

文章编号: 1004-4574(2007)06-0088-05

火灾下空间混凝土框架结构的反应分析与模拟

陈适才, 任爱珠, 陆新征

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要: 根据作者开发并经过试验验证的纤维梁单元模型和分层壳单元模型, 通过考虑他们之间的协调关系, 建立了考虑楼板的空间混凝土框架结构火灾反应数值模型, 并通过作者开发的火灾反应分析系统 RCFire, 实现了整体结构的火灾反应分析。纤维梁单元模型和分层壳单元模型均通过在截面上进行细分, 从而考虑了不均匀温度场及材料非线性的影响。通过对一个具体框架火灾反应的分析, 探讨了整体结构火灾反应的规律, 为结构设计人员提高建筑结构的火灾安全提供参考。

关键词: 火灾反应; 空间混凝土框架; 单元模型; 数值模拟

中图分类号: TU352.5

文献标识码: A

Numerical analysis and simulation of space concrete frames under fire

CHEN Shi-cai, REN Ai-zhu, LU Xin-zheng

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Based on the fiber element model and layered shell element model developed and validated by the authors, this paper establishes the numerical model for space concrete frames under fire. The connection relationship between the both element models is also considered and the overall analysis process of space concrete frames under fire is accomplished by a system (RCFire) developed for analyzing the overall behavior of structures under fire. To consider the non-uniform temperature distribution and material nonlinearity, the across-sections of the both elements are subdivided into many small fibers or layers. Finally, a concrete frame structure under fire is analyzed and the response regularity is investigated. The results can be used as the reference for the fire safety design of building structures under fire.

Keywords fire response; space concrete frame; element model; numerical simulation

火灾可以导致结构发生局部破坏甚至整体倒塌, 虽然一般结构在火灾下发生倒塌的机率较小, 但由于缺乏具体的整体结构的火灾试验研究和理论分析, 所以其倒塌破坏规律难以让人们了解。正因为一般的结构在火灾中倒塌的可能性比较小, 所以一旦结构尤其是混凝土结构在火灾中发生倒塌, 那么倒塌的原因就认为是结构中钢筋布置连续性不好, 或者是结构的施工质量没有得到保证, 而没有去分析整体结构的火灾反应规律。而只有了解了结构火灾反应中对整体结构稳定的有利与不利因素之后, 才有利于工程师从根本上提高结构的耐火性能。

目前, 整体结构的火灾试验非常少见, Cardington一足尺框架结构的火灾试验表明了火灾试验的昂贵并且其试验结果只能适用于特定的结构^[1]。因此, 通过建立分析模型进行数值模拟成为当前研究结构火灾反

收稿日期: 2007-10-11 修订日期: 2007-11-10

基金项目: 国家“十一五”支撑计划(2006BAK01A02-09); 清华大学基础研究基金资助项目(JC2007003)

作者简介: 陈适才(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事结构抗火研究。E-mail: chensc04@mails.tsinghua.edu.cn

应的重要手段。对于钢框架的火灾反应分析, 通过考虑温度影响的塑性铰的分析方法被广泛采用^[2-3], 文献[4]还采用塑性铰方法进一步提出了多层钢框架火灾反应的简化计算模型。对于混凝土结构的火灾反应, 研究者们也采用了塑性铰的方法来分析 and 验证单层单跨混凝土框架的火灾反应^[5], 但目前对于多层混凝土框架的火灾反应规律及其破坏机制的研究还很少, 对于实际考虑楼板的三维框架结构的火灾反应分析更为少见。

为了实现火灾下整体结构的耐火性能分析, 作者首先以热传导的基本微分方程和有限元-差分混合分析法建立了热分析模型^[6], 开发了热分析模块程序, 解决了整体结构内部温度场的分析问题。开发了纤维梁单元模型^[7], 考虑了梁、柱构件截面的不均匀温度场分布以及材料与几何非线性问题。开发了分层壳单元模型, 在每一层上考虑了火灾温度以及材料非线性影响, 可以用于结构中混凝土楼板的火灾反应分析。采用以上开发并经过试验验证的纤维梁与分层壳单元模型以及结构瞬态热传导分析模块, 作者进一步以 MSC/PATRAN 为平台^[8], 利用其提供的开发语言 PCL (patran command language), 结合 Fortran 语言, 通过客户化以及窗体增设等技术开发了建筑结构火灾反应分析系统 RCFire。

