

文章编号: 1000-4750(2012)04-0096-08

# 混凝土框架结构火灾连续倒塌数值分析模型

李 易<sup>1,2</sup>, 陆新征<sup>1,2</sup>, 叶列平<sup>1,2</sup>, 任爱珠<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 连续倒塌是整体结构的力学行为, 为了研究火灾作用下混凝土框架结构整体抗倒塌性能, 建立了用于分析钢筋混凝土构件火灾反应的杆系纤维梁模型和板构件的分层壳模型。在构件层次, 模型将各积分点的截面划分为若干纤维(层), 纤维(层)被赋予不同的材料属性以考虑钢筋和混凝土的贡献, 并通过平截面假定来定义构件变形和纤维(层)应变之间的协调关系; 在材料层次, 模型将温度-应力路径离散为若干加载步, 然后在每个加载步内计算纤维(层)在温度和应力耦合作用下的各种应变分量。通过与一系列试验对比, 说明了该模型在模拟混凝土梁、柱和楼板时的准确性和高效性。为了模拟整体结构倒塌过程中的不连续位移场, 在模型中引入了构件破坏准则和单元生死技术, 可以考虑构件破坏造成的内力重分布对整体结构力学响应的影响。最后, 通过一个整体框架结构的火灾倒塌模拟, 分析其连续倒塌过程和机理。

**关键词:** 混凝土框架结构; 火灾倒塌; 数值模型; 纤维梁; 分层壳; 破坏准则

**中图分类号:** TU318; TU375.4 **文献标志码:** A

## NUMERICAL MODELS OF FIRE INDUCED PROGRESSIVE COLLAPSE ANALYSIS FOR REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES

LI Yi<sup>1,2</sup>, LU Xin-zheng<sup>1,2</sup>, YE Lie-ping<sup>1,2</sup>, REN Ai-zhu<sup>1,2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Progressive collapse is the global behavior of the whole structural system. In order to investigate the fire induced progressive collapse of reinforced concrete (RC) frame structures, a fiber beam model for RC beam and column and a multilayer shell model for RC slab are established. In elemental-scale, the sections at integration points are divided into some fibers or layers. Different material properties are assigned with various fibers and layers to consider the contribution of steel reinforcement and concrete. The relationship between the deformations of elements and the strains of fibers or layers is defined according to the assumption that plane section remains plane. For materials, temperature-stress loading path is discretized into sub-increments. The various strains of fibers or layers, induced by coupled actions of temperature and stresses, are calculated within each sub-increment. The accuracy and efficiency of the models in simulating the behaviors of RC beams, columns and slabs in fire are validated through a series of fire tests. In order to simulate the discontinuous displacement field during the procedure of structure collapse, the failure criterion and the deactivation of the structural elements are introduced to the model. Therefore, the influence of internal force redistribution induced by element failure on the mechanical response of the whole structure is taken into consideration. At last, a frame structure is analyzed to study the failure mechanism of its fire induced collapse via the proposed numerical models.

收稿日期: 2010-06-02; 修改日期: 2010-08-13

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAJ03A02-01); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB719703); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-528)

通讯作者: 陆新征(1978—), 男, 安徽人, 副教授, 博士, 副所长, 主要从事结构非线性计算和仿真研究(E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn).

作者简介: 李 易(1981—), 男, 湖北人, 博士生, 从事混凝土结构抗连续倒塌设计方法研究(E-mail: yili07@mails.tsinghua.edu.cn);

叶列平(1960—), 男, 江苏人, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构, 地震工程研究;

任爱珠(1946—), 女, 浙江人, 教授, 博士, 主要从事计算机火灾模拟、城市防灾减灾方面的研究。

**Key words:** concrete frame structure; fire induced collapse; numerical model; fiber beam; multi-layer shell; failure criterion

目前,建筑物在灾害作用下的连续倒塌问题已经成为当前土木工程的重点研究方向<sup>[1]</sup>。连续倒塌是指结构因意外事件或灾害导致局部破坏后,引起整体结构不成比例的倒塌破坏<sup>[2]</sup>。现有规范中连续倒塌分析方法多是<sup>[3-4]</sup>:假设灾害荷载在瞬间造成一个或多个局部竖向支撑构件的失效,形成结构的初始破坏,然后用动力方法(或考虑动力效应修正的静力方法)来分析剩余结构在初始破坏发生后的力学响应。这种分析方法的假设前提是灾害荷载破坏作用集中而且作用时间非常短,这符合爆炸、冲击这类瞬时动力灾害荷载的特点。

火灾是另一种可能造成结构局部严重破坏进而引起连续倒塌的灾害荷载。但是,火灾引起的连续倒塌和瞬时动力灾害荷载引起的倒塌相比还有所不同:首先,火灾作用区域相对较大,区域内的所有受火构件的材料力学性能均发生不同程度的削弱,同时随着火灾的蔓延,结构初始损伤范围也随之发生变化,简单采用拆除个别构件的方法来模拟初始局部损伤不合理;其次,在倒塌发生之前,结构的火灾受力过程是一个长持时的准静态过程(往往长达几个小时),与爆炸、撞击等瞬时作用也不同;再次,构件的热膨胀对结构体系的受力具有重要影响,有时这种作为关键性作用<sup>[5]</sup>。因此现有规范连续倒塌分析方法没有考虑到火灾作用的特殊性,不适用于火灾引起的连续倒塌问题。

合理的火灾倒塌分析方法是抗火灾倒塌研究和设计的前提。由于整体结构火灾倒塌实验难度极大,故而必须依赖数值模拟。火灾倒塌分析对数值模型提出了以下要求:

- 1) 准确。火灾倒塌分析模型的首要要求是准确性,它将直接影响到倒塌分析结果的可靠性。
- 2) 高效。倒塌是结构的整体行为,为了实现整体结构倒塌模拟,火灾倒塌分析模型还需要具有较高的分析效率。
- 3) 稳定的非线性求解能力。倒塌是一个复杂的强非线性过程,稳定的非线性求解技术是保证计算顺利完成的基础。

因此,为满足上述要求,本文基于大型通用有限元程序 MSC.MARC,利用其二次开发功能,建立了火灾下的倒塌模拟分析程序 TFCS(Tsinghua

Fire Collapse Simulation),包括模拟钢筋混凝土杆系构件的纤维梁模型和墙板构件的分层壳模型,以及相应的单元失效准则等。已有文献研究中,陈适才等人<sup>[6-7]</sup>已验证了纤维梁模型和分层壳模型用于火灾分析具有很高的精确度。叶列平等人<sup>[8]</sup>已验证了纤维梁模型和分层壳模型在整体结构分析中的高效性。陆新征等人<sup>[9]</sup>已验证了 MSC.MARC 的非线性求解器在倒塌模拟方面的能力,以及通过生死单元的方式模拟倒塌过程中的非连续位移场的可行性。本文首先介绍 TFCS 程序的高温材料本构,热-力耦合算法和构件模型。而后通过一 8 层框架火灾倒塌过程模拟,说明其连续倒塌过程和机理。

## 1 TFCS 中的本构模型和算法

### 1.1 高温应变组成

火灾作用下,混凝土的总应变  $\varepsilon^c$  由以下四部分组成:应力-应变  $\varepsilon_{\sigma}^c(T, \sigma)$ 、自由热膨胀应变  $\varepsilon_{th}^c(T)$ 、短期高温徐变  $\varepsilon_{cr}^c(T, \sigma, t)$  和瞬态热应变  $\varepsilon_{tr}^c(T, \sigma)$ , 括号中为影响相应应变分量的变量,其中  $T$ 、 $\sigma$ 、 $t$  依次表示温度、应力和时间三个变量<sup>[10]</sup>。于是可以建立总应变  $\varepsilon^c$  的数学表达如下:

$$\varepsilon^c = \varepsilon_{\sigma}^c(T, \sigma) + \varepsilon_{th}^c(T) + \varepsilon_{cr}^c(T, \sigma, t) + \varepsilon_{tr}^c(T, \sigma) \quad (1)$$

类似的,可以建立火灾下钢筋总应变  $\varepsilon^s$  的数学表达:

$$\varepsilon^s = \varepsilon_{\sigma}^s(T, \sigma) + \varepsilon_{th}^s(T) + \varepsilon_{cr}^s(T, \sigma, t) \quad (2)$$

其中,  $\varepsilon_{\sigma}^s$ 、 $\varepsilon_{th}^s$ 、 $\varepsilon_{cr}^s$  分别为钢筋的应力-应变、自由热膨胀应变和短期高温徐变。和混凝土有所不同,钢筋受热不存在瞬态热应变。

### 1.2 温度-应力路径的离散

在火灾倒塌分析之前,先要根据预设火灾场景进行结构温度场分析获得构件内部的温度场分布,在火灾倒塌分析时,构件内的温度场仅作为随时间变化的边界条件输入,所以温度变量  $T$  是时间变量  $t$  的函数,因此式(1)和式(2)中仅含有两个独立参数。仅用应力和温度两个变量进行讨论,由式(1)和式(2)可知,温度变量  $T$  和应力变量  $\sigma$  对应变分量  $\varepsilon_{\sigma}^c$ 、 $\varepsilon_{tr}^c$  和  $\varepsilon_{cr}^c$  同时产生影响,因此不同的应力-温度路径将会产生不同的应变状态。

对于图 1 所示的一个任意的温度-应力加载路

径  $OP$ , 可以采用若干温度和应力增量的台阶线近似逼近的离散方法, 当应力和时间的增量步长足够小时, 离散的路径将逼近真实的路径<sup>[10]</sup>。在单个温度-应力步长内, 路径  $(T, \sigma) \rightarrow (T + \Delta T, \sigma + \Delta \sigma)$  可以分解为两步实现, 即  $(T, \sigma) \rightarrow (T, \sigma + \Delta \sigma) \rightarrow (T + \Delta T, \sigma + \Delta \sigma)$ , 在计算时可以实现温度和应力的解耦。

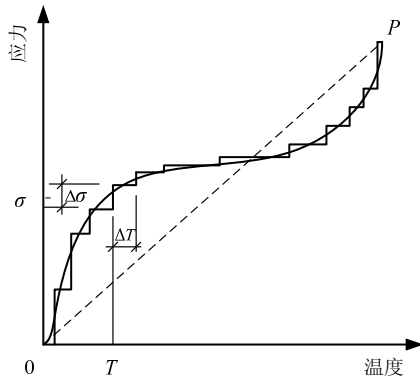


图 1 温度-应力路径的近似离散

Fig.1 Discrete approach of temperature-stress path

### 1.3 材料高温力学模型

#### 1.3.1 自由热膨胀应变模型

材料的自由热膨胀应变  $\varepsilon_{th}$  仅和温度相关, 因此在单个温度-应力步长内, 可以仅在  $(T, \sigma + \Delta \sigma) \rightarrow (T + \Delta T, \sigma + \Delta \sigma)$  上计算  $d\varepsilon_{th}$ 。本文模型中的混凝土热膨胀应变增量  $d\varepsilon_{th}^c$  和钢筋热膨胀应变增量  $d\varepsilon_{th}^s$  的计算均采用时旭东模型<sup>[10]</sup>。

