屈服强度 $f_y=375\text{ MPa}$, 纵筋极限强度 $f_u=500\text{ MPa}$, 配筋率 $\rho=1.5\%$, 混凝土保护层厚度 $c=30\text{ mm}$, 混凝土中水的质量分数为 $w=2\%$, 柱初始缺陷为 2 mm . 当考察某些参数变化对矩形柱耐火极限的影响时, 该部分参数再补充考虑其他取值情况.

(1) 荷载. 矩形柱耐火极限 R_f 随荷载比 μ 的变化情况, 如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 荷载比对柱耐火极限影响很大, 随着荷载比的增加, 矩形柱的耐火极限迅速降低.

(2) 计算长度. 矩形柱耐火极限 R_f 随计算长度的变化情况, 如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 计算长

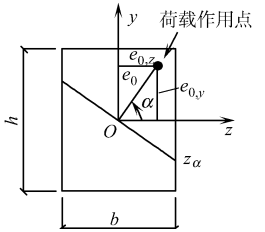


图 2 截面参数
Fig. 2 Parameters of cross section

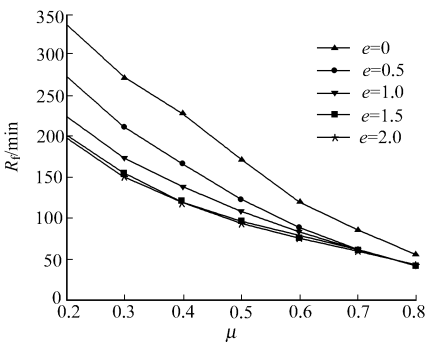


图 3 耐火极限随荷载比的变化情况

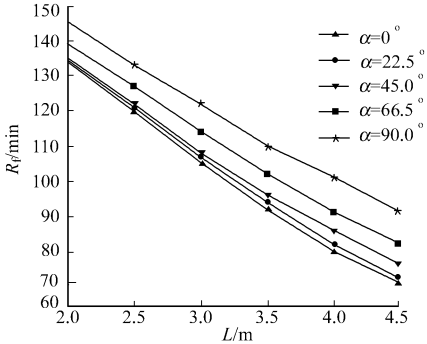


图 4 耐火极限随计算长度的变化情况

Fig. 3 Variation of fire resistance with load ratio

Fig. 4 Variation of fire resistance with effective length

度对柱耐火极限影响很大, 随着计算长度的增加, 柱耐火极限近似呈直线降低.

(3) 截面尺寸. 当矩形柱的截面厚度 h 和高厚比 h/b 确定后, 其横截面尺寸就已完全确定. 矩形柱耐火极限 R_f 随截面尺寸的变化情况, 如图 5 所示. 从图 5(a) 可以看出, 当截面厚度 b 保持不变, 随着截面高厚比 h/b 的增大, 柱的耐火极限逐渐增加. 从图 5(b) 可以看出, 对于相同的截面高厚比, 随着截面厚度的增大, 柱耐火极限近似呈直线增加.

(4) 荷载偏心率. 矩形柱耐火极限 R_f 随荷载偏心率的变化情况, 如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 当 $e \leq 1.0$ 时, 柱耐火极限随荷载偏心率的增大而减小; 而当 $1.0 < e \leq 2.0$ 时, 荷载偏心率改变对柱耐火极限影响较小.

(5) 配筋率. 矩形柱耐火极限 R_f 随配筋率的变化情况, 如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 耐火极限随配筋率的增加近似呈直线增长.