本文主要基于以上纤维梁单元和分层壳单元模型, 并通过考虑他们之间的位移协调连接, 建立了钢筋混凝土结构火灾下的数值模拟模型。并利用作者开发的分析系统 RCFire 对考虑楼板的钢筋混凝土框架结构进行火灾反应分析, 同时还探讨了火灾下结构构件的相互作用规律, 从而可以进一步了解结构的火灾反应规律, 为结构的性能化防火分析与设计提供科学依据。

1 RCFire系统框架与功能模块

RCFire系统采用了有限元软件开发设计方法, 进行结构化模块设计, 是一个主要用于建筑结构热分析与结构热力反应分析的系统工具。其主要功能模块有: 模型建立模块; 常规荷载与火灾荷载施加模块; 热分析模块; 热力分析模块; 结果处理模块。

模型建立模块主要采用纤维梁单元和分层壳单元来建立建筑结构的数值计算模型, 常规荷载与火灾荷载施加模块可以施加一般荷载和火灾荷载。其中的热分析模块可以直接连接区域火场模拟软件的火场模拟结果, 根据构件在房间区域中的位置, 进行瞬态热传导分析。其热分析结果, 分别对应着结构中的纤维梁单元与分层壳单元, 再通过热力分析模块 RCFire 实现热力分析过程。结果处理模块可以显示整个结构的火灾反应过程, 以及提取各结点的计算结果并生成相应的变化曲线。该系统的设计框架图如图 1 所示。

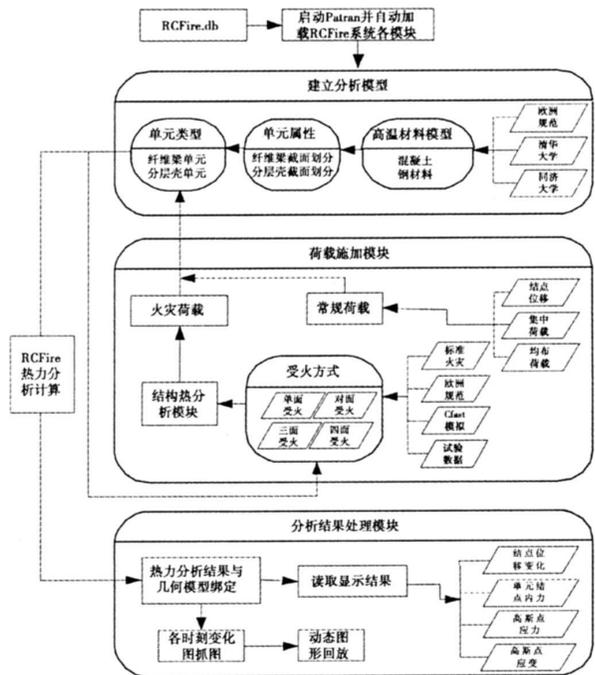


图 1 RCFire系统框架图

Fig 1 Framework of RCFire system

2 数值模型

两结点纤维梁单元如图 2(a), 八结点四边形分层壳单元如图 2(b), 如果壳单元结点处有梁单元则如图 2(c)所示。当梁对板的转动约束比较小时, 可以认为梁单元与壳单元在共同结点处铰接, 即梁、壳单元共同结点的线位移相同而转角位移可以不同; 当梁对板的转动约束比较大时, 可以认为梁单元与壳单元在共同结点处刚接, 即梁、壳单元共同结点的线位移和转角位移都相同。