#### 1.3.2 短期高温徐变模型

理论上材料的短期高温徐变  $\varepsilon_{cr}$  由  $\sigma$  和  $T$  共同决定, 在单个温度-应力步长内需要分别在  $(T, \sigma) \rightarrow (T, \sigma + \Delta \sigma)$  和  $(T, \sigma + \Delta \sigma) \rightarrow (T + \Delta T, \sigma + \Delta \sigma)$  上计算应力增量和温度增量引起的徐变增量。但是由于徐变的数学表达形式非常复杂且隐式的含有应力变量, 上述两个分量给数值计算带来较大的工作量。出于简单起见, 现有的混凝土和钢筋热徐变的计算模型基于弹性徐变理论, 直接给出了  $(T, \sigma) \rightarrow (T + \Delta T, \sigma + \Delta \sigma)$  上的热徐变增量解。这种处理会带来一定的误差, 但是和实际热徐变试验结果的误差相比可以忽略不计。本文混凝土短期高温徐变增量  $d\varepsilon_{cr}^c$  和钢筋短期高温徐变增量  $d\varepsilon_{cr}^s$  的计算分别采用时旭东<sup>[10]</sup>和 Williams<sup>[11]</sup>的模型。已有的模型计算表明<sup>[10-11]</sup>, 这些模型的解已经具有足够的精确度, 可以满足火灾模拟的要求。

#### 1.3.3 混凝土热瞬变模型

热瞬变  $\varepsilon_{tr}$  是混凝土特有的应变成分, 根据其定

义, 混凝土仅在应力作用下温度升高时才产生瞬态应变<sup>[10]</sup>。同时, 瞬态热应变和热膨胀应变在混凝土的高温总应变中占主要部分, 其值远大于应力-应变和热徐变。这些特性是造成混凝土结构在不同温度-应力路径下产生巨大变形差异的原因<sup>[10]</sup>。现有的一些分析模型<sup>[7]</sup>未考虑混凝土的热瞬变, 计算中会产生一定的误差。根据热瞬变的定义, 在单个温度-应力步长内, 可以仅在  $(T, \sigma + \Delta \sigma) \rightarrow (T + \Delta T, \sigma + \Delta \sigma)$  上计算  $d\varepsilon_{tr}^c$  即可。本文模型中的混凝土热瞬变增量  $d\varepsilon_{tr}^c$  的计算采用时旭东模型<sup>[10]</sup>。

#### 1.3.4 应力-应变模型

在单个温度-应力步长内, 应力产生的应变  $d\varepsilon_{\sigma}$  包括两部分: 1) 温度保持不变, 应力增量  $d\sigma$  在恒定的应力-应变关系曲线上进行加卸载所产生的应变增量  $d\varepsilon_{\sigma 1}$ ; 2) 温度发生变化, 恒定的应力在变化的应力-应变关系曲线上进行加卸载所产生的应变增量  $d\varepsilon_{\sigma 2}$ 。根据 1.2 节的讨论, 可以分别在  $(T, \sigma) \rightarrow (T, \sigma + \Delta \sigma)$  和  $(T, \sigma + \Delta \sigma) \rightarrow (T + \Delta T, \sigma + \Delta \sigma)$  上计算相应的应变增量。

恒定温度下的混凝土和钢筋的应力-应变关系曲线, 包括骨架曲线和加卸载曲线, 均采用文献[8]中相同的模型。应力-应变曲线的主要力学指标(如混凝土和钢筋的弹性模量、屈服强度、极限强度、屈服应变和极限应变等)随温度的变化规律均采用时旭东模型<sup>[10]</sup>。对于应力-应变状态在不同应力-应变曲线间的转换关系: 时旭东提出了升温过程的模型<sup>[10]</sup>, 即采用相同的相对峰值应变假设, 升温期间伴随应力的松弛; Bailey 提出了降温过程的模型<sup>[12]</sup>, 即采用弹性恢复的假设, 降温期间保持应力不变。上述转换模型和实际试验现象吻合较好, 本文采用这些模型进行计算。

### 1.4 算法实现

计算中, 在每个迭代步的起始阶段赋给材料当前时间  $t$ 、时间步长  $dt$ 、当前应力  $\sigma$ 、当前应变  $\varepsilon$  和总应变增量  $d\varepsilon$ , 本文模型通过计算返回应力增量  $d\sigma$  和当前切线刚度  $D$ , 提供给上层程序进行单元和整体结构的组装和计算。每次模型调用时, 模型内的计算流程如下:

1) 根据当前时间  $t$  和时间步长  $dt$  确定积分点材料的当前温度  $T$ 、温度增量  $dT$  和高温力学指标。

2) 计算各应变分量的增量, 包括: 自由热膨胀应变增量  $d\varepsilon_{th}$ 、短期高温徐变增量  $d\varepsilon_{cr}$ 、混凝土热瞬变增量  $d\varepsilon_{tr}$ 、不同温度应力-应变关系转换产生

的应变增量  $d\varepsilon_{\sigma_2}$ 。

3) 从总应变增量  $d\varepsilon$  中扣除 2) 中的各应变分量的增量, 获得在新应力-应变关系曲线上加载的应变增量  $d\varepsilon_{\sigma_1}$ , 计算公式如下:

$$d\varepsilon_{\sigma_1}^c = d\varepsilon^c - d\varepsilon_{\sigma_2}^c - d\varepsilon_{th}^c - d\varepsilon_{cr}^c - d\varepsilon_{tr}^c \quad (3)$$

$$d\varepsilon_{\sigma_1}^s = d\varepsilon^s - d\varepsilon_{\sigma_2}^s - d\varepsilon_{th}^s - d\varepsilon_{cr}^s \quad (4)$$