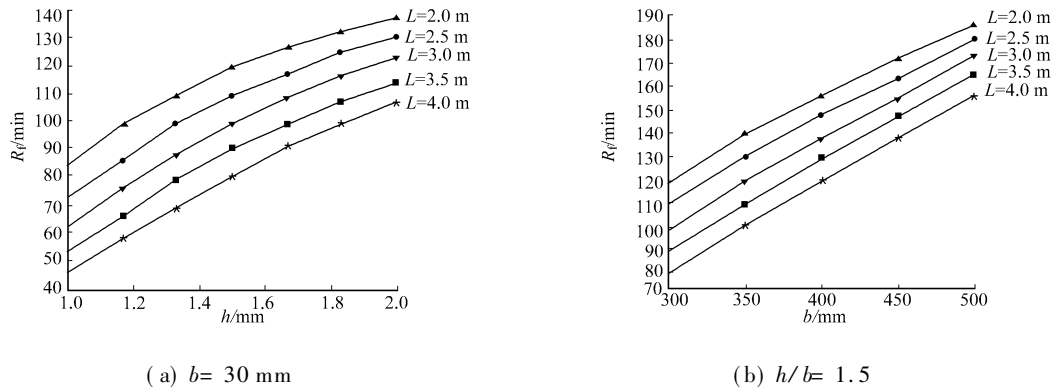


图 5 耐火极限随截面尺寸的变化情况

Fig. 5 Variation of fire resistance with cross section dimensions

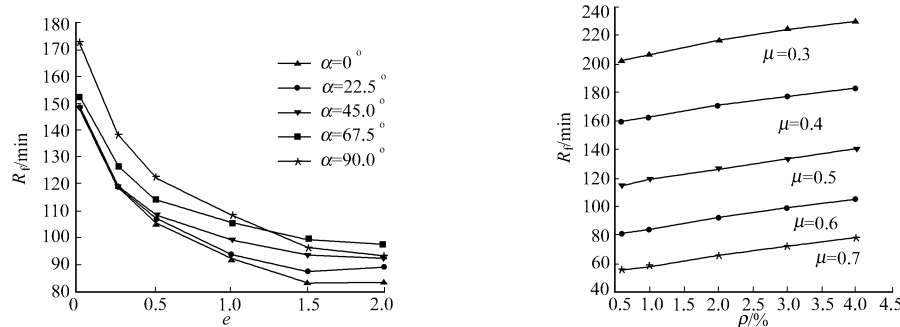


图 6 耐火极限随荷载偏心率的变化情况

Fig. 6 Variation of fire resistance with load eccentricity ratio

图 7 耐火极限随配筋率的变化情况

Fig. 7 Variation of fire resistance with reinforcement ratio

(6) 荷载角. 矩形柱耐火极限 R_f 随荷载角的变化情况, 如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 荷载角对柱耐火极限影响较大, 且影响规律较为复杂.

一般而言, 纵筋屈服强度 f_y 、纵筋极限强度 f_u 、混凝土棱柱体抗压强度 f_c 和混凝土保护层厚度 c 等参数对柱耐火极限影响相对较小^[4], 限于篇幅限制, 这些参数的影响规律在此不详细给出. 总之, 荷载比、计算长度、截面尺寸、荷载偏心率、配筋率和荷载角等对矩形柱的耐火极限影响较大, 是影响矩形柱耐火极限的主要因素.

3 耐火极限简化计算方法

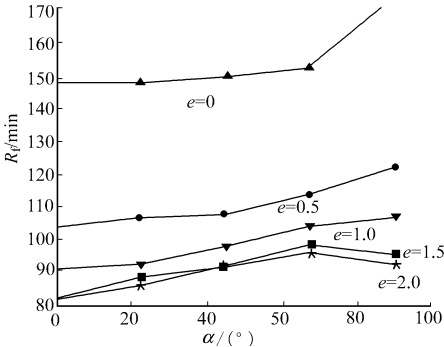
针对不同荷载比、计算长度、截面尺寸、荷载偏心率、配筋率和荷载角, 进行矩形柱耐火极限的计算. 其中, 4 种荷载比: 0.2, 0.4, 0.6, 0.7; 3 种计算长度: 2.0, 3.0, 4.0 m; 10 种截面尺寸: $300 \times 300, 300 \times 400, 300 \times 500, 300 \times 600, 400 \times 400, 400 \times 500, 400 \times 600, 500 \times 500, 500 \times 600, 600 \times 600 \text{ mm} \times \text{mm}$; 5 种荷载偏心率: 0, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0; 3 种配筋率: 1.0%, 2.0%, 3.0%; 5 种荷载角: $0, 22.5, 45, 67.5, 90^\circ$. 计算过程中, 纵筋的屈服强度 f_y 和极限强度 f_u 分别取 375, 500 MPa, 混凝土棱柱体抗压强度取 30 MPa, 混凝土保护层厚度取 30 mm, 混凝土中水的质量分数取 0.02, 初始缺陷取 2 mm. 通过对 9 000 种工况大量计算结果的整理和分析, 可以简化给出不同荷载角下, 矩形柱耐火极限与荷载比、计算长度、截面尺寸、荷载偏心率和配筋率之间的定量关系, 有

