

某八层混凝土框架结构火灾连续倒塌模拟

*李 易¹, 陆新征¹, 任爱珠¹, 叶列平¹, 陈适才²

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

2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京, 100022)

摘要: 为了模拟火灾下结构倒塌破坏行为, 需要开发能够反映结构火灾整体行为的高效数值模型。本文基于纤维梁模型和分层壳模型开发了混凝土框架火灾倒塌分析程序, 对程序中采用的材料高温力学模型进行了分析与检验, 并通过对构件抗火性能试验的模拟验证了程序的计算精度。最后, 本文利用该倒塌分析程序对一个八层框架结构的火灾倒塌过程进行了模拟, 分析了结构在火灾下的倒塌机理。

关键词: 混凝土框架结构, 火灾连续倒塌, 数值模拟, 纤维梁, 分层壳

Simulation for fire-induced progressive collapse of an 8-storey RC frame structure

Li Yi¹, Lu Xinzhen¹, Ren Aizhu¹, Ye Lieping¹, Chen Shicai²

(1. Key Laboratory of Safety and Durability for Civil Engineering of Ministry of Education,

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: High efficient numerical models that can simulate the behaviors of entire structural system are very important to the study on fire-induced progressive collapse of RC frame structures. A fire-induced collapse simulation program is developed which is based on the fiber beam model and the multi-layer shell model. The constitutive models of materials at high temperature that are adopted in the program are discussed. And the accuracy of the program in simulating RC members in fire is verified by test results. At last, the progressive collapse of an 8-storey frame in fire is simulated and the mechanism of collapse is discussed.

Keywords: RC frame structure, fire-induced progressive collapse, numerical simulation, fiber beam model, multi-layer shell model

1. 引言

火灾是引起建筑结构倒塌的灾害荷载之一。建筑物是人类活动的重要载体, 火灾引发的建筑物倒塌, 会给救火和人员逃生造成极大的困难, 进而导致严重的火灾生命和财产的损失。根据统计^[1], 仅 2000-2005 年间, 我国就发生了 13 起火灾引起的重大建筑物倒塌事件。然而目前对火灾引起的结构倒塌问题的研究并不充分, 缺乏对整体结构火灾倒塌机理和抗火设计方法的研究。

由于整体结构的火灾试验代价太高, 因此火灾反应模拟就成为结构火灾整体倒塌研究的主要工具。在以往的研究中, 纤维梁模型和分层壳模型已经被证明在混凝土整体结构的模拟中具有出非常高的准确度和

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2006BAJ06B06, 2006BAJ03A02-01) “城市与工程安全减灾教育部重点实验室开放基金项目、北京市重点实验室开放基金项目” (编号: EESR2010-03), 长江学者和创新团队发展计划资助

作者简介: *李 易(1981-), 男, 湖北人, 博士生, 主要从事混凝土结构连续倒塌模拟与设计方法的研究(E-mail: yili07@mails.tsinghua.edu.cn);

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;

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;

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;

杜修力(1962-), 男, 四川人, 教授, 博士, 博导, 院长, 主要从事工程地震、结构抗震、抗爆等方面的研究。

效率, 可以满足整体结构的模拟分析的需要^[2]。陈适才等人^{[3][4]}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。本文在上述两个模型中增加了温度状态变量, 考虑了热-力耦合作用, 包括温度引起的附加变形、材料劣化, 使其可以应用于构件火灾反应分析。为了模拟整体结构倒塌过程中构件失效引起的不连续位移场, 模型中还引入了破坏准则, 使得模拟的倒塌过程更加符合实际。基于这些模型, 本文对一个典型八层混凝土框架结构进行了火灾下倒塌过程模拟, 对破坏机理和倒塌规律进行了初步的分析。

2. 数值分析模型

2.1 高温下应变的表达

火灾作用下, 材料的总应变 ε 主要由以下三部分组成: 应力应变 ε_σ 、自由热膨胀应变 ε_{th} 和短期高温徐变 ε_{cr} 。对于混凝土还存在瞬态热应变 ε_{tr} 。于是可以建立总应变 ε 的数学表达如下:

$$\text{混凝土:} \quad \varepsilon^c = \varepsilon_\sigma^c + \varepsilon_{th}^c + \varepsilon_{cr}^c + \varepsilon_{tr}^c \quad (1)$$

$$\text{钢 筋:} \quad \varepsilon^s = \varepsilon_\sigma^s + \varepsilon_{th}^s + \varepsilon_{cr}^s \quad (2)$$