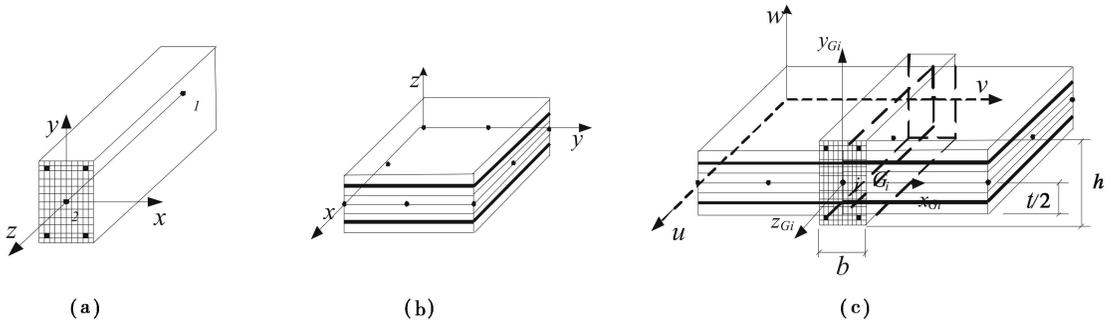


图 2 纤维梁与分层壳单元及其连接模型

Fig 2 Fiber beam and layered shell model and their connection

3 考虑楼板的混凝土框架结构火灾反应分析

由于考虑楼板影响的实际结构的火灾试验与理论分析十分少见, 为了分析其在火灾下的耐火性能及其火灾反应规律, 本文根据混凝土结构设计规范设计了一典型多层框架进行分析。该框架的主要参数为: 首层层高 3.6 m, 其余层高 3 m。框架柱截面尺寸 300 mm × 300 mm, 梁截面都设计为 250 mm × 400 mm, 楼板厚度取为 120 mm。混凝土强度均按 $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$ 计算。楼面与屋面恒载均取为 8.5 kN/m^2 , 活载为 1.5 kN/m^2 。结构梁柱的平面、立面布置以及受火房间情况见图 3 结构配筋计算按照 PKPM 软件进行计算。

