

文章编号: 1000-5013(2010)02 0218-06

典型受火方式下等肢 T 形柱的耐火性能

徐玉野, 王全凤, 邱政和

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 利用高温下钢筋混凝土柱基于虚梁法的数值模拟程序 RCSSCF, 分析轴压比、计算长度、截面尺寸、荷载偏心率、配筋率和荷载角等参数对 ISO 834 标准升温过程下典型受火方式钢筋混凝土 T 形柱耐火性能的影响规律. 通过 15 552 种工况下 T 形柱的高温反应分析和计算, 定量给出 3 种受火方式下钢筋混凝土 T 形柱耐火极限的实用计算方法. 研究结果表明, 严格控制轴压比是提高典型受火方式下 T 形柱耐火性能的有效措施; 典型受火方式下, T 形柱的耐火极限随计算长度的增加而线性减小; 荷载角对典型受火方式下 T 形柱的耐火极限影响较大.

关键词: 等肢 T 形柱; 耐火性能; T 形截面; 数值模拟; 受火方式

中图分类号: TU 375.301 **文献标识码:** A

钢筋混凝土异形柱结构具有建筑功能灵活和房间使用质量较高等优点, 近年来在实际工程中的应用日渐广泛. 与此同时, 异形柱结构常温下的研究也取得了可喜的进展, 包括异形柱的抗弯和抗剪性能、梁柱节点的受力性能、异形柱结构的抗震性能研究等^[1]. 在异形柱高温性能研究方面, 文[2-3]进行了 11 根钢筋混凝土异形柱在 ISO 834 标准升温过程下的耐火试验, 编制了钢筋混凝土异形柱的高温反应全过程分析程序 RCSSCF. 同时, 利用该程序给出了四周受火方式下, 矩形柱、L 形柱和 T 形柱等异形柱耐火极限的计算方法^[4-6]. 然而, 实际火灾中由于隔墙的作用, 除了四周受火外, 异形柱还会有其他不同的受火方式. 基于此, 本文研究不同受火方式下, 钢筋混凝土等肢 T 形柱的耐火极限.

1 数值模型及其验证

图 1 为钢筋混凝土 T 形柱的高温数值模型. 图 1 中: x, y, z 是坐标轴, 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, 假定每一小段内截面曲率线性变化, 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[3].

基于该模型的计算程序 RCSSCF, 求得的高温下异形柱的耐火极限与文[2]中试验结果的对比, 如表 1 所示. 表 1 中: 柱的编号对应其在文[2]中的编号, $R_{f,c}, R_{f,exp}$ 分别为耐火极限的计算值和试验值, n 为轴压比, δ 为误差值. 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[7-8]建议的方法确定.

表 1 耐火极限计算结果与试验结果的对比

Tab. 1 Comparison of fire resistance between calculation results and test results

试件	截面形状	n	$R_{f,c}/\text{min}$	$R_{f,exp}/\text{min}$	$\delta/\%$	试件	截面形状	n	$R_{f,c}/\text{min}$	$R_{f,exp}/\text{min}$	$\delta/\%$
Z1	L 形	0.35	150	175	- 14.3	Z7	T 形	0.55	132	124	6.5

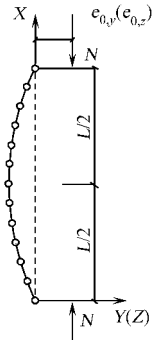


图 1 T 形柱数值模型
Fig. 1 Numerical model of T-shaped column

续表

Continue table

试件	截面形状	n	t_c/min	$t_{\text{exp}}/\text{min}$	$\delta/\%$	试件	截面形状	n	t_c/min	$t_{\text{exp}}/\text{min}$	$\delta/\%$
Z2	L 形	0.45	125	147	- 15.0	Z8	T 形	0.55	174	190	- 8.4
Z3	L 形	0.55	108	102	5.9	Z9	+ 形	0.35	208	245	- 15.1
Z4	L 形	0.55	175	207	- 15.5	Z10	+ 形	0.45	173	165	4.8
Z5	T 形	0.35	178	179	- 0.6	Z11	+ 形	0.55	144	116	24.1
Z6	T 形	0.45	152	148	2.7						