2.2 材料高温力学模型

清华大学时旭东和过镇海对我国混凝土和钢筋的高温力学性能进行了大量系统的试验和理论研究^[5], 本文程序主要采用其模型进行分析。

2.2.1 自由热膨胀

混凝土和钢筋的自由热膨胀均采用时旭东模型^[5], 表达式如下:

$$\text{混凝土:} \quad \varepsilon_{th}^c = 28 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 \times 10^{-3} \leq 12 \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$\text{钢 筋:} \quad \varepsilon_{th}^s = 16 \left(\frac{T}{1000} \right)^{1.5} \times 10^{-3} \quad (4)$$

其中, T 为温度。材料在升、降温阶段的自由热膨胀采用相同的规律。本文纤维梁和分层壳模型程序采用(3)和(4)式的增量表达式来计算自由热膨胀应变, 计算结果如图 1 所示。

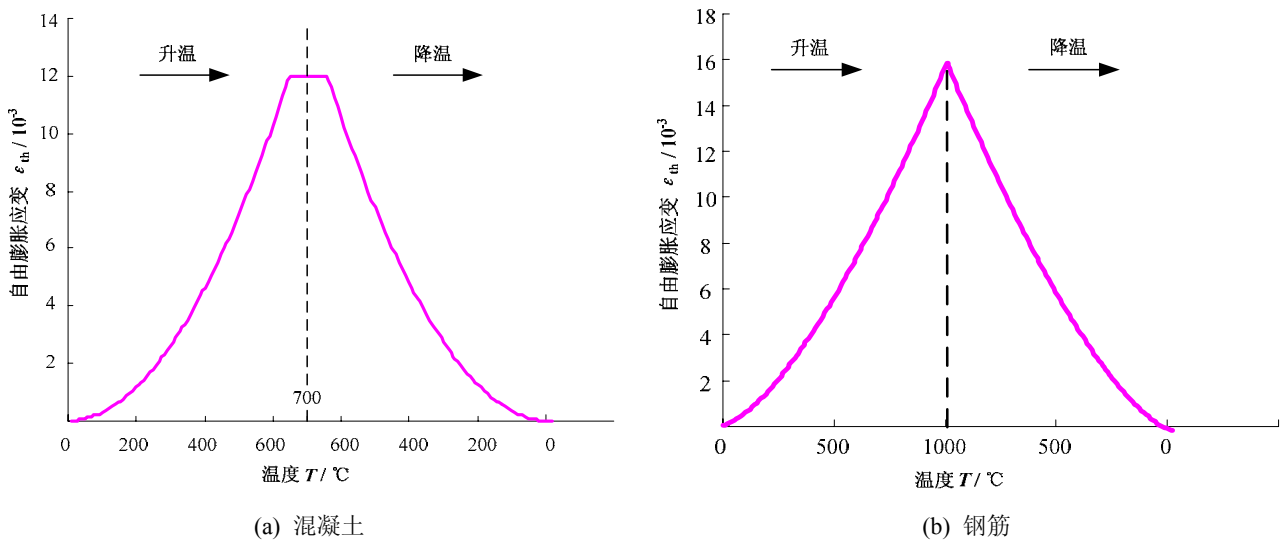


图 1 材料高温热膨胀计算模块检验

2.2.2 短期高温徐变模型

时旭东根据试验结果回归得到了恒定温度和应力下混凝土的高温热徐变表达式^[5]:

$$\varepsilon_{cr}^c = \frac{\sigma}{f_c^T} \sqrt{\frac{t}{t_0}} \left(e^{\frac{6T}{1000}} - 1 \right) \times 60 \times 10^{-6} \quad (5)$$

其中 σ 为应力, f_c^T 为高温下的混凝土峰值应力, t 为时间, 单位 min。试验表明, 混凝土在变温度-应力路径下的高温徐变主要由最高温度和最高应力控制, 对温度-应力路径的依赖性较弱。基于该结论, 时旭东提出了我国混凝土材料的热徐变模型^[5], 如(6)式时所示, 该模型引入了一个等效时间 t^{eq} 的概念(式 7), 综合考虑了历史温度、应力和时间的影响。

$$d\varepsilon_{cr}^c = \frac{\sigma}{f_c^T} \left(e^{\frac{6T}{1000}} - 1 \right) \frac{30 \times 10^{-6}}{\sqrt{t^{eq} t_0}} dt \quad (6)$$

$$t^{eq} = \left[\frac{\varepsilon_{cr}^c \times 10^6}{\frac{\sigma}{f_c^T} \left(e^{\frac{6T}{1000}} - 1 \right) \times 60} \right] \quad (7)$$