$$R_f = \beta_u \beta_L \beta_{h/b} \beta_b \beta_e \beta_p. \tag{1}$$

在式(1)中, $\beta_u = c_1 \mu^2 + c_2 \mu + c_3$; $\beta_L = c_4 L + c_5$; $\beta_{h/b} = c_6 (\frac{h}{b})^2 + c_7 (\frac{h}{b}) + c_8$; $\beta_b = c_9 b + c_{10}$; $\beta_e = c_{11} e^3 + c_{12} e^2 +$

图 8 耐火极限随荷载角的变化情况

Fig. 8 Variation of fire resistance with load angle



$c_{13}e+c_{14}$; $\beta\rho=c_{15}\rho+c_{16}$. 其中 L, h 和 b 的单位均为 m, 各系数 $c_1 \sim c_{16}$ 的取值如表 3 所示.

表 3 不同荷载角的参数 c_{16} 的取值

Tab. 3 Values of c_{16} parameters for different load angles

$a/(^{\circ})$	0	22.5	45	67.5	90	$a/(^{\circ})$	0	22.5	45	67.5	90
c_1	1.518	1.385	1.327	1.641	1.696	c_9	2.093	2.038	1.614	1.479	3.523
c_2	-2.690	-2.445	-2.328	-2.933	-3.225	c_{10}	-0.277	-0.267	-0.209	-0.191	-0.443
c_3	1.355	1.231	1.167	1.490	1.693	c_{11}	-1.512	-1.688	-2.956	-1.532	-0.932
c_4	-0.877	-0.901	-1.233	-1.141	-1.026	c_{12}	7.375	8.481	12.424	7.882	4.070
c_5	7.011	7.286	10.119	9.484	9.634	c_{13}	-13.285	-14.726	-18.366	-14.523	-6.727
c_6	-0.666	-0.754	-1.046	-0.977	-0.326	c_{14}	23.334	25.565	31.138	29.643	11.166
c_7	3.138	3.322	4.242	3.852	3.251	c_{15}	5.547	5.859	4.656	5.880	3.920
c_8	2.058	1.824	1.146	0.060	-0.076	c_{16}	1.141	1.144	0.896	1.241	1.210

耐火极限程序计算值与回归公式计算值吻合较好. (1) 当 $a=0(^{\circ})$ 时, 两者的相关系数 $\gamma=0.981$, 后者与前者之比的平均值为 0.985, 均方差为 0.154. (2) 当 $a=22.5(^{\circ})$ 时, 两者的相关系数 $\gamma=0.981$, 后者与前者之比的平均值为 0.987, 均方差为 0.147. (3) 当 $a=45(^{\circ})$ 时, 两者的相关系数 $\gamma=0.980$, 后者与前者之比的平均值为 0.988, 均方差为 0.155. (4) 当 $a=67.5(^{\circ})$ 时, 两者的相关系数 $\gamma=0.979$, 后者与前者之比的平均值为 0.986, 均方差为 0.152. (5) 当 $a=90(^{\circ})$ 时, 两者的相关系数 $\gamma=0.984$, 后者与前者之比的平均值为 0.983, 均方差为 0.145.