4) 在新应力-应变关系曲线上计算应力增量和切线刚度返回给上层程序, 存储下步计算所需要的当前的变量。

## 2 TFCS 中的单元模型和验证

### 2.1 杆系纤维梁模型 THUFIBER-T

梁柱是混凝土框架结构中的主要受力构件, 纤维模型能够准确高效的模拟钢筋混凝土梁柱这类长细比较大的、多种材料复合的杆系构件的力学性能<sup>[8]</sup>。纤维模型中杆件截面被划分成若干纤维, 每个纤维均为单轴受力, 截面纤维可以被赋予不同材料的单轴应力-应变关系来描述复合结构的受力特性, 纤维间的变形协调满足平截面假定。本文基于上述基本理论建立了考虑温度作用的纤维梁模型 THUFIBER-T。在火灾受力分析中, THUFIBER-T 可以根据温度场分析结果赋予纤维不同的温度变化曲线来模拟截面上的不均匀温度场分布。每次迭代过程中, THUFIBER-T 接收 MSC.MARC 平台传递过来的单元截面的变形增量(包括轴向和转动变形), 通过平截面假定计算每个纤维的轴向总应变, 然后根据 1.4 节的流程计算截面上所有纤维的应力增量和切线刚度, 并集成获得截面的内力增量和刚度返回给 MSC.MARC 平台, MSC.MARC 平台进行单元和整体结构的组装和计算。

采用 THUFIBER-T 对文献[10]中的三面受火压弯柱和三面受火纯弯梁的试验进行了数值模拟(见图 2 和图 3)。通过比较可以说明 THUFIBER-T 对火灾下的梁柱力学反应的模拟和实验结果吻合程度较好, 准确的把握住了构件变形随温度升高的变化趋势, 在接近极限火灾温度时的大变形计算能力也满足倒塌分析的需要。由于截面上纤维的塑性发展程度不同, 部分纤维达到极限应变退出工作, 在构件力学行为上表现出微弱的不连续性, 因此在计算结果中产生了微小波动(如图 3 中 400℃~500℃区间)。在实际计算中, 两个构件的模拟分别使用了 6 个纤维梁单元进行模拟, 计算速度和效率非常高, 使得大规模整体结构火灾倒塌分析成为可能。

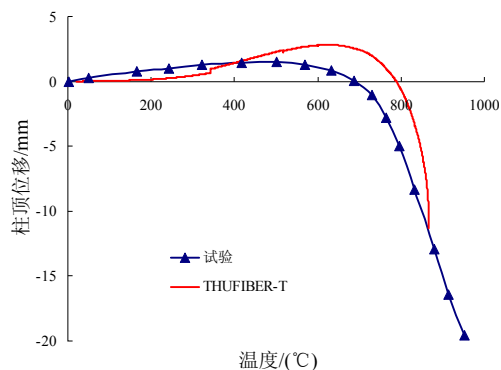


图 2 压弯柱计算结果和试验结果比较

Fig.2 Comparison of testing results and computational results of compression bending columns

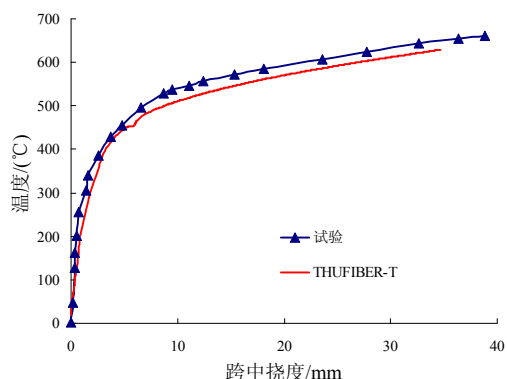


图 3 纯弯梁计算结果和试验结果比较

Fig.3 Comparison of testing results and computational results of pure bending beam

### 2.2 楼板分层壳模型

现浇楼板是混凝土框架结构中的另一类重要构件, 火灾中钢筋混凝土现浇楼板对框架的承载力影响较大。分层壳模型对楼板的模拟其基本原理类似纤维梁模型, 分层壳模型将壳单元沿厚度方向划分成很多层, 各层可以被赋予不同的厚度和材料性质, 层之间的变形同样满足平截面假定, 层内材料采用二维本构模型<sup>[8]</sup>。本文建立的分层壳模型在计算时各层按热传导计算结果被赋予了不同温度场, 各层材料可以根据需要选择相应的材料本构模型, 如混凝土层采用考虑开裂和压碎的弹塑性-断裂模型, 钢筋层采用正交各向异性材料模型, 仅在钢筋轴向方向考虑其贡献, 横纵两个方向的钢筋采用两个不同材料方向的钢筋层来模拟。在计算过程中, 根据平截面假定, 由壳单元参考面的应变和曲率计算各钢筋和混凝土层的总应变, 并根据 1.4 节的流程计算所有的应变分量的增量, 其中自由热膨胀为体积应变, 因此其应变增量各向相等, 短期高温徐变增量和混凝土热瞬变增量在等效应力轴上计算并分配至纵横两个方向上<sup>[13]</sup>。