其中, $d\varepsilon_{cr}^c$ 为当前混凝土徐变增量, t_0 为恒定参数(120min), dt 为时间增量, ε_{cr}^c 为当前徐变。本文纤维梁和分层壳模型中嵌入的混凝土热徐变计算模块采用该模型, 模拟的试验结果如图 2(a)所示。

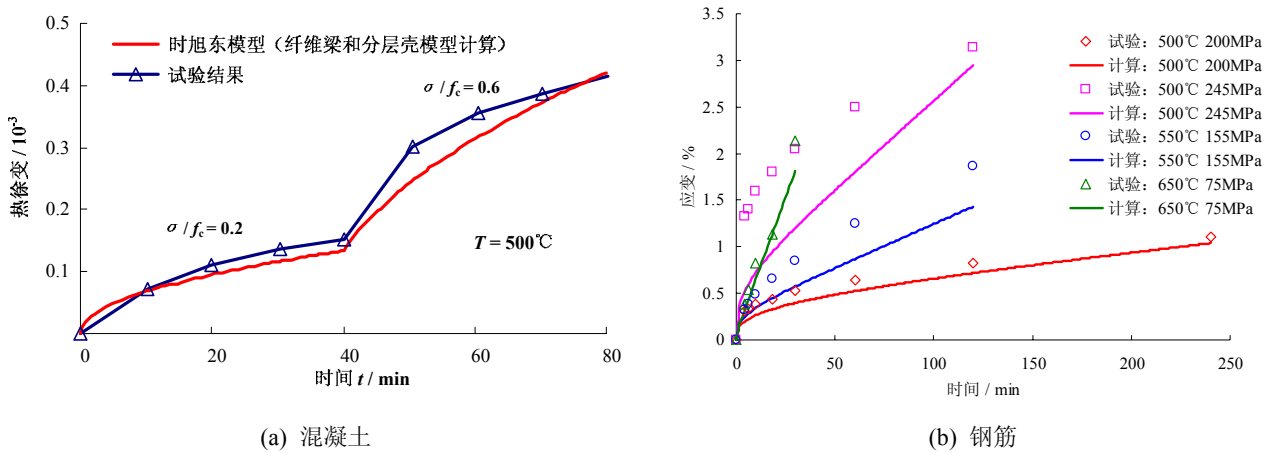


图 2 材料高温热徐变计算模块检验

钢筋在高温下的徐变试验结果离散性较大, 特别是温度和应力均位于较高水平时高温徐变难以准确测量, 此外不同钢种间热徐变特性也有较大差异。目前对我国钢筋热徐变的研究相对缺乏, 没有可供使用的计算模型。通过比较大量试验结果, 本文采用 G.Williams 提出的钢筋热徐变率模型^[6]如下:

$$\dot{\varepsilon}_{cr}^s = b_1 \coth^2(b_2 \varepsilon_{cr}^s) \quad (8)$$

其中 $\dot{\varepsilon}_{cr}^s$ 为钢筋热徐变率, ε_{cr}^s 为当前钢筋热徐变。参数 b_1 和 b_2 采用屈服应力和成分与我国钢筋相同的国外钢材的相应数值。本文纤维梁和分层壳模型中嵌入的钢筋热徐变计算模块的计算结果如图 2(b)所示。

2.2.3 混凝土热瞬变模型

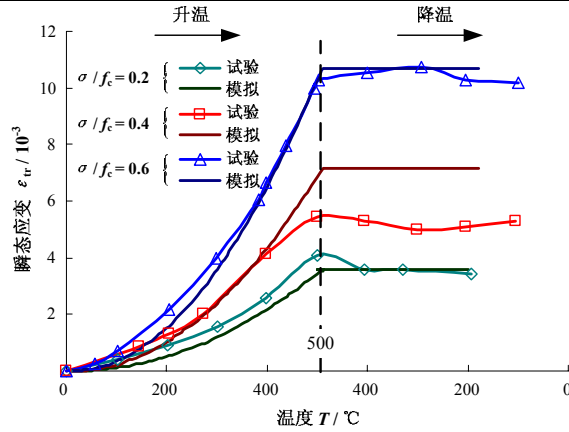


图 3 混凝土高温热瞬变计算模块检验

根据定义, 混凝土热瞬变仅在恒定应力作用下升温阶段产生, 本文计算采用时旭东模型^[5]如下:

$$\varepsilon_{tr} = \frac{\sigma}{f_c^T} \left[72 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 - \left(\frac{T}{1000} \right) \right] \times 10^{-3} \quad (9)$$

