

文章编号:1673-2049(2005)04-0061-04

受火钢筋混凝土柱截面极限承载力研究

宋晓勇, 邹银生, 涂文戈, 邓济玉

(湖南大学 结构工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘 要:用差分分析法对四面受火钢筋混凝土矩形柱截面温度场进行了分析,并用有限元方法计算了受火后一定温度场下柱截面极限承载力,与试验结果对比吻合较好。在此基础上,对受火柱截面极限承载力的各个影响因素进行了分析,结果表明:增大柱的截面尺寸和纵筋配筋率有利于柱截面极限承载力,以及柱的抗火性能的提高;增加保护层厚度也有利于提高柱截面的极限承载力,但是当保护层厚度增加到一定的程度以后,柱截面的极限弯矩就无法提高,因而只能在一定范围内提高柱的抗弯能力。

关键词:钢筋混凝土柱;火灾;极限承载力;截面尺寸

中图分类号:TU375.3

文献标志码:A

Research on ultimate load capacity of cross section of reinforced concrete columns exposing to fire

SONG Xiao-yong, ZOU Yin-sheng, TU Wen-ge, DENG Ji-yu

(Institute of Structural Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: By using finite difference method, authors calculated the temperature of reinforced concrete columns with rectangular cross section. The ultimate load capacity of columns section with a certain temperature field distribution was also calculated by finite element method. The results were in good agreement with the test data. The effects of different parameters such as cross section size, concrete cover, arrangement of reinforced steel bars, compressive strength of concrete on the ultimate capacity of the rectangular cross section were analyzed. It is concluded that the increase of dimensions, reinforced ratio and concrete cover has a positive effect on columns exposing to fire. Furthermore, the increase of concrete cover is limited in increasing the ultimate bending moment capacity of columns.

Key words: reinforced concrete column; fire; ultimate load capacity; section size

0 引 言

钢筋混凝土柱是建筑结构特别是框架结构中最重要的构件之一。在建筑物遭受火灾的过程中,如果钢筋混凝土柱丧失了承载能力,结构就会发生严重的局部破坏甚至整体坍塌,从而造成严重的后果;火灾后,结构修复工作也会变得更加困难。因此,钢

筋混凝土柱耐火性能一直是各国学者研究的重点。从 20 世纪 70 年代至今, LIE T T、FRANSSEN J M、过镇海等对钢筋混凝土柱的抗火性能进行了深入的理论分析和试验研究。从钢筋混凝土柱抗火性能的试验研究到其受火性能的数值模拟,再到其极限承载力的简化计算,各国学者均进行了大量的工作,并取得了许多研究成果。对于四面受火钢筋混

收稿日期:2005-07-23

基金项目:湖南省建设厅重点项目(2004A-16)

作者简介:宋晓勇(1979-),男,湖北武穴人,工学硕士研究生. E-mail:sxy224@163.com

凝土柱,国外学者大多用一定荷载下钢筋混凝土柱的耐火极限来衡量其抗火性能。但由于影响钢筋混凝土柱耐火时间的因素很多,而且一定荷载下钢筋混凝土柱的耐火极限很难真实地反映火灾过程中柱的抗火性能,使得近年来有不少学者提出了进行真实火灾下钢筋混凝土柱的抗火性能研究,以及实际结构中柱的抗火性能研究等想法。因此,笔者对钢筋混凝土柱受火后的截面极限承载力进行了理论分析,为其受火后截面破坏的判断提供依据,并为真实火灾下以及实际结构中钢筋混凝土柱的抗火性能研究打下了基础。

1 受火柱的截面极限承载力分析

1.1 截面温度场

目前,对截面温度场的理论分析主要有:差分法和有限元—差分混合分析法。有限元—差分混合分析法是分析瞬态温度场时普遍采用的方法,但对于矩形截面的混凝土柱,差分法更加简单、实用,并能满足设计精度要求。笔者采用文献[1]中提出的差分分析法对截面进行分析。截面的网格划分见图1,通过对时间域和空间域的离散,将瞬态导热方程

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

改写成代数方程。对截面上每一个内部的、沿边界的和角部的网格点建立某一时间增量步长的热平衡代数方程,通过不断迭代解联立方程组,即可获得整个时间域上截面的温度分布及其变化。

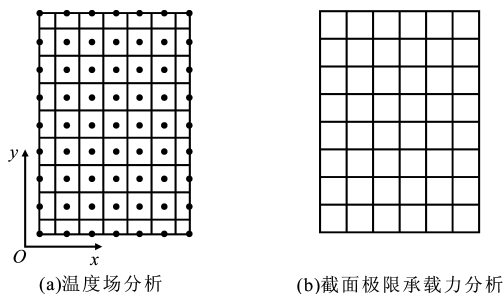


图1 截面网格划分方法

Fig. 1 Divided method of cross section mesh

笔者采用的火灾温度—时间曲线及材料的热工参数为:

(1)ISO834 标准温度—时间曲线

$$T = T_0 + 345 \lg(8t + 1) \quad (2)$$

式中: T_0 为试验炉内的初始温度/K; T 为燃烧开始后 t 分钟时试验炉内的空气平均温度/K。

(2)混凝土的导热系数 $\lambda_c / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$

$$\lambda_c = 2 - 0.24(T - 273)/120 +$$

$$0.012[(T - 273)/120]^2,$$

$$293 K \leq T \leq 1473 K \quad (3)$$

(3)混凝土的质量热容 $C_c / (J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$

$$C_c = 900 + 80(T - 273)/120 -$$

$$4[(T - 273)/120]^2,$$

$$293 K \leq T \leq 1473 K \quad (4)$$

(4)质量密度 ρ_c 及受火边界的换热系数 β_T

$$\rho_c = 2400 kg/m^3 \quad (5)$$

$$\beta_T = 0.07 W/(m^2 \cdot K) \quad (6)$$

1.2 截面极限承载力

文献[2]中指出:截面的极限承载力可以用截面极限轴力—弯矩包络图来表示,即截面的每一种破坏状态均可以在截面的极限轴力—弯矩包络图中找到一点与之相对应。受火后钢筋混凝土柱截面的极限承载力同样可以用截面极限轴力—弯矩包络图表示,但由于受火后的钢筋混凝土柱的截面是非匀质截面,所以必须对柱的截面进行网格划分,用有限元方法对柱截面极限承载力进行分析。

为编制有限元程序进行截面极限承载力计算,笔者采用的基本假定有:

(1)不考虑混凝土爆裂对截面尺寸大小及内部温度场的影响;

(2)平截面变形;

(3)钢筋与混凝土间无滑移;

(4)混凝土的抗拉强度为零;

(5)以截面受压边缘应变达到混凝土的高温极限压应变作为截面的破坏准则。

同时,可以采用文献[1]中的混凝土和Ⅱ~Ⅳ级钢筋的高温本构模型。

1.2.1 混凝土

混凝土棱柱体抗压强度随温度变化的计算式为

$$\frac{f_c^T}{f_c} = \frac{1}{1 + 18[(T - 273)/1000]^{5.1}} \quad (7)$$

式中: f_c^T 、 f_c 分别为高温时和常温时混凝土棱柱体抗压强度。

混凝土受压峰值应变及极限压应变随温度变化的计算式为

$$\frac{\epsilon_p^T}{\epsilon_p} = \frac{\epsilon_u^T}{\epsilon_u} = 1 + 5[(T - 273)/1000]^{1.7} \quad (8)$$

式中: ϵ_p^T 、 ϵ_u^T 和 ϵ_p 、 ϵ_u 分别为高温下和常温下混凝土的受压峰值应变及极限压应变。

混凝土在高温时的应力—应变全曲线方程为

$$\frac{\sigma}{f_c^T} = \begin{cases} 2.2 \frac{\epsilon}{\epsilon_p^T} - 1.4 (\frac{\epsilon}{\epsilon_p^T})^2 + 0.2 (\frac{\epsilon}{\epsilon_p^T})^3 & \epsilon \leq \epsilon_p^T \\ \frac{\epsilon/\epsilon_p^T}{0.8(\epsilon/\epsilon_p^T - 1)^2 + \epsilon/\epsilon_p^T} & \epsilon \geq \epsilon_p^T \end{cases} \quad (9)$$

式中: σ 、 ϵ 分别为混凝土高温时的应力和应变; f_c^T 为混凝土棱柱体高温时的抗压强度。

1.2.2 II~IV级钢筋

钢筋高温极限抗拉强度 f_u^T 的计算式为

$$\frac{f_u^T}{f_u} = \frac{1}{1+36[(T-273)/1\,000]^{6.2}} \quad (10)$$

钢筋高温屈服强度 f_y^T 的计算式为

$$\frac{f_y^T}{f_y} = \frac{1}{1+24[(T-273)/1\,000]^{4.5}} \quad (11)$$

高温($T \geq 473\text{ K}$)下,钢筋的应力—应变曲线方程为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{f_y^T}{\epsilon_y^T} \epsilon & \epsilon &\leq \epsilon_y^T \\ \sigma &= f_y^T + (f_u^T - f_y^T)(1.5\xi - 0.5\xi^3)^{0.62} & \epsilon_y^T &\leq \epsilon \leq \epsilon_u^T \\ \xi &= \frac{\epsilon - \epsilon_y^T}{\epsilon_u^T - \epsilon_y^T} \\ \epsilon_y^T &= 1.2\epsilon_y \\ \epsilon_u^T &= 0.16 - 0.23\left(\frac{T-273}{1\,000}\right) \geq 0.02 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: ξ 为相对坐标; ϵ_y^T 为钢筋的高温屈服应变; ϵ_u^T 为钢筋的高温极限抗拉应变。