采用分层壳模型对于钢筋混凝土筒支单向板<sup>[14]</sup>和筒支双向板<sup>[15]</sup>试验进行了数值模拟(见图 4 和图 5)。单向板的计算结果和试验结果吻合较好,变形随温度变化的趋势基本相同。双向板试验有两个试件,构件尺寸和外加荷载完全相同,只是 D147 的配筋率小于 DH12,其中 DH12 的计算结果和试验结果吻合的情况很好。D147 试验的前半部分计算结果也非常好,只是试验中板的跨中挠度超过 186mm 以后,变形过大超出仪器量程,最后一个测点为试验结束后的补测结果,最后两个测点之间用虚线连接<sup>[15]</sup>。本文模型的计算结果表明,实际板的承载力在试验末段已经丧失,楼板发生了倒塌。实际试验中为防止楼板的破坏倒塌造成仪器受损,在楼板边缘设置了位移限制装置,当变形过大时,装置扣住支座使得楼板的倒塌被限制,因此计算结果和试验补测结果之间出现了差别,这进一步表明本文模型的准确性。和纤维梁类似,由于截面上部分层达到极限应变退出工作,因此在计算结果中也产生了微小波动(如图 4 中 600°C~800°C 区间)。在实际计算中,每个板的模拟仅使用了 6×6 的网格、共 36 个壳单元进行模拟,计算速度和效率非常高。

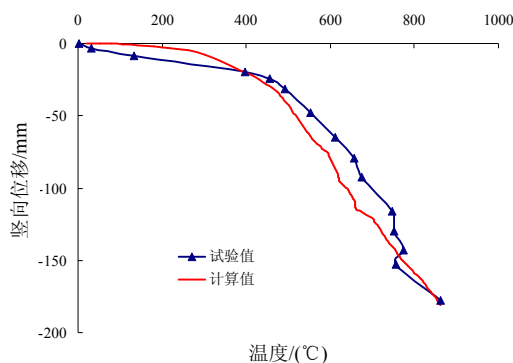


图 4 单向板计算结果和试验结果比较

Fig.4 Comparison of testing results and computational results of one-way slab

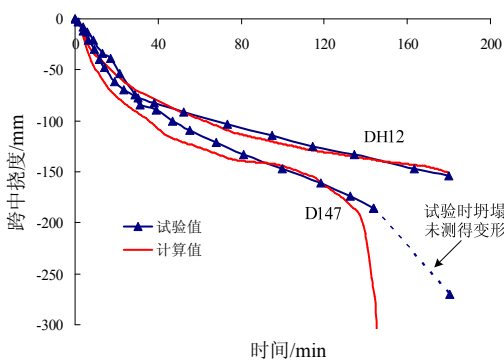


图 5 双向板计算结果和试验结果比较

Fig.5 Comparison of testing results and Computational results of two-way slabs

### 2.3 单元失效准则

在结构倒塌破坏过程中,构件将破碎断裂,整个结构也将从一个连续体过渡到一个散粒体。这种不连续位移场的描述是倒塌分析与模拟中的关键问题,将严重影响倒塌模拟结果的真实性<sup>[16]</sup>。文献[9]采用单元失效准则来模拟地震倒塌过程中的构件破坏行为,获得了较好的结果。本文基于高温下结构构件的失效准则,采用“单元生死”技术来模拟上述破坏过程。

在纤维梁模型中,对于柱构件,当钢筋的拉应变超过高温下钢材的极限拉应变时认为该钢筋已经发生拉断失效,当钢筋的压应变超过高温下混凝土压碎应变时认为受压钢筋失去支撑发生屈曲,如果一个柱截面上所有钢筋纤维都已经拉断或者压曲,则判定该柱构件发生破坏;梁构件在倒塌过程中先后经历小变形下的梁机制(端部受弯)和大变形下的悬链线(全截面受拉)两种工作状态<sup>[17]</sup>,梁机制时端部破坏的受压钢筋可以在悬链线阶段提供抗拉承载力,因此在纤维梁模型中仅当其截面上所有钢筋纤维都已经拉断时判断梁构件发生破坏。

在分层壳模型中,考虑到火灾中楼板的极限受力状态主要是全截面受拉提供薄膜张力,设定截面钢筋层应变超过高温下的极限拉应变时发生破坏。

上述两个模型中,破坏的构件单元将被删除,构件内力被释放,可通过 MSC.MARC 的 Uactive 功能实现<sup>[13]</sup>。

钢筋在高温下的拉断应变采用文献[10]中建议的随温度变化的值。根据文献[18]的试验和统计的结果,常温下混凝土压碎应变为峰值应变的 2 倍~3 倍,本文采用 2.5 倍的峰值应变作为常温下混凝土压碎应变,为保证和高温本构关系曲线的一致性,采用文献[10]中的高温峰值应变规律来确定高温下的混凝土高温压碎应变。

## 3 倒塌模拟算例

基于本文建立的火灾倒塌分析模型,对一栋典型 8 层框架的火灾倒塌情况进行了模拟与分析,其结构的平面布置情况和相关构件的编号如图 6 所示,详细的模型信息见文献[19]。火灾地点设定发生在第 5 层的角部的①、②两个开间(如图 6 所示),假设有防火分区,火灾不发生蔓延,火灾升温曲线采用《建筑防火设计规范 GB50016-2006》建议的 HC 曲线<sup>[20]</sup>。温度场分析中,角部开间的六根柱子