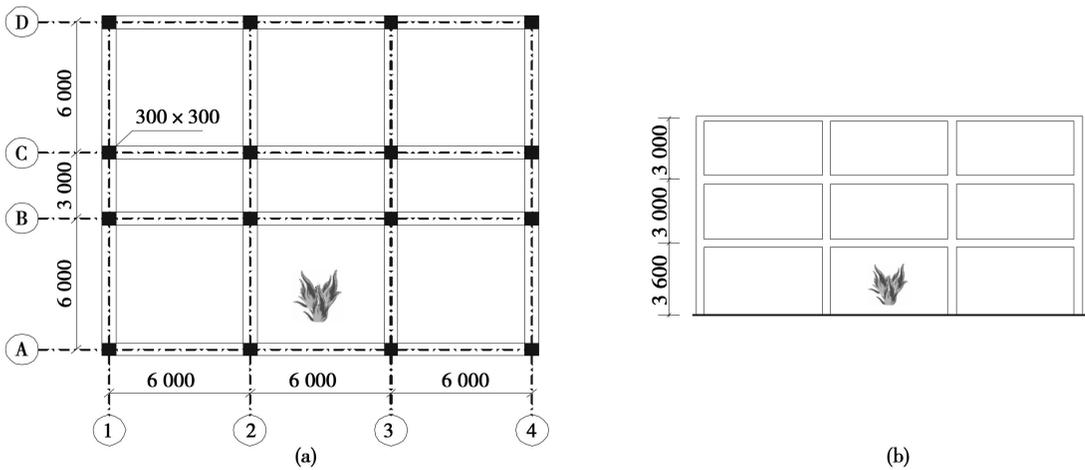


图 3 结构梁柱布置以及受火房间情况

Fig 3 Lay out of concrete frame and location of the fire

在分析结构在火灾下的性能时, 假设 ISO 标准火灾发生在底层 A ②轴与 2 3轴之间的房间。在考虑局部火灾下结构的反应时, 由于远离受火部位的楼板对结构影响较小, 为了简化有限元模型, 此处不考虑非受火楼层的楼板, 而荷载通过等效方法直接加载到周围的梁柱上面。单元模型仍然采用前面的纤维梁与分层壳单元, 它们之间的连接采用本文第 2 节的方法考虑, 采用本文作者开发的分析系统 RCFire 建立的有限元模型见图 4(a)。图 4(b)表示了常温下结构的位移, 中间跨板的中心点挠度为 8.7 mm, 而边跨房间的楼板受到周围的约束较中跨的要小, 所以其中心点的挠度为 11.9 mm, 比中间跨的稍大。

对着火房间相应部位的构件进行热传导分析时, 认为四周的柱子都是靠近房间里面的两个面受火, 四周的梁都三面受火。采用热分析模型分析时, 材料的热工性能随温度变化关系按照欧洲规范取值。热分析过程与结果此处不再详述。

升温前中跨板的挠度比边跨的稍小, 随着温度的升高, 中跨的板截面开始产生不均匀温度场, 其挠度也开始增大, 10 min 时其挠度达到 27.6 mm, 超过了边跨的挠度 (如图 5(c)所示)。随着温度的继续升高, 板的挠度进一步增大 (如图 5(a)所示), 由于受火梁的挠度也在增大, 所以边跨板的挠度也有增大的趋势。与此同时, 受火房间两边柱 (A 轴线上的中间两柱) 的侧向位移也开始产生 (如图 5(b)所示), 这是由于中跨楼板

的受热导致的横向变形而产生。图 5(b)还比较了不考虑楼板情况下的侧向位移, 由图 5(b)可见, 考虑楼板时的侧向位移比不考虑时大很多, 所以楼板对整体结构的火灾反应起着重要影响。而单独的构件或平面的火灾反应试验与理论分析都难以考虑到这种整体结构中表现出来的行为。图 5(c)表示了第 21 步后也就是 100 min 时, 结构的变形图, 此时的中跨楼板最大挠度达到 94.9 mm, 而此时受火房间两边柱的侧向挠度达到 16.1 mm, 图 5(d)表示了其明显的侧向位移。