2 参数分析

以硅质骨料的等肢 T 形柱为研究对象, 其截面参数如图 2 所示. 影响等肢 T 形柱耐火极限的因素可能有: 轴压比 n 、计算长度 l 、截面尺寸 $b \times h$ (b 为截面的肢厚, h 为截面的肢高)、荷载偏心率 e ($e = e_0/r_a$, 回转半径 $r_a = \sqrt{I_a/A}$, I_a 为柱截面相对垂直于荷载角 α 方向的形心轴 z_a 的惯性距)、配筋率 ρ ($\rho = A_s/A$, 纵向钢筋的布置如图 3 所示, 假定纵筋直径 d 都相同; $l_c = 200\text{ mm}$; 当 $(h - b)/2 \leq 0.20\text{ m}$ 时, 布置 12 根纵筋; 当 $(h - b)/2 > 0.20\text{ m}$ 时, 布置 18 根纵筋)、荷载角 α (从 z 轴开始, 逆时针为正)、纵筋屈服强度 f_y , 纵筋极限强度 f_u, f_c , 以及混凝土保护层厚度 c 等参数.

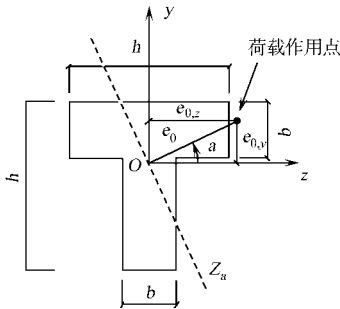
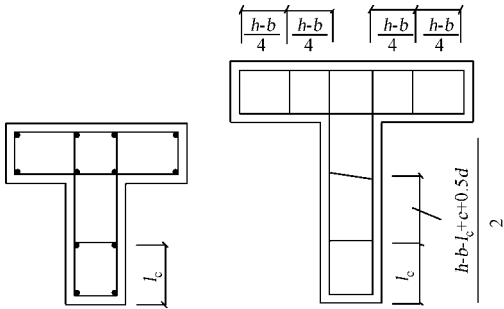


图 2 T 形柱截面参数

Fig.2 Parameters of cross section of T-shaped column



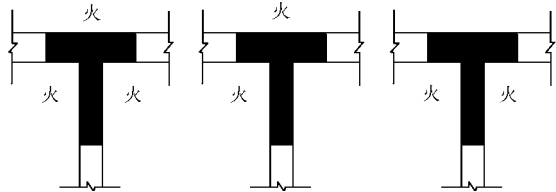
(a) 12 根纵筋 (b) 18 根纵筋

图 3 纵筋钢筋的布置

Fig.3 Arrangement of longitudinal steel bars

T 形柱在真实火灾中可能的 3 种典型受火方式, 如图 4 所示.

下面通过典型算例, 分析各参数对 3 种典型受火作用下等肢 T 形柱耐火极限的影响规律. 在分析过程中, 与墙体相邻的柱表面的热边界条件按绝热处理. 算例的基本条件: $n = 0.4, L = 3.0\text{ m}, b = 200\text{ mm}, h = 60\text{ mm}, \alpha = -90^\circ, e = 0.5, f_c = 30\text{ MPa}, f_y = 375\text{ MPa}, f_u = 500\text{ MPa}, \rho = 1.5\%, c = 30\text{ mm}$, 混凝土含水率 $w_c = 2\%$, 柱初始缺陷取 2 mm . 当考察某些参数变化对 T 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.



(a) FEC1 (b) FEC2 (c) FEC3

图 4 3 种典型受火方式

Fig.4 Three typical fire exposure cases

在 3 种典型受火方式下, T 形柱的耐火极限 R_t 随轴压比、计算长度、截面尺寸、荷载偏心率、配筋率和荷载角的变化情况, 分别如图 5~ 10 所示.