鉴于实际计算时, 荷载比 μ 中的常温极限承载力 N_u 仍然难以通过手算确定. 通过对前面 9 000 种计算工况中的 2 250 种常温极限承载力的计算结果的整理和分析, 可以回归给出不同荷载角下, 矩形柱的常温极限承载力与计算长度、

表 4 不同荷载角的参数 $d_1 \sim d_{13}$ 值

Tab. 4 Values of $d_1 \sim d_{13}$ parameters for different load angles

$a/(^{\circ})$	0	22.5	45	67.5	90
d_1	0.023 7	0.031 3	0.054 9	0.030 1	0.020 3
d_2	-1.311 0	-1.771 0	-3.195 0	-1.984 0	-1.793 0
d_3	-0.076 6	-0.128 0	-0.273 0	-0.259 0	-0.074 7
d_4	0.194 0	0.314 0	0.660 0	0.730 0	0.341 0
d_5	1.490 0	1.496 0	2.504 0	2.383 0	1.682 0
d_6	0.389 0	0.378 0	0.363 0	0.389 0	0.298 0
d_7	1.506 0	1.492 0	1.438 0	1.662 0	1.395 0
d_8	-0.739 0	-0.788 0	1.102 0	-1.104 0	-0.814 0
d_9	4.075 0	4.676 0	-7.664 0	7.378 0	4.568 0
d_{10}	-9.705 0	-11.539 0	20.455 0	-19.691 0	-11.215 0
d_{11}	12.123 0	14.005 0	-24.673 0	24.521 0	14.517 0
d_{12}	-0.282 0	-0.172 0	0.033 2	-0.047 1	-0.156 0
d_{13}	-0.022 9	-0.014 3	0.002 71	-0.003 8	-0.012 3

截面尺寸、荷载偏心率和配筋率

之间的定量关系, 如

$N_u = f_c A \varphi_L \varphi_{hb} \varphi_b \varphi_e \varphi_{\rho}$. (2)

式(2)中, $\varphi_L = d_1 L + d_2$, $\varphi_{hb} =$

$d_3(\frac{h}{b})^2 + d_4 \frac{h}{b} + d_5$; $\varphi_b = d_6 b +$

d_7 ; $\varphi_e = d_8 e^3 + d_9 e^2 + d_{10} e + d_{11}$;

$\varphi_{\rho} = d_{12} \rho + d_{13}$. 其中 L, h 和 b 的

单位均为 m, 各参数 $d_1 \sim d_{13}$ 的取

值如表 4 所示. 此外, 式(2)的适

用范围: $2.0\text{ m} \leq L \leq 4.0\text{ m}$, 300

$\text{mm} \leq b \leq 600\text{ mm}$, $b \leq h \leq 600$

mm , $0 \leq e \leq 2.0$, $0.01 \leq \rho \leq 0.03$.

常温极限承载力的程序计算
值与回归公式计算值吻合较好. (1) 当 $a=0^{\circ}$ 时, 两者的相关系数 $\gamma=0.998$, 后者与前者之比的平均值为 1.020, 均方差为 0.077. (2) 当 $a=22.5^{\circ}$ 时, 两者的相关系数 $\gamma=0.998$, 后者与前者之比的平均值为 1.021, 均方差为 0.078. (3) 当 $a=45^{\circ}$ 时, 两者的相关系数 $\gamma=0.998$, 后者与前者之比的平均值为 1.024, 均方差为 0.084. (4) 当 $a=67.5^{\circ}$ 时, 两者的相关系数 $\gamma=0.999$, 后者与前者之比的平均值为 1.020, 均方差为 0.071. (5) 当 $a=90^{\circ}$ 时, 两者的相关系数 $\gamma=0.999$, 后者与前者之比的平均值为 1.015, 均方差为 0.071.