本文纤维梁和分层壳模型中嵌入的混凝土热瞬变计算模块的计算结果如图 3 所示。

2.2.4 应力应变模型

恒定温度下的混凝土和钢筋的应力应变关系均采用文献^[2]中相同的模型。应力-应变曲线的主要力学指标随温度的变化规律均采用时旭东模型^[5](式 10 和式 11)。

$$\text{混凝土: } \frac{f_c^T}{f_c} = \frac{1}{1 + 18 \left(\frac{T}{1000} \right)^{5.1}}; \quad \frac{\varepsilon_p^T}{\varepsilon_p} = 1 + 5 \left(\frac{T}{1000} \right)^{1.7}; \quad \frac{E_0^T}{E_0} = 0.83 - 0.0011T \quad (10)$$

$$\text{钢 筋: } \frac{f_y^T}{f_y} = \frac{1}{1 + 24 \left(\frac{T}{1000} \right)^{4.5}}; \quad \varepsilon_y^T = \alpha \varepsilon_y \quad (11)$$

其中, f_c^T 和 f_c 分别为高温下和常温下的混凝土峰值应力, ε_p^T 和 ε_p 分别为高温下和常温下的混凝土峰值应力对应的应变, E_0^T 和 E_0 分别为高温下和常温下的混凝土初始弹性模量, f_c^T 和 f_c 分别为高温下和常温下的钢筋屈服应力, ε_y^T 和 ε_y 分别为高温下和常温下的钢筋屈服应变, α 为恒定参数, 不同等级钢筋的取值见文献^[5]。

应力应变状态在不同温度下应力-应变曲线间的转换关系: 在升温时采用时旭东模型^[3], 即采用相同的相对峰值应变假设, 期间伴随应力的松弛; 在降温时采用 Bailey 模型^[6], 即采用弹模恢复的假设, 期间保持应力不变。本文采用这些模型计算获得的效果如图 4、5 所示, 图中黑色曲线为计算结果曲线, 灰色曲线为预设应力路径曲线, 可见上述模型和实际试验结果吻合较好。