从图 5 可以看出, 轴压比对柱耐火极限影响很大, 随着轴压比的增大, 柱耐火极限明显降低. 从图 6 可以看出, 随着计算长度的增加, 柱耐火极限总体上近似呈直线降低.

等肢 T 形柱的肢厚 b 和肢高肢厚比 h/b 确定后, 其横截面尺寸就已完全确定. 从图 7(a) 可以看出, 当肢厚 b 保持不变, 随着肢高肢厚比 h/b 的增大, 柱的耐火极限总体上逐渐增加. 从图 7(b) 可以看出, 对于相同的肢高肢厚比, 随着肢厚的增大, 柱耐火极限近似呈直线增加.

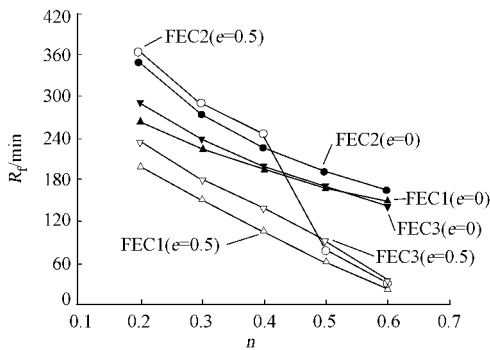


图 5 耐火极限随荷载比的变化情况

Fig. 5 Variation of fire resistance with load ratio

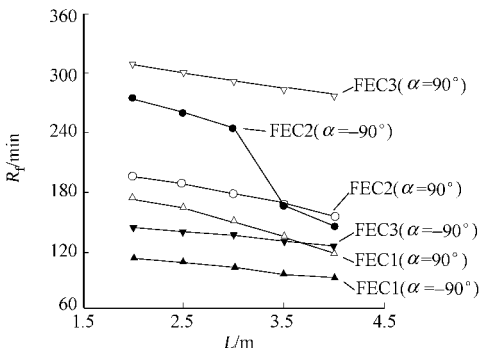
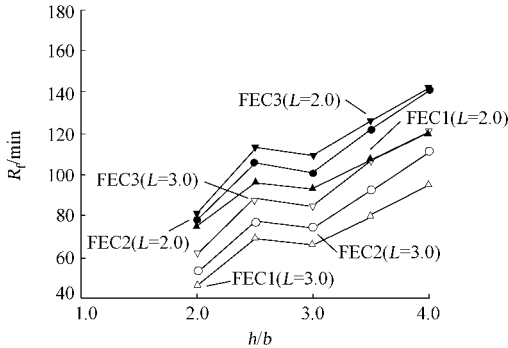
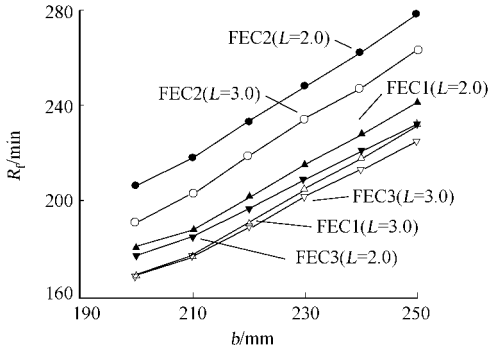