(C1~C3、C5~C7)偏于保守的考虑四面受火情况,考虑到楼板的存在,火灾空间中的七根梁设定为三面受火(底部和侧面)。同时建立带楼板和不带楼板的模型进行比较。

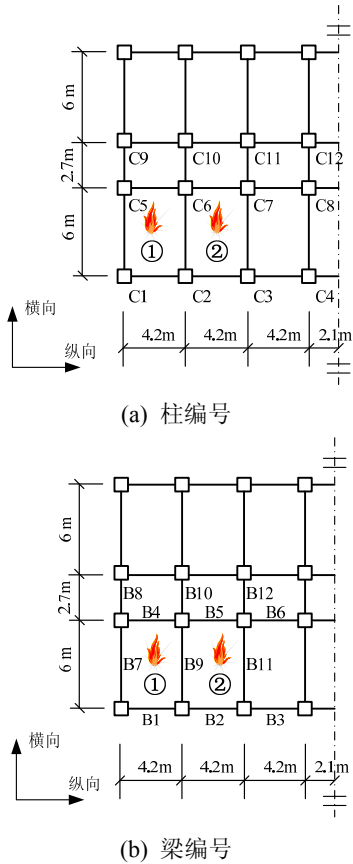


图 6 8层框架平面布置  
Fig.6 Plan view of 8-storey frame

对于预置楼板的混凝土框架结构,框架骨架提供抗连续倒塌承载力,楼板对抗连续倒塌承载力没有贡献,在计算模型中仅作为荷载考虑。采用纤维梁模型对不考虑楼板的纯框架结构的倒塌过程进行了模拟,如图 7 所示,其中的云图显示了钢筋进入屈服的部位。图 8 给出了火灾影响范围内框架柱轴力随时间的变化趋势。可以看到,火灾的初始阶段,柱由于热膨胀受到约束,柱轴力增加。随着火灾的发展,构件损伤材性退化的影响超过热膨胀的影响,构件轴力降低,首先轴力最大的 C7 柱先发生破坏,形成诱发连续倒塌的初始局部破坏。随即,由于失去支撑,开间②内的框架梁 B5、B6、B11 和 B12 在荷载作用下产生较大变形,其中受火的框架梁 B5 和 B11 发生破坏。这是由于钢筋的极限拉应变随着温度升高而降低<sup>[10]</sup>,导致 B5 和 B11 的变形能力降低从而发生破坏,未受火的框架梁 B6 和 B12 变形能力较大,未发生破坏。此时,位于上部

楼层开间②内框架梁均产生较大变形,产生悬链线作用,如图 7(b)所示,柱 C3 和 C6 受到较大的水平向拉力,相应的 5 层柱顶处产生较大水平位移(C3 横向 151mm, C6 纵向 54mm),其中外围柱 C3 的横向约束较弱,产生的水平向位移较大,在 P-Δ 效应的组合作用下发生破坏。随后,和 B5、B11 类似, B2 梁产生较大变形也发生破坏。此后 5 层及以上位于开间①内的结构构件受到沿纵轴方向的水平力作用发生较大侧移,并在重力荷载作用下发生倒塌,在此过程中 C5 和 C6、C1 和 C2 依次发生破坏,结构发生了连续倒塌。观察火灾区域周边柱的轴力变化(图 8(b)),发现结构体系内发生内力重分布,周边柱的轴力产生不同程度的增大,但是和受火柱卸载的轴力比(图 8(a)),周边柱的轴力增长有限,未能实现荷载的替代传力路径。

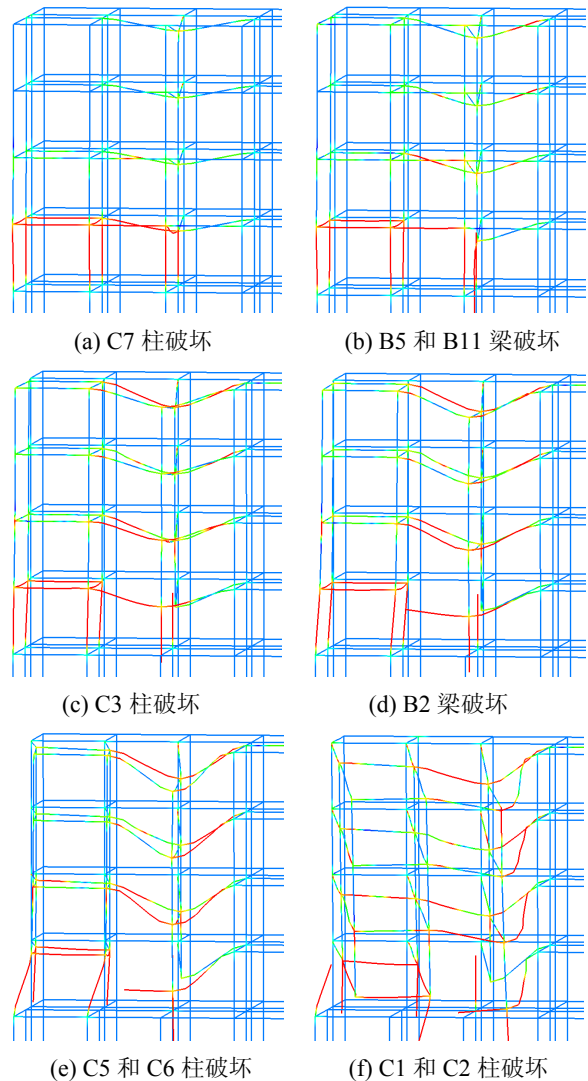


图 7 纯框架的倒塌过程分析( $t=2.59h$ , 变形显示比例 1 : 1)  
Fig.7 Collapse analysis of bare frame ( $t=2.59h$ , displacement display scale 1 : 1)