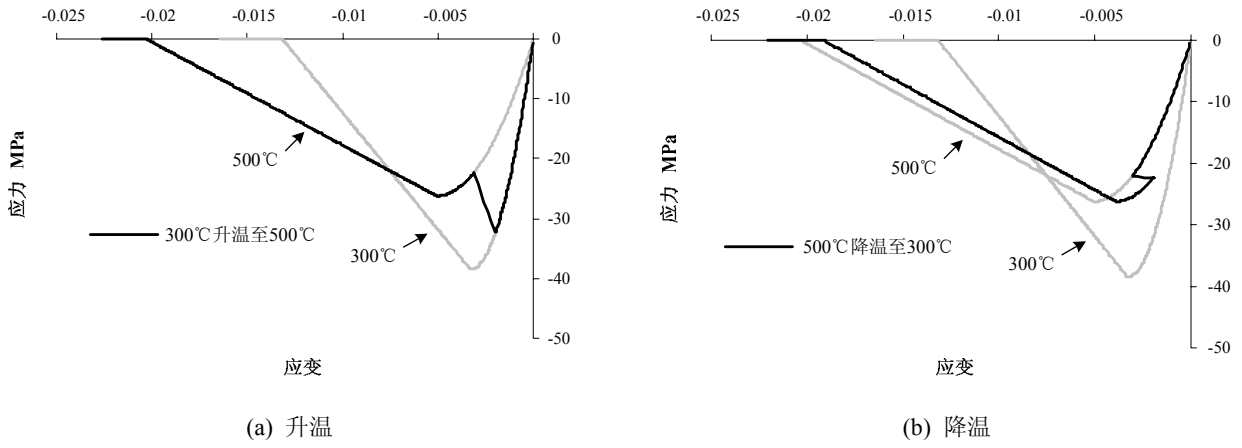


图 4 混凝土不同温度本构关系转换算法检验

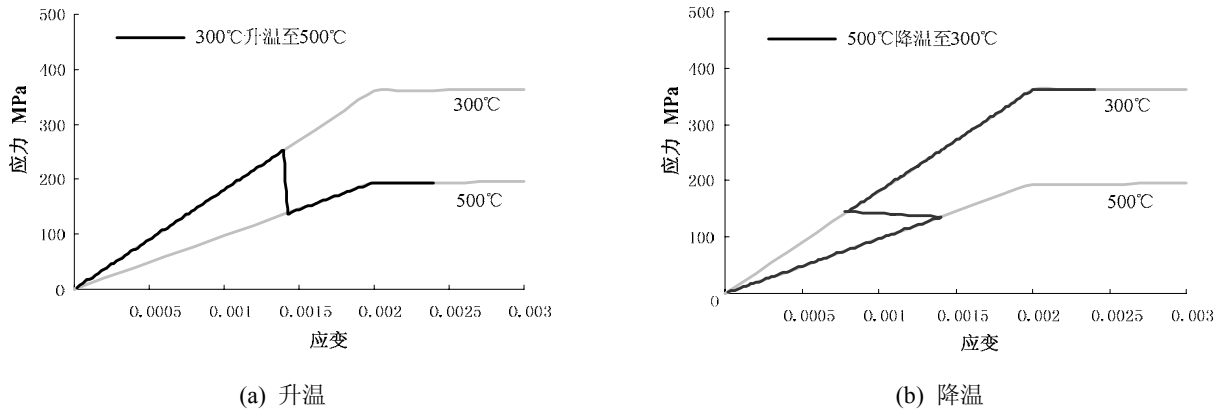


图 5 钢筋不同温度本构关系转换算法检验

2.3 杆系纤维梁模型 THUFIBER-T

已有的研究表明, 纤维模型能够准确高效的模拟钢筋混凝土梁柱构件在常温下的复杂力学行为^[2]。本文基于纤维梁的基本理论建立了考虑温度作用的 THUFIBER-T 模型。THUFIBER-T 赋予截面纤维一个温度状态变量, 并通过 2.2 节所述的模块计算各种温度引起的应变和状态点的转换。THUFIBER-T 的计算流程和 MSC.MARC 之间的交互关系如图 6 所示。

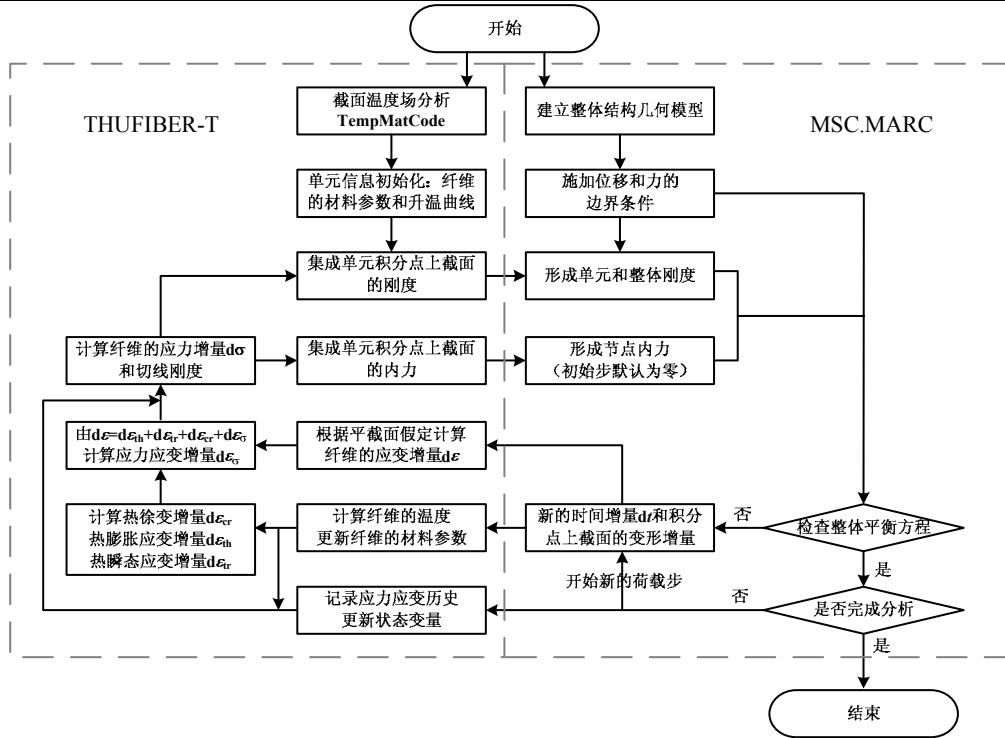


图 6 纤维梁模型的计算流程

采用 THUFIBER-T 对文献^[5]中的素混凝土受压柱和三面受火钢筋混凝土纯弯梁的试验进行了数值模拟 (见图 7 和图 8)。对于无轴力的素混凝土柱, THUFIBER-T 准确的模拟了其自由热膨胀变形。对于其他各种应力水平下的素混凝土受压柱, THUFIBER-T 也都能准确的描述其高温下的变形, 表明各种应变间的协调符合实际情况。对于钢筋混凝土梁的模拟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。