图 6 耐火极限随计算长度的变化情况

Fig. 6 Variation of fire resistance with effective length



(a) $b = 250 \text{ mm}$, $\alpha = 90^\circ$, $e = 1.0$



(b) $h/b = 3$, $e = 0$, $n = 0.5$

图 7 耐火极限随截面尺寸的变化情况

Fig. 7 Variation of fire resistance with sectional dimensions

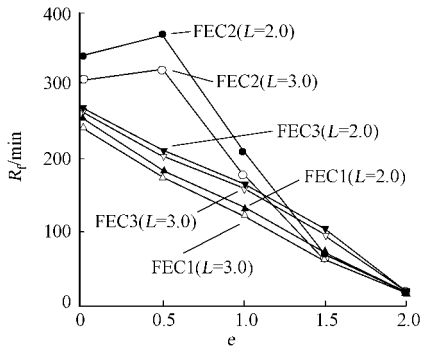


图 8 耐火极限随荷载偏心率的变化情况

Fig. 8 Variation of fire resistance with load eccentricity ratio

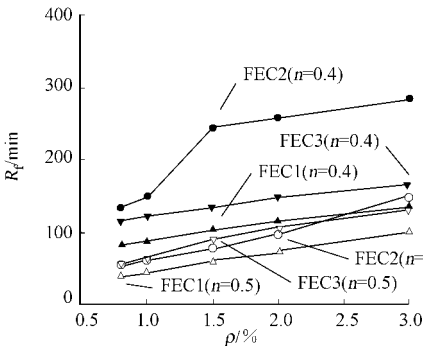


图 9 耐火极限随配筋率的变化情况

Fig. 9 Variation of fire resistance with reinforcement ratio

从图 8 可以看出, 柱耐火极限总体上随着荷载偏心率的增大而减小. 当荷载偏心率较小时, FEC2 受火方式下柱的耐火极限随荷载偏心率的增大略有增加. 这是因为在 FEC2 受火方式下, 柱截面的极强中心朝第 4 象限发生了一定偏移.

从图 9 可以看出, 耐火极限随配筋率的增加近似呈直线增长. 从图 10 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.

总之, 轴压比、计算长度、截面尺寸、荷载偏心率、配筋率和荷载角等对典型受火方式下 T 形柱耐火极限影响较大, 是影响 T 形柱耐火极限的主要因素.

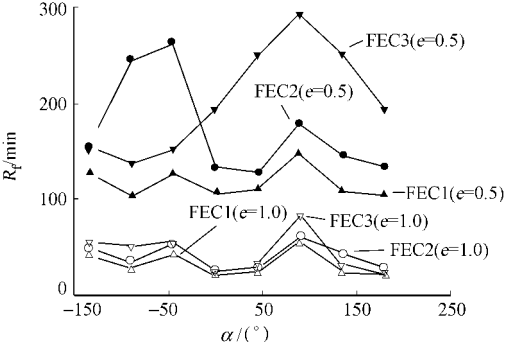


图 10 耐火极限随荷载角的变化情况

Fig. 10 Variation of fire resistance with load angle

3 耐火极限计算方法

针对影响等肢 T 形柱耐火极限的因素, 进行不同工况, 不同受火方式下 T 形柱的高温反应分析. 其中, 受火方式 FEC1, FEC2, FEC3 分别有 4 320, 6 912, 4 320 种不同的工况. 受火方式的相关参数: 计算长度(L)取 3 种, 分别为 2, 3, 4 m; 截面尺寸($b \times h$)取 6 种, 分别为 200×500, 250×500, 200×650, 250×750, 200×800, 250×1 000 (mm×mm); 荷载偏心率(e)取 4 种, 分别为 0, 0.5, 1.0, 2.0; 配筋率(ρ)取 3 种, 分别为 0.01%, 0.02%, 0.03%; 荷载角(α)具体取值, 如表 2 所示.

对不同荷载角和不同荷载偏心率各取 4 种轴压比, 选取的轴压比应大小合适, 不能过大也不能太小. 这是因为如果轴压比取值较低, 则柱耐火极限非常长, 此时柱耐火极限明显满足规范的要求, 进行耐火极限验算意义较小. 但是, 如果轴压比取值过大, 柱在常温下就会发生破坏. 轴压比的具体取值此处不再给出. 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; 混凝土含水率取 2%.