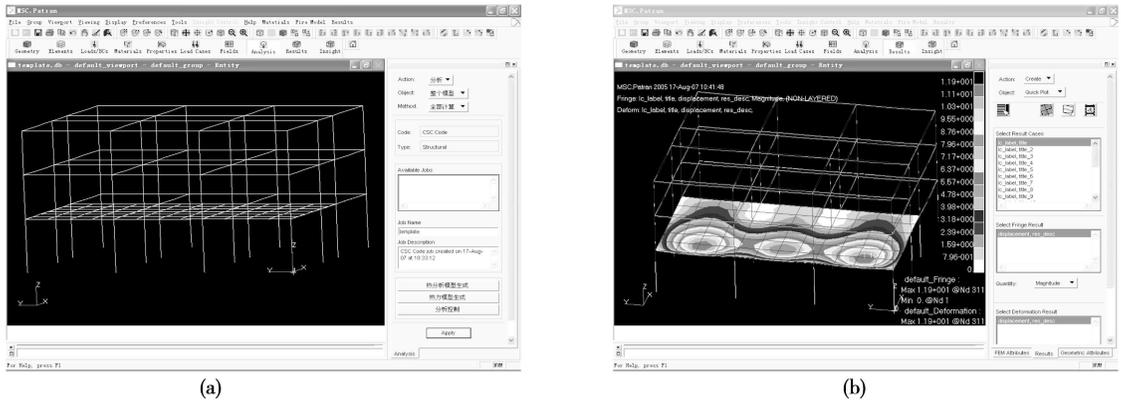


图 4 RCFire 中的结构有限元模型以及常温下的计算结果

Fig 4 FE model in RCFire and the results under normal temperature

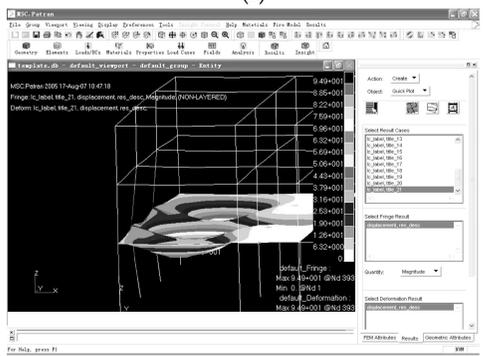
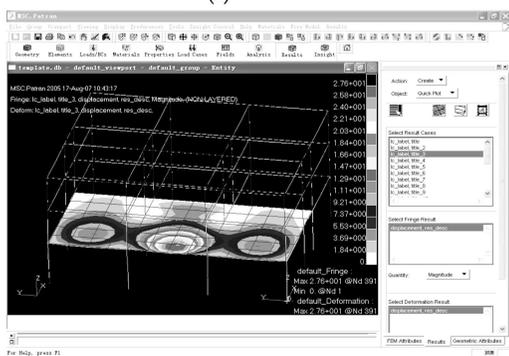
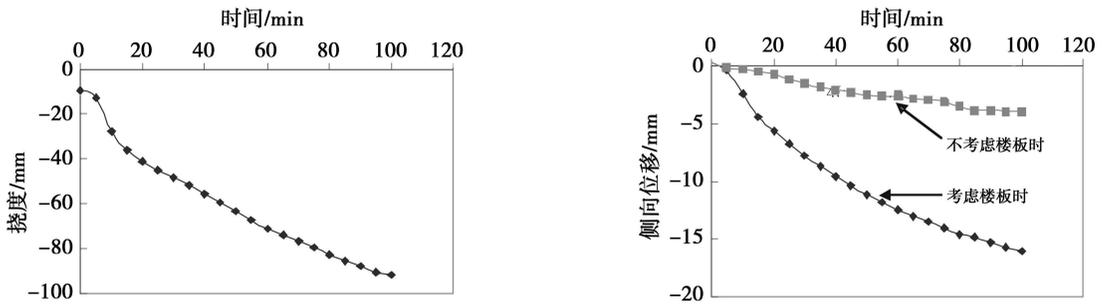


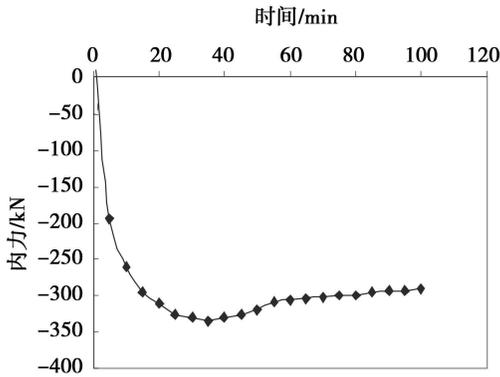
图 5 火灾下结构的反应

Fig 5 Fire response of the frame structure under fire

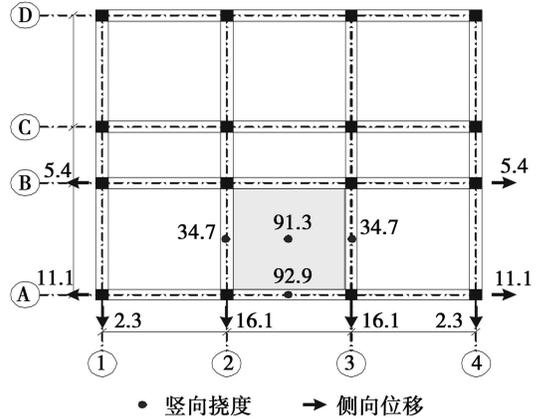
一般结构发生火灾时, 只有部分结构受热, 并且受热的构件之间以及受热构件与非受热构件之间都存在相互作用。对于上面的多层框架结构, 在温度的升高过程中, 楼板受热而膨胀, 由于受到周围非受热结构的约束作用, 使得边柱产生部分侧移的同时, 其自身受到的内力也增大 (见图 6(a))。楼板受到的这种压应力属于自身平面内的压应力, 从一般有限元方法中, 我们知道, 如果采用一般的平板单元来分析的话, 由于板单元不考虑平面内的应力而只考虑平面外的弯曲效应, 那么将不能很好地模拟火灾下楼板的这种压膜内力。与一般简支双向板不同的是, 此处的连续楼板在开始挠度较小时, 整个受火区域部分都存在这种薄膜压力, 而通过周围非受热结构来平衡这种压膜内力。单独的构件或平面的火灾反应试验与理论分析也都难以考虑到这种整体结构中表现出来的行为。另外, 这种压应力可以提高楼板抵抗外部荷载的能力, 所以火灾引起的