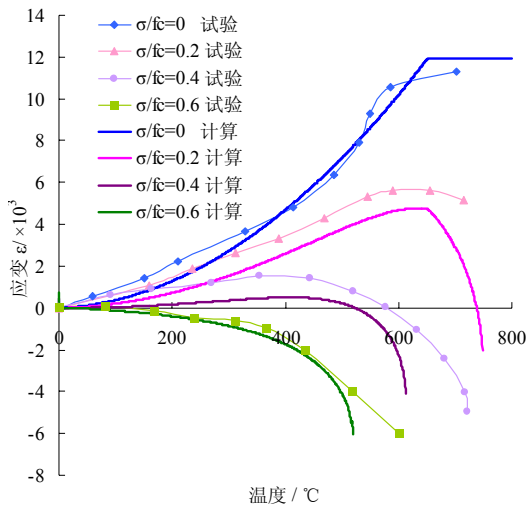


图 7 素混凝土受压柱计算结果和试验结果比较

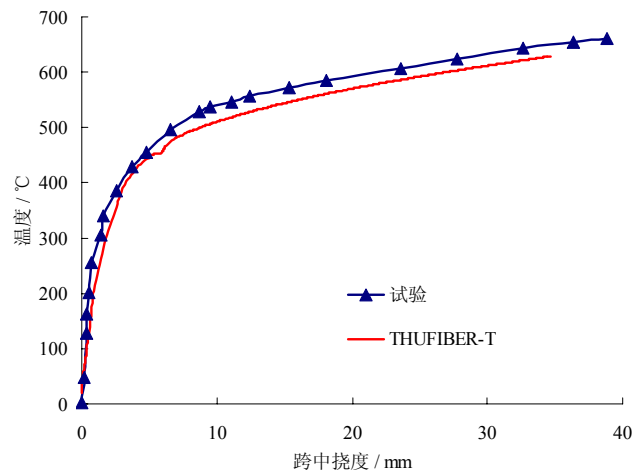


图 8 三面受火纯弯梁计算结果和试验结果比较

2.4 楼板分层壳模型

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, 层之间的变形满足平截面假定, 各层材料采用二维本构模型^[2]。本文建立的分层壳模型可考虑层之间不同的温度变化规律。模型中的混凝土层采用考虑开裂和压碎的各向同性弹塑性材料模型, 钢筋层采用正交各向异性的理想弹塑性模型, 仅在钢筋方向考虑其承载力贡献, 纵横两个方向的钢筋采用两个不同材料方向的钢筋层来模拟。采用 2.2 节所述的模块计算各种温度引起的应变。分层壳模型的计算流程类似纤维梁模型, 采用显式的徐变、瞬变和热膨胀应变算法, 在每次迭代过程中从总应变增量中扣除上述三个应变增量获得应力应变增量, 然后计算应力增量。

采用分层壳模型对于钢筋混凝土简支单向板^[8]和简支双向板^[9]试验进行了数值模拟(见图 9 和图 10)。单向板和双向板的计算结果和试验结果均吻合较好, 变形随温度变化的趋势基本相同。双向板试验中 D147 试件的跨中挠度超过 186mm 以后, 楼板破坏导致未测出计算结果(虚线部分), 本文模型预测的破坏时间和挠度与试验结果一致。