通过对大量工况计算结果的整理和分析, 可以简化给出 3 种典型受火方式下, T 形柱对应于不同荷载角的耐火极限与轴压比、计算长度、截面尺寸、荷载偏心率和配筋率之间的关系. 即

$$R_f = \beta_u \beta_L \beta_b \beta_{h/b} \beta_e \beta_\rho \lambda \lambda_e \tag{1}$$

式(1)中: $\beta_u = c_1 n^2 + c_2 n + c_3$, $\beta_L = c_4 L + c_5$, $\beta_b = c_6 b + c_7$, $\beta_{h/b} = c_8 (h/b)^2 + c_9 (h/b) + c_{10}$, $\beta_e = c_{11} e^3 + c_{12} e^2 + c_{13} e + c_{14}$, $\beta_\rho = c_{15} \rho + c_{16}$, $\lambda = c_{17} ne + c_{18}$, $\lambda_e = c_{19} L/b + c_{20} L/h + c_{21}$, $\lambda_b = c_{22} ne/\rho + c_{23}$. 各系数 $c_1 \sim c_{23}$ 的取值, 如表 3 所示.

表 3 典型受火方式下参数 $c_1 \sim c_{23}$ 的值

受火方式		表 3 Values of parameters $c_1 \sim c_{23}$ for typical fire exposure cases				
		$\alpha / (^\circ)$				
		- 90	- 45	0	45	90
FEC1	c_1	- 0.270	0.247	0.365	0.482	0.877
	c_2	0.637	- 0.687	- 0.930	- 1.160	- 1.910
	c_3	- 0.498	0.599	0.770	0.939	1.570
	c_4	- 0.044	0.002	0.012	0.008	- 0.012
	c_5	1.930	2.110	2.000	2.080	- 3.780
	c_6	4.110	3.240	2.670	2.950	- 0.008
	c_7	- 0.200	- 0.051	- 0.052	- 0.070	9.720×10^{-5}
	c_8	0.540	0.112	0.154	0.142	0.126
	c_9	- 4.330	- 0.879	- 1.210	- 1.140	- 0.949
	c_{10}	19.500	3.930	4.620	4.770	4.170
	c_{11}	- 2.450	2.560	0.954	- 1.190	3.410
	c_{12}	6.550	- 8.370	- 3.890	1.920	- 10.200
	c_{13}	- 3.070	4.900	3.070	0.258	5.460
	c_{14}	19.000	17.100	20.800	23.200	7.240
	c_{15}	22.500	0.315	16.200	5.760	11.200
	c_{16}	0.546	0.894	0.845	0.880	1.290
	c_{17}	0.161	- 0.157	0.225	0.141	- 1.600
	c_{18}	- 0.097	0.167	- 0.169	- 0.099	2.840
	c_{19}	- 0.103	0.069	0.073	0.096	0.195
	c_{20}	0.414	- 0.677	- 0.708	- 0.729	- 2.170
	c_{21}	- 5.250	9.480	9.810	9.870	29.500
	c_{22}	0.154	- 0.196	0.177	0.142	- 0.495
	c_{23}	- 10.700	9.200	- 7.850	- 7.560	24.600