根据本节的基本假定和钢筋、混凝土的高温本构关系,对截面进行网格划分后[图1(b)],就可以根据式(13)、(14)分别确定截面内的轴力和弯矩

$$N = \int_{A_c} \sigma_c(T, \epsilon_c) dA_c + \sum_i \sigma_{si}(T_i, \epsilon_{si}) A_{si} \quad (13)$$

$$M = \int_{A_c} \sigma_c(T, \epsilon_c) y dA_c + \sum_i \sigma_{si}(T_i, \epsilon_{si}) y_{si} A_{si} \quad (14)$$

根据本节的基本假定(5),假设截面受压边缘应变达到混凝土的高温极限压应变,通过不断增加曲率 φ ,就可以计算出截面每个极限状态下的轴力和弯矩。

1.3 实例验证

1986年HASS在布伦瑞克科技大学做了39根钢筋混凝土柱的抗火试验,试验的升温曲线采用ISO 834标准升温曲线,试验数据见文献[3]。由于本文是针对柱截面极限承载力的计算,而试验数据是柱的极限承载力的结果,为了使试验结果与程序计算的结果进行对比,现假设柱破坏截面处的挠度与截面计算曲率的关系符合式(15)[4]

$$y = \varphi L_k^2 / 12 \quad (15)$$

式中: y 为柱在破坏截面处的挠度; L_k 为柱的有效长度; φ 为截面在极限状态时的计算曲率。

用HASS试验条件通过程序算出截面升温到某个时刻的极限承载力,并绘出极限轴力—弯矩包络图,弯矩图中的弯矩即为计算弯矩 M_c ;然后在图

2中找出试验施加荷载的对应点,即为截面的破坏临界点,根据程序得到截面的曲率,将此曲率修正后(修正为截面升温应变引起的曲率,修正系数由对比试算得到,大偏压为0.25,小偏压为0.45),再根据式(15)计算出破坏截面处柱的挠度,将此挠度值与荷载偏心距相加后乘以施加的轴力就能计算出截面所承受的弯矩,即为试验折算弯矩 M_t 。将计算弯矩和试验折算弯矩进行对比可以看出:近50%的数据吻合;23%的数据相差20%左右;30%的数据相差达到40%,也有极少数柱偏差很大,这主要是由于混凝土柱抗火研究的试验数据本身就存在很大的离散性(图2、3)。

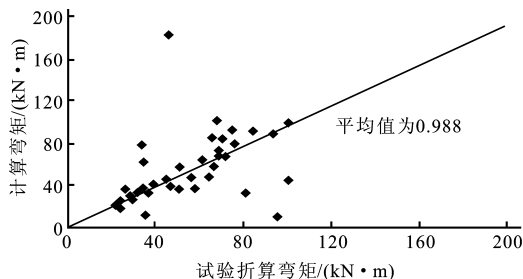


图2 弯矩计算值与试验值相关点的分布

Fig. 2 Distribution of relative points between calculation and experimental value of moments

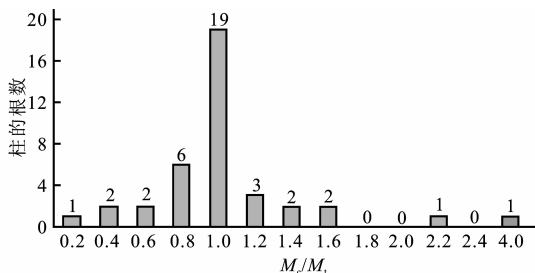


图3 弯矩计算值与试验值的比值分布

Fig. 3 Distribution of ratio of calculation and experimental value of moments

2 截面极限承载力影响因素分析

利用编制的程序,通过改变柱的截面尺寸、保护层厚度、纵筋配筋率及混凝土的抗压强度等影响因素,就可以得到一系列的柱截面极限轴力—弯矩包络图,如图4所示。经过对比分析,可以得出各因素对受火柱截面极限承载力的影响规律。

2.1 截面尺寸

从图4(a)可以看出:增加柱截面的宽度,可以使柱截面的极限轴力大大提高,而对柱截面的极限弯矩提高有限,柱截面极限弯矩在纯弯矩受力状态时几乎没有提高;增加柱截面的高度,可以使柱截面的极限轴力和极限弯矩均得到很大的提高。这说

明:如果四面受火的钢筋混凝土矩形柱处于沿宽度方向受弯的状态下,柱截面极限承载能力将会大大的降低。文献[5]中已经通过试验验证了增大柱截面尺寸有利于受火柱承载能力的提高。