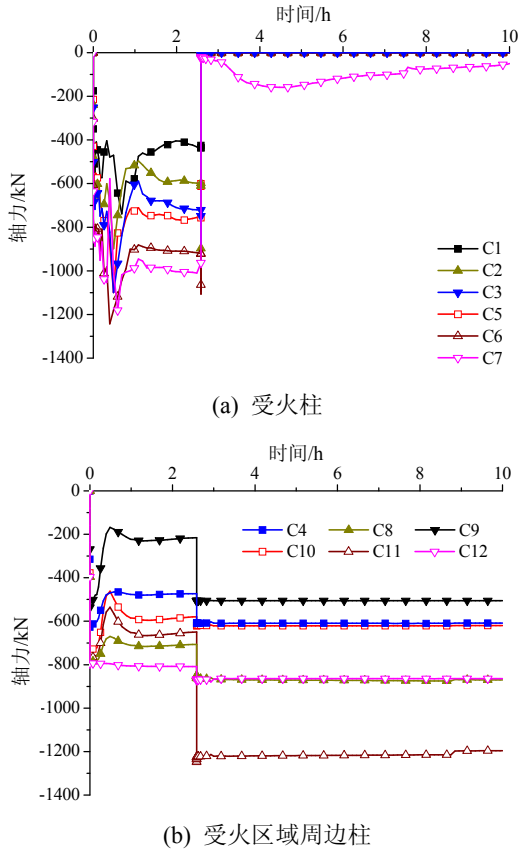


图 8 纯框架模型的柱轴力

Fig.8 Axial force of columns in bare frame

对于楼板整体现浇的混凝土框架，楼板对抗连续倒塌承载力具有显著影响。本文在纯框架模型的基础上，采用分层壳模型模拟火灾下的楼板，图 9 所示为火灾作用 6h 后结构的损伤情况，图 10 给出了火灾影响范围内框架柱轴力随时间的变化趋势。可以看到，经过 6h 的火灾作用之后，受火区域的框架柱才全部发生破坏，导致结构的发生连续倒塌倒塌的初始局部破坏才开始形成。这和纯框架结构表现出很大的差异，纯框架结构在第 1 个柱构件发生破坏后，破坏迅速在构件间扩散，在很短的时间就形成了结构的连续倒塌(如图 8(a)所示)，因此对于纯框架结构，C7 柱的破坏就是导致结构的发生连续倒塌的初始局部破坏。而楼板整体现浇的混凝土框架结构的抗连续倒塌能力被楼板显著增强，楼板的贡献主要有两个：受火楼板发挥了薄膜张力作用，即使部分框架梁发生破坏失去承载力，楼面荷载还是通过内力重分布被传递给了未破坏构件；未受火楼板增强了框架梁的刚度和承载力，使得结构的冗余承载力增大，结构的抗连续倒塌能力增强。在倒塌过程的模拟中，上述特征表现为：未受火区域分担的荷载显著增加(图 10(b))，受火柱的轴力显

著减少(图 10(a))，框架柱逐个发生破坏时，整体结构都能依靠其自身的内力重分布能力抵抗连续倒塌的发生，框架柱的连续破坏过程呈现出一定的滞后时间，并非短时间内的连续破坏。楼板整体现浇的混凝土框架直到 6 个框架柱全部破坏以后，连续倒塌才被触发。

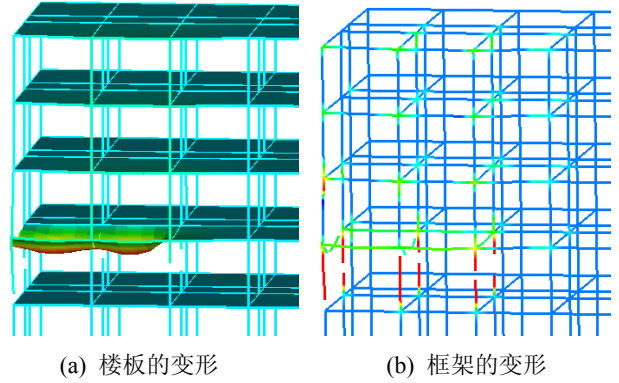


图 9 带楼板框架模型的模拟结果( $t=6h$ , 变形显示比例 1 : 1)  
Fig.9 Collapse analysis of frame with slab( $t=6h$ , displacement display scale 1 : 1)

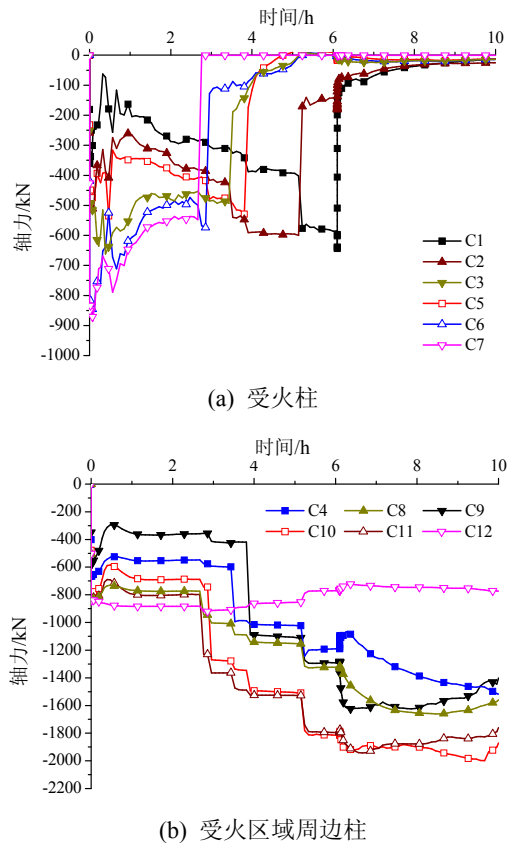
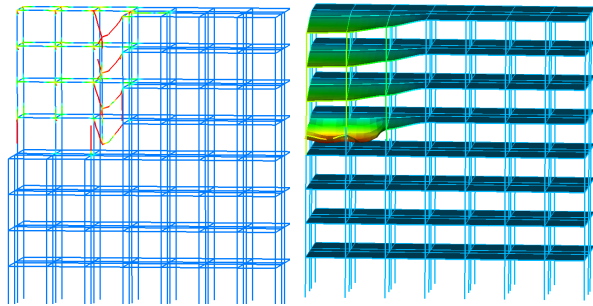