续表

Continue table

受火方式	参数	$\alpha / (^{\circ})$							
		- 135	- 90	- 45	0	45	90	135	180
FEC2	c_1	- 0. 699	- 1. 150	- 0. 569	- 0. 120	- 0. 346	0. 334	0. 589	- 0. 377
	c_2	1. 640	1. 950	- 0. 010	0. 201	0. 924	- 0. 806	- 1. 380	0. 902
	c_3	- 1. 220	- 1. 130	0. 495	- 0. 117	- 0. 711	0. 617	1. 020	- 0. 670
	c_4	- 0. 009	0. 108	0. 156	0. 477	0. 007	0. 045	0. 128	0. 114
	c_5	4. 840	1. 210	2. 130	5. 160	0. 238	- 3. 330	5. 920	5. 550
	c_6	6. 190	4. 710	4. 930	6. 370	- 2. 940	- 0. 438	- 0. 309	10. 100
	c_7	- 0. 157	0. 873	0. 619	0. 391	- 0. 127	0. 008	0. 009	- 0. 196
	c_8	0. 328	0. 953	1. 210	0. 901	0. 140	0. 024	0. 167	0. 183
	c_9	- 2. 760	- 4. 640	- 8. 200	- 7. 160	- 1. 090	- 0. 167	- 1. 340	- 1. 440
	c_{10}	13. 500	23. 200	28. 600	33. 700	7. 570	1. 480	6. 580	6. 260
	c_{11}	0. 501	0. 698	2. 610	1. 710	0. 647	1. 850	0. 291	- 0. 046
	c_{12}	- 1. 590	- 2. 850	- 9. 150	- 6. 330	- 2. 220	- 6. 270	- 1. 140	0. 163
	c_{13}	1. 030	3. 900	8. 220	6. 060	2. 130	5. 100	0. 965	- 0. 122
	c_{14}	2. 120	1. 340	1. 290	2. 470	0. 585	5. 670	4. 300	- 0. 575
	c_{15}	7. 740	1. 960	5. 390	4. 000	4. 130	8. 170	- 0. 030	0. 550
	c_{16}	- 0. 003	1. 600	0. 024	1. 200	0. 461	0. 887	0. 750	0. 055
	c_{17}	- 2. 130	- 5. 590	- 1. 530	- 6. 220	10. 200	- 0. 676	- 1. 100	- 1. 760
	c_{18}	2. 470	2. 330	0. 788	2. 970	- 4. 290	0. 776	0. 890	1. 500
	c_{19}	0. 156	- 0. 003	- 0. 722	- 0. 004	0. 151	0. 152	0. 010	- 0. 015
	c_{20}	- 1. 840	- 0. 005	- 2. 030	- 0. 012	0. 651	- 2. 300	0. 428	- 0. 718
	c_{21}	26. 600	0. 165	44. 500	0. 302	- 15. 200	37. 700	- 9. 150	14. 100
	c_{22}	- 0. 493	0. 325	- 0. 297	0. 242	- 0. 940	- 0. 366	- 0. 214	- 0. 593
	c_{23}	24. 500	- 14. 100	13. 100	- 9. 750	42. 300	15. 800	13. 000	27. 900

受火方式	参数	$\alpha / (^{\circ})$				
		- 90	- 45	0	45	90
FEC3	c_1	- 2. 410	0. 611	- 0. 023	0. 162	1. 830
	c_2	- 2. 410	0. 611	- 0. 595	- 0. 942	- 3. 770
	c_3	- 4. 290	1. 040	0. 688	0. 876	2. 550
	c_4	0. 099	- 0. 066	- 0. 073	0. 063	0. 237
	c_5	7. 210	8. 710	8. 270	4. 000	4. 280
	c_6	- 0. 022	3. 710	8. 070	4. 720	0. 832
	c_7	$8. 600 \times 10^{-4}$	- 0. 150	- 0. 290	- 0. 148	- 0. 006
	c_8	- 0. 203	1. 240	2. 360	0. 301	0. 548
	c_9	1. 560	- 9. 530	- 17. 900	- 2. 240	- 4. 090
	c_{10}	- 5. 440	31. 900	55. 900	7. 420	12. 300
	c_{11}	0. 304	- 1. 670	1. 780	0. 120	- 1. 820
	c_{12}	- 0. 404	5. 830	- 7. 870	- 0. 426	5. 350
	c_{13}	- 0. 529	- 5. 000	12. 900	0. 403	- 3. 060
	c_{14}	- 8. 300	- 9. 170	7. 900	0. 090	- 1. 230
	c_{15}	- 5. 260	- 1. 390	- 0. 042	8. 450	0. 393
	c_{16}	- 0. 599	- 0. 179	- 0. 009	1. 120	0. 072
	c_{17}	0. 989	- 0. 006	0. 039	- 1. 680	3. 750
	c_{18}	- 0. 766	0. 007	- 0. 033	1. 020	2. 610
	c_{19}	- 0. 124	0. 501	0. 543	- 0. 048	0. 032
	c_{20}	1. 600	- 2. 780	- 4. 110	- 0. 999	0. 622
	c_{21}	- 39. 100	45. 100	70. 200	21. 400	- 11. 100
	c_{22}	0. 104	- 0. 195	- 0. 315	- 0. 474	- 0. 316
	c_{23}	- 8. 850	9. 780	12. 000	21. 600	19. 800

在 3 种典型受火方式 FEC1、FEC2 和 FEC3 下,T 形柱耐火极限的程序计算值与回归公式计算值总体上均吻合较好.