这种内力变化对楼板的稳定是有益的。

虽然火灾引起的楼板内力的增加对楼板的稳定是有益的,但也导致了周围结构的侧移,并且在整体分析中考虑楼板时的边柱侧向位移比不考虑楼板时的要大(见图 5(b)),图 6(b)表示了在 100 min 时整体结构的侧向位移与受火区域楼板的挠度值,楼板的存在又对周围结构的稳定产生了不利影响,尤其是对柱子这样的竖向承载构件影响甚大,因为柱子的侧向位移过大会导致结构的提前倒塌。这种因素导致的结构倒塌将不再是结构的施工质量问题所致。



(a)



(b)

图 6 结构火灾反应中的压膜力以及变形图

Fig. 6 Membrane force and displacements for the structure under fire

4 结论

目前许多已经建立的数值模型,主要基于单独构件,因此,这些数值模型主要用于构件以及平面结构的火灾反应分析,虽然他们的分析结果与试验结果吻合较好,但是不能考虑楼板的作用,所以需要建立三维分析模型。将已有的针对平面的分析模型转换为三维数值模型,可以通过将平面的梁柱理论按照三维梁柱理论建立,但仍然不能考虑楼板的效应。

本文根据作者建立的纤维模型和分层壳单元模型,介绍了考虑楼板的实际结构的三维数值分析模型以及根据此模型开发的结构火灾反应分析系统 RCFire。运用本文建立的考虑楼板的实际结构的三维数值分析模型分析了一带楼板的三层混凝土框架结构在局部火灾下的耐火性能与反应规律。结果表明:火灾下,考虑楼板时的结构反应与不考虑楼板时构件的反应不一样,楼板的存在对整体结构的火灾性能有有利的影响也有不利的影响,在实际结构设计中需要考虑这些影响,才有利于从根本上提高结构的耐火性能。

参考文献:

[1] Bailey C. Holistic behavior of concrete buildings in Fire[C] //Proceedings of ICE, Structures and Buildings 2002, Issue 3 199- 212.

[2] Najjar S R, Burgess I W. A non-linear analysis for three-dimensional steel frames in fire conditions [J]. Engineering Structures 1996 18(1): 77 - 89

[3] Ma K Y, Richard L J Y. Nonlinear plastic hinge analysis of three-dimensional steel frames in fire [J]. Journal of Structural Engineering 2004 130(7): 981- 990.

[4] Souza V, Creus G J. Simplified elastoplastic analysis of general frames on fire [J]. Engineering Structures 2007, 29(4): 511- 518.

[5] 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.

[6] Chen S C, Ren A Z. A fire simulation of reinforced concrete frame structures for the thermal and structural analysis[C] //Proc. NCITE /ITCSED, New Delhi, India 2006: 125- 137.

[7] Chen S C, Lu X Z, Ren A Z. Fiber beam element model for the collapse simulation of concrete structures under fire[C] //Computational Mechanics, ISCM, Beijing 2007: 288- 298.

[8] MacNeal S. MSC / PATRAN version 8.0, user's guide volume 4[M]. USA: MSC Corporation, 1998.