图 10 带楼板框架模型的柱轴力

Fig.10 Axial force of columns in frame with slab

两种结构的最终的破坏模式如图 11 所示。对于纯框架结构，受火开间和相邻开间在 5 层以上的结构全部倒塌，剩余结构多处部位进入塑性；对于

楼板整体现浇的框架结构,虽然火灾区域的楼板失去足够的支撑也发生了连续倒塌,但是楼板没有发生破坏,受损的梁柱构件被楼板拉结在剩余的完好结构上,没有坠落。如果考虑破坏构件坠落引起的冲击与堆荷效应,纯框架结构倒塌火灾区域的下部结构也会发生连续倒塌,结构体系的破坏将会更加严重。而相比之下,冲击和堆载效应在楼板整体现浇的框架结构中则会被减轻。



(a) 纯框架结构 (b) 楼板整体现浇的框架结构

图 11 最终破坏模式对比( $t=10h$ , 变形显示比例 1:1)

Fig.11 Comparison for damage modes ( $t=10h$ , displacement display scale 1:1)

## 4 结论

本文在纤维梁模型和分层壳模型的基础上,建立了混凝土框架结构的整体结构火灾倒塌分析模型,包括考虑温度作用的纤维梁和分层壳模型,这些模型包含了对各种高温应变变量的计算、不同温度下应力-应变本构曲线间的转换和考虑不连续位移场的构件破坏准则。由于分析模型的准确性和高效性,能够对火灾下钢筋混凝土框架的整体倒塌过程进行模拟与分析。

本文通过对连续倒塌全过程的模拟完整的展现了框架结构在火灾作用下的整体结构响应。与文献[19]采用的不针对具体灾害荷载的连续倒塌分析方法相比,采用基于火灾倒塌分析模型的方法更加科学,这种方法对火灾作用过程中结构破坏的机理分析更加准确。现有拆除构件法难以把握结构火灾倒塌的特点,其中最大的问题在于无法对处于结构体系中构件的破坏情况(包括损伤与失效)进行准确的预先假设,因此基于拆除构件的分析方法就无法简单的引入火灾倒塌分析中。而本文的模型为火灾作用下抗连续倒塌分析与设计方法的研究建立了基础。

### 参考文献:

[1] 江晓峰,陈以一. 建筑结构连续性倒塌及其控制设计

的研究现状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(6): 1-8.

Jiang Xiaofeng, Chen Yiyi. A review on the progressive collapse and control design of building structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(6): 1-8. (in Chinese)

[2] Ellingwood B R. Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20(4): 315-323.

[3] GSA2005, Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization project [S]. 2005.

[4] UFC 4-023-03, Design of structures to resist progressive collapse [S]. 2009.

[5] Usmani A S, Chung Y C, Torero J L. How did the WTC towers collapse: a new theory [J]. Fire Safety Journal, 2003, 38(6): 501-533.

[6] 陈适才, 陆新征, 任爱珠, 江见鲸. 火灾下混凝土结构破坏模拟的纤维梁单元模型[J]. 计算力学学报, 2009, 26(1): 72-79.

Chen Shicai, Lu Xinzhen, Ren Aizhu, Jiang Jianjing. Fiber beam element model for the collapse simulation of concrete structures under fire [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(1): 72-79. (in Chinese)

[7] 陈适才, 任爱珠, 王静峰, 陆新征. 钢筋混凝土楼板火灾反应数值计算模型[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 107-112.

Chen Shicai, Ren Aizhu, Wang Jingfeng, Lu Xinzhen. Numerical modeling of reinforced concrete slabs subjected to fire [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 107-112. (in Chinese)

[8] 叶列平, 陆新征, 马千里, 汪训流, 缪志伟. 混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例[J]. 工程力学, 2006, 23(增刊 II): 131-140.

Ye Lieping, Lu Xinzhen, Ma Qianli, Wang Xunliu, Miao Zhiwei. Nonlinear analytical models, methods and examples for concrete structures subject to earthquake loading [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(Suppl II): 131-140. (in Chinese)

[9] 陆新征, 林旭川, 叶列平, 李易, 唐代远. 地震下高层建筑连续倒塌的数值模型研究[J]. 工程力学, 2010, 27(11): 64-70.

Lu Xinzhen, Lin Xuchuan, Ye Lieping, Li Yi, Tang Daiyuan. Numerical models for the progressive collapse of high-rise buildings due to earthquake [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(11): 64-70. (in Chinese)

[10] 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.

Guo Zhenhai, Shi Xudong. Behaviour of reinforced concrete at elevated temperature and its calculation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)

[11] Williams-Leir G. Creep of structural steel in fire: analytical expressions [J]. Fire and Material, 1983, 7(2): 73-78.

[12] Bailey C G. Development of computer software to simulate the structural behaviour of steel-framed buildings in fire [J]. Computers and Structures, 1998(6): 421-438.

(参考文献[13]-[20]转第 112 页)