FEC1 受火方式下,二者的相关系数 γ 、后者与前者之比的平均值 μ 和均方差 σ 分别为 0. 980, 1. 010 和 0. 101. FEC2 受火方式下,二者的相关系数 γ 、后者与前者之比的平均值 μ 和均方差 σ 分别为 0. 968,

1.010 和 0.119. FEC3 受火方式下, 二者的相关系数 γ 、后者与前者之比的平均值 μ 和均方差 σ 分别为 0.969, 1.010 和 0.117. 这表明, 式(1) 具有较好的精度, 可供该类构件抗火设计时参考. 在式(1) 计算结果的基础上, 通过插值可以获得其他荷载角情况下 T 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 3 种典型受火方式下, T 形柱在不同荷载角下耐火极限的实用计算方法, 并得到如下 4 点结论.

- (1) 随着轴压比的增加, 典型受火方式下 T 形柱耐火极限明显降低.
- (2) 随着计算长度的增加, 典型受火方式下 T 形柱耐火极限总体上近似呈直线降低.
- (3) 典型受火方式下, T 形柱耐火极限随配筋率的增加近似呈直线增长.
- (4) 荷载角对典型受火方式下 T 形柱耐火极限影响较大, 且影响规律较为复杂.

参考文献:

[1] 徐玉野. 钢筋混凝土异形柱结构研究现状与展望[J]. 建筑技术, 2006, 37(2): 136-139.
[2] 吴波, 徐玉野. 钢筋混凝土异形柱高温下力学性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 24-31.
[3] 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.
[4] 徐玉野, 王全凤, 罗漪. 混凝土矩形柱的耐火极限分析及其实用计算[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2008, 29(2): 284-288.
[5] 徐玉野, 吴波. 钢筋混凝土 L 形柱的耐火极限[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2007, 35(7): 110-115.
[6] 吴波, 徐玉野. 钢筋混凝土 T 形柱的耐火极限研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 32-39.
[7] 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.
[8] SHI Xu-dong, TAN Teng-hooi, TAN Kang-hai, et al. Concrete constitutive relationships under different stress-temperature paths[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(12): 1511-1518.

Research on Fire Resistance Performances of T-Shaped Columns with Equal Legs Subjected to Typical Fire Exposure Cases

XU Yu-ye, WANG Quan-feng, QIU Zheng-he

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

Abstract: Using the numerical program RCSSCF for the reinforced concrete column based on the conjugate beam method, the influence of various parameters on the fire resistance performances of T-shaped columns subjected to the ISO 834 standard fire with typical fire exposure cases is investigated, such as axial load ratio, effective length, sectional dimension, load eccentricity ratio, reinforcement ratio and load angle. The fire response of 15552 columns is analyzed. Based on the simulation results, a practical calculation method is proposed for the fire resistance of T-shaped columns subjected to three typical fire exposure cases. The simulation results indicate that: (a) reducing the axial load ratio is an effective measure to improve the fire resistance of T-shaped columns subjected to typical fire exposure cases; (b) the fire resistance of T-shaped columns subjected to typical fire exposure cases decreases linearly with increasing of effective length; and (c) the influence of load angle on the fire resistance of T-shaped columns subjected to typical fire exposure cases is significant.

Keywords: T-shaped columns with equal legs; reinforced concrete; fire resistance; T-shaped cross section; numerical simulation, fire exposure

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)