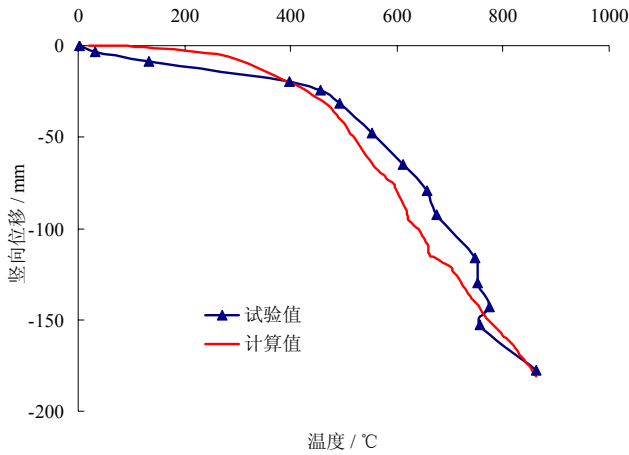


图 9 单向板计算结果和试验结果比较

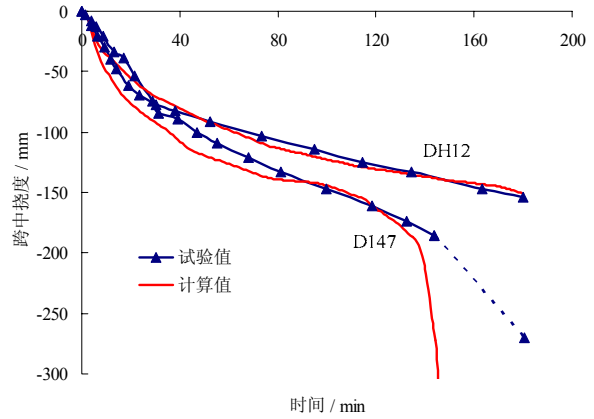


图 10 双向板计算结果和试验结果比较

2.5 单元失效准则

倒塌过程中的构件的脆性破坏会导致结构内力重分布, 剩余结构构件发生卸载或过载, 引起结构破坏的连锁反应。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^[10]。为此, 本文的分析模型中引入了破坏准则来考虑不连续位移场的影响。

在纤维梁模型中, 通过钢筋纤维中应力产生的应变来判断钢筋是否失效。判定该钢筋的失效准则如下: 对于柱, 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, 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, 该受压钢筋失效; 对于梁, 考虑其提供的拉结贡献, 仅当钢筋拉应变超过高温下钢材的极限拉应变时认为该钢筋发生失效。当柱或梁构件截面上所有的钢筋纤维拉断或压区时, 判断构件发生破坏, 截面所在单元被删除, 构件内力被释放。

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, 设定截面钢筋层应力应变超过高温下的极限拉应变时发生破坏。

3. 倒塌模拟算例

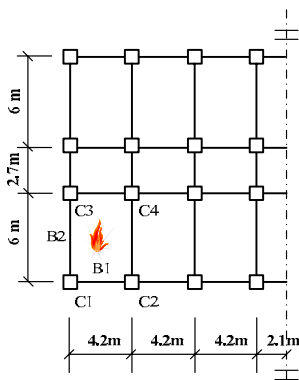


图 11 八层框架平面布置

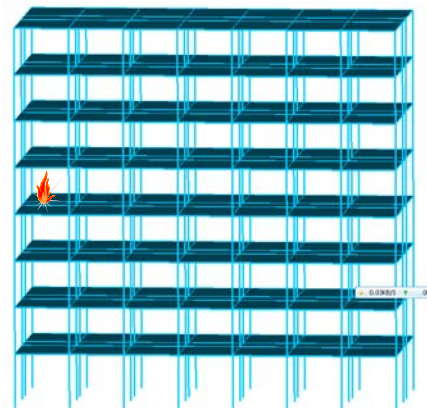


图 12 火灾发生位置

基于本文建立的火灾倒塌分析模型, 对一栋典型的八层框架的火灾倒塌情况进行了模拟与分析, 平面布置和构件编号如图 11 所示, 详细设计参数见文献[11]。其中 C 表示柱, B 表示梁。火灾位置考虑防火隔离, 设定仅发生在第 5 层的角部开间(如图 12 所示), 并假设火灾不发生蔓延, 火灾升温曲线采用《建筑防火设计规范 GB50016-2006》建议的 HC 曲线^[12]。温度场分析中, 由于楼板的存在, 火灾空间中的四根梁

设定为三面受火(底部和侧面), 柱偏于保守的考虑四面受火情况。

结构的倒塌过程模拟结果如图 13 所示。可以看到, 火灾开始作用后, 首先是受火楼板发生明显的变形, 处于结构内部的 C4 柱轴力较大, 首先发生破坏, 如图 13(a)所示。此时受火开间的框架梁和周围未受火构件的变形不大, 这表明通过受火楼层结构的内力重分布, 结构就可以承受一根柱破坏带来的影响。但是随着火灾的进行, 20 分钟后 C3、C2 柱相继发生破坏, 受火楼层难以承受大量的不平衡荷载, 此时上部和水平相邻的未受火框架梁和楼板提供了分担力, 同时这些构件也产生了较大的变形, 如图 13(c)所示。最后, 当 C1 柱破坏时, 伴随着 B1 和 B2 梁的破坏, 受火楼层不能稳定承载发生倒塌。与此同时, 上部和相邻开间的框架梁和楼板也因为失去竖向支撑而发生连续倒塌, 如图 13(d)。可见本文模型可以较好模拟火灾下结构连续倒塌的整个过程。