表 5 耐火极限简化方法计算结果(单位: min)

Tab. 5 Fire resistance by simplified method(unit: min)

编号	$a=0^{\circ}$	$a=22.5^{\circ}$	$a=45^{\circ}$	$a=67.5^{\circ}$	$a=90^{\circ}$
1	140	153	153	150	153
2	192	209	209	204	208
3	206	225	224	219	223
4	165	181	180	176	180

利用式(1), (2), 可求得表 1 中各柱的

耐火极限, 如表 5 所示. 由于试验是针对轴

心受压情况开展的, 简化计算过程中荷载

偏心距 e_0 取为 2. mm (考虑初始缺陷), 与

试验实测值(表 1) 的比较可看出, 两者之间存在一定的差别. 说明除了计算模型本身的误差及回归公式过程中存在的误差外, 还有可能是由于在回归公式的建立过程中, 相关计算参数(如钢筋和混凝土强度等)的取值均为固定代表值, 与试验过程中参数的实际情况存在一定出入. 需要指出的是, 表 1 中耐火极限计算值对应的计算参数均为试验实测值. 从总体上看, 由式(1)和式(2)构成的简化计算方法具有较好的精度, 可供该类构件抗火设计时参考. 在式(1)和式(2)计算结果的基础上, 通过插值可以获得其他荷载角情况下矩形柱的耐火极限.

4 结 论

通过对大量计算结果的分析整理, 建立了四面受火时不同荷载角下矩形柱耐火极限实用计算方法, 并得到如下 5 点结论: (1) 荷载比对矩形柱耐火极限影响很大, 随着荷载比的增加, 矩形柱的耐火极限迅速降低. (2) 随着计算长度的增加, 矩形柱耐火极限近似呈直线降低. (3) 当肢厚保持不变, 随着肢高肢厚比的增大, 矩形柱耐火极限逐渐增加. 对于相同的肢高肢厚比, 随着肢厚的增大, 矩形柱耐火极限近似呈直线增加. (4) 当荷载偏心率在 0~ 1.0 变化时, 矩形柱耐火极限随荷载偏心率的增大而减小. 当荷载偏心率在 1.0~ 2.0 变化时, 荷载偏心率改变对矩形柱耐火极限影响较小. (5) 矩形柱耐火极限随配筋率的增加近似呈直线增长.

参考文献:

[1] 吴 波, 洪 洲. 钢筋混凝土柱的耐火极限研究[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(5): 119-126.
[2] 王 超. 不同受火方式下普通混凝土柱的耐火性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.
[3] TAN K H, YAO Y. Fire resistance of four face heated reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(9): 1220-1229.
[4] 徐玉野. 钢筋混凝土异形柱的抗火性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.
[5] WU Bo, XU Yu-ye. Nonlinear finite element analysis of transient thermal field for RC special shaped columns in fire [C] // Proceedings of the Ninth International Symposium on Structural Engineering for Young Experts, Beijing: Science Press, 2006: 987-993.
[6] 吴 波, 徐玉野. 钢筋混凝土异形柱高温下力学性能的数值模拟[J]. 土木工程学报, 2006, 39(12): 48-53.
[7] KIM J K, LEE S S. The behavior of reinforced concrete columns subjected to axial force and biaxial bending[J]. Engineering Structures, 2000, 22(11): 1518-1528.
[8] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 7-65.

Analysis and Practical Calculation for the Fire Resistance of
Concrete Columns with Rectangular Cross Section

XU Yu-ye, WANG Quan-feng, LUO Yi

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The reliability of numerical program RCSSCF is validated by the experimental results of columns with rectangular cross section at room temperature and high temperature. The influence of some main parameters on the fire resistance of the columns subjected to the ISO 834 standard fire is analyzed using RCSSCF. 9000 rectangular columns subjected to fire on four sides with different load ratios, effective lengths, sectional dimensions, load eccentricity ratios, reinforcement ratios, and load angles are analyzed to find the fire response. Based on the simulation results, a practical calculation formula for the fire resistance of rectangular columns subjected to fire on four sides, is presented.

Keywords: concrete; column; fire resistance; rectangular cross section; practical calculation

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)