2.2 保护层厚度

从图 4(b)可以看出:当柱的保护层厚度由 30 mm 增加到 40 mm 后,柱的极限轴力和极限弯矩均有很程度的提高;当柱的保护层的厚度由 40 mm 增加到 50 mm 后,柱的极限轴力也有提高,而极限弯矩提高却有限。文献[6]中已通过试验证实了随着柱的保护层厚度不断地增加,受火构件抗弯承载力的提高越来越小。

2.3 纵筋配筋率

从图 4(c)可以看出:柱截面纵筋配筋率的提高使柱截面的极限轴力和极限弯矩均得到相同程度的提高。文献[5]中也通过试验验证了提高柱的纵筋配筋率对提高柱抗火性能是有利的,但又同时指出:当钢筋的直径提高到 25 mm 时,柱的抗火性能反而急剧下降。这可能是由于配置大直径的钢筋的柱表面容易发生爆裂,从而使柱抗火性能下降。

2.4 混凝土的抗压强度

从图 4(d)可以看出:提高混凝土的抗压强度可以显著地提高柱截面的极限轴力,但对柱截面的极限弯矩提高却很有限,在纯弯矩作用下,柱截面的极限弯矩提高为零。而有很多研究者已经证实:高强混凝土

土柱的表面更容易发生爆裂,对柱的抗火极为不利。

值得一提的是:上述影响受火柱截面极限承载力的因素中,有些因素的取值大小会改变另外一些因素对受火柱截面极限承载力的影响。如提高柱的截面尺寸,则保护层厚度提高的限值就能得到一定的提高,而在柱的保护层厚度很小的情况下,增加纵筋的配筋率对柱截面极限承载力的提高并不明显。这说明:受火后柱的截面极限承载力的影响因素是错综复杂的。另外,短柱的极限承载力和其截面极限承载力是一致的,而长柱的极限承载力还必须考虑二阶效应的影响。

3 结 语

(1)四面受火的钢筋混凝土柱的截面是非匀质截面,而且截面边缘混凝土的极限压应变随温度的升高而不断地增大,这使得柱截面的极限承载力和常温时相比呈现出了一些不同的特点。

(2)通过对四面受火钢筋混凝土矩形柱截面的极限承载力进行理论分析,可以发现:增加柱截面尺寸特别是截面高度,增大配筋率以及在一定范围内增加混凝土的保护层厚度,均能明显地提高柱截面的极限承载力。而提高混凝土的抗压强度,则能有效地提高截面的极限轴力,但对极限弯矩的提高有限。

参考文献:

- [1] 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,2002.
- [2] MACGREGOR J G. Reinforced Concrete[M]. New Jersey: Prentice Hall,1997.
- [3] TAN K H, TANG C Y. Interaction formula for reinforced concrete columns in fire conditions[J]. ACI Structural Journal,2004,101(3):19—28.
- [4] LIE T T, CELIKKOL B. Method to calculate the fire resistance of circular reinforced concrete columns[J]. ACI Materials Journal,1991,88(12):84—91.
- [5] DOTREPPE J C, FRANSSEN J M, BRULS A, et al. Experimental research on the determination of the main parameters affecting the behaviour of reinforced concrete columns under fire conditions[J]. Magazine of Concrete Research,1996,179(49):117—127.
- [6] SHI Xu-dong, TAN Teng-hooi, TAN Kang-hai, GUO Zhen-hai. Influence of concrete cover on fire resistance of reinforced concrete flexural members[J]. Journal of Structural Engineering,2004,130(8):1 225—1 232.

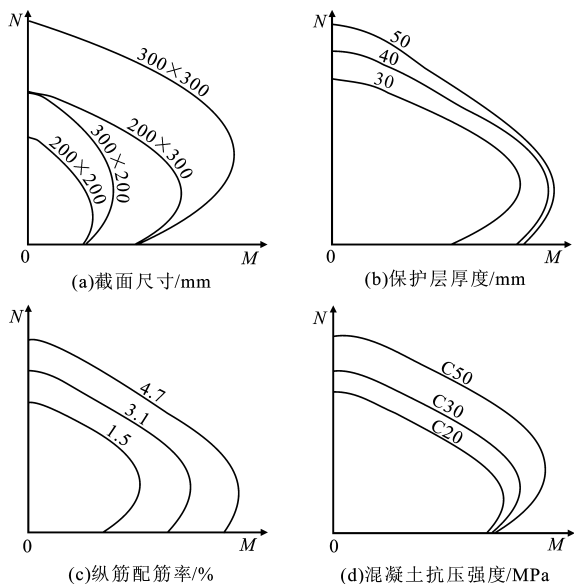


图 4 各主要参数对柱截面极限承载力的影响

Fig. 4 Influence of main parameters on column section ultimate capacity