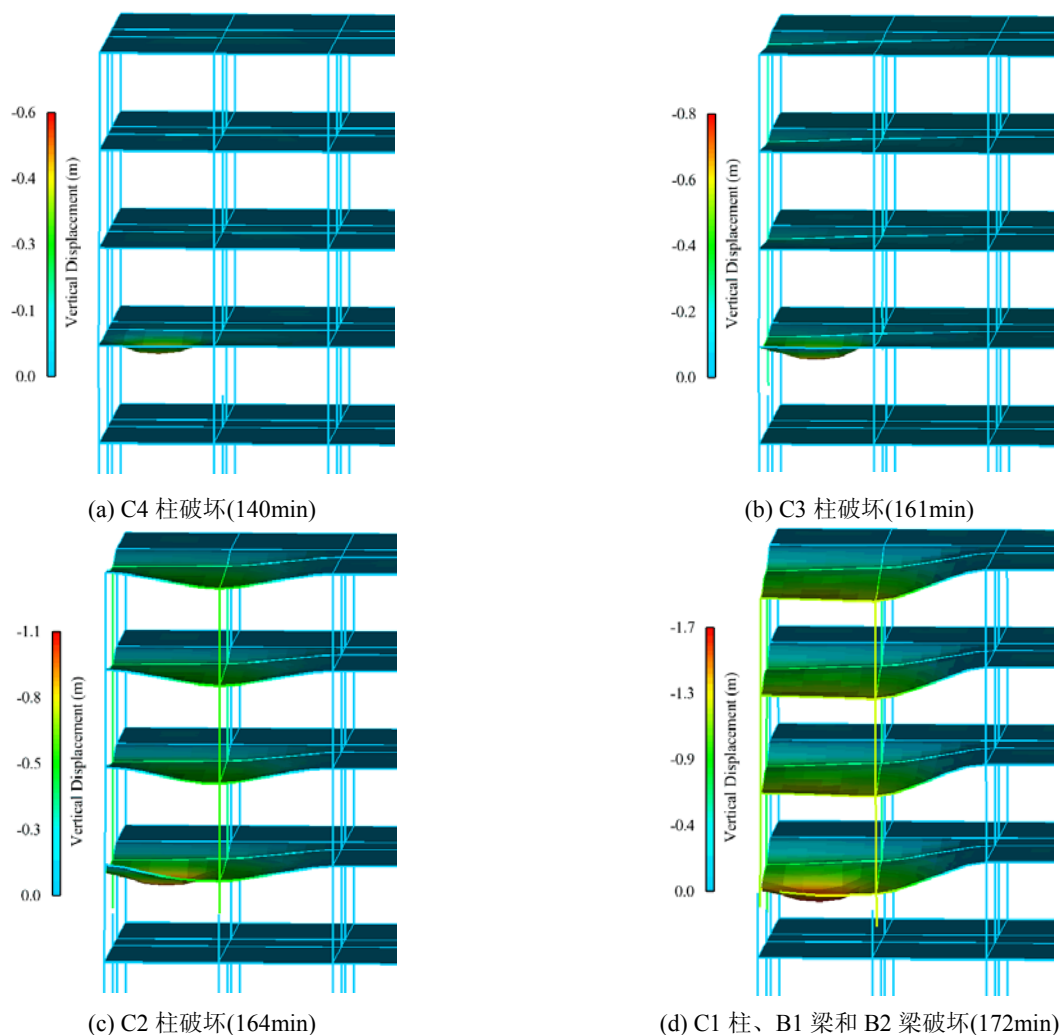


图 13 火灾连续倒塌过程

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, 考虑了各种高温应变分量的计算、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。基于本文模型可以对火灾下钢筋混凝土框架的倒塌过程进行准确的模拟与分析。

参考文献

- [1] 李耀庄, 李昀晖. 中国建筑火灾引起坍塌事故的统计与分析[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 133-135.
- [2] 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(sup. II): 131-140.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [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] G.Williams-Leir. Creep of Structural Steel in Fire: Analytical Expressions[J]. Fire and Material, 1983, 7(2): 73-78.
- [7] 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.
- [8] 陈礼刚. 钢筋混凝土板受火性能的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学博士学位论文, 2004.
- [9] Linus Lim, Colleen Wade. Experimental Fire Tests of Two-Way Concrete Slabs[R]. Fire Engineering Research Report 02/12, University of Canterbury, 2002.
- [10] 张雷明, 刘西拉. 钢筋混凝土结构倒塌分析的前沿研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(3): 47-52.
- [11] 陆新征, 李易, 叶列平, 马一飞, 梁益. 钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌设计方法的研究[J], 工程力学, 2008, 25(Sup.2): 150-157.
- [12] 中华人民共和国国家标准. 建筑设计防火规范(GB50016—2006)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.