

# 混凝土结构多种灾变模拟：模型开发与工程实践\*

陆新征<sup>1,2</sup>, 李易<sup>1,2</sup>, 缪志伟<sup>1,2</sup>, 陈适才<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084;

2. 清华大学 结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 地震、火灾、爆炸等灾害荷载可能对工程结构造成严重的损害。在混凝土结构中, 框架、剪力墙和楼板是最常见的结构构件, 准确模拟其灾变过程中的非线性行为是研究结构抗灾能力的关键。清华大学土木工程系开发了适用于工程结构极限分析的纤维模型和分层壳模型, 能够对钢筋混凝土结构在地震、火灾、爆炸、连续倒塌等各种灾害下的非线性破坏过程进行准确的计算。并且由于其较高的计算效率, 可用于大型复杂钢筋混凝土实际工程灾变的全过程模拟。本文结合具体实验和工程实例, 介绍了上述模型的原理及其在科学研究和工程实践中的典型应用。

**关键词:** 灾害模拟; 纤维模型; 分层壳模型; 动力大变形计算; 热-力耦合计算

**中图分类号:** TP391

## SIMULATION FOR CONCRETE STRUCTURES UNDER VARIOUS DISASTERS: MODEL DEVELOPMENT AND ENGINEERING APPLICATION

X.Z.Lu<sup>1,2</sup>, Y. Li<sup>1,2</sup>, Z.W.Miao<sup>1,2</sup>, S.C.Chen<sup>1,2</sup>

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

2. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing, 100084, China.)

**Abstract:** Engineering structures could be destroyed by disaster loads, such as earthquake, fire, blast et al. In concrete structures, frames, shear walls and slabs are major structural elements, and therefore accurate simulation for the nonlinear behavior of them in various disasters is the key problem for the researches on disaster resistance of concrete structures. The Department of Civil Engineering in Tsinghua University developed fiber beam model and multi-layer shell model for the ultimate analysis of structures. These models could accurately simulate the nonlinear failure process of concrete structures in earthquake, fire, blast, progressive collapse et al. And with the high efficiency of these models, they can be used in the whole process simulation of real large-scale complicated RC structures under various disasters. This paper presents the principles of the models and their typical applications in researches and practices.

**Keywords:** disaster simulation; fiber model; multi-layer shell model; dynamic large deformation computation; thermal-mechanical coupled computation

\* 基金项目: 国家十一五科技支撑计划 (编号: 2006BAK01A02-09) 和清华大学基础研究基金 (编号: JC2007003) .

第一作者/通讯作者: 陆新征 (1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构非线性计算和仿真研究, E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn.

## 1. 引言

灾害是指那些由于自然的、人为的或人与自然综合的原因, 对人类生存和社会发展造成损害的各种现象。在现代社会中, 人类的和经济活动都与建筑物密切相关, 建筑物成为灾害的重要载体甚至成为主要致灾源。因此, 准确模拟建筑结构在各种灾害作用下的破坏全过程, 进而预测并减小灾害损失成为防灾减灾工作的重要课题。

混凝土结构是我国工程中应用最广泛的结构, 同时由于其复杂性也成为了计算机数值模拟的热点之一。大型混凝土结构在灾害下的破坏全过程模拟目前还存在很多困难。为此, 清华大学土木工程系开发了一系列的材料和构件模型, 包括混凝土微平面模型等材料模型<sup>[1]</sup>、钢筋混凝土分层壳单元和钢筋混凝土纤维梁单元<sup>[2]</sup>, 可以较为高效和准确的模拟动力和高温作用下工程结构的极限行为。本文通过一些工程实践与研究, 如框架结构连续倒塌分析与设计<sup>[3]</sup>、爆炸冲击波破坏建筑结构<sup>[4]</sup>、框架结构抗火性能研究<sup>[5]</sup>和北京汽车博物馆设计, 介绍了这些模型在灾害模拟中的应用。

## 2. 材料模型和有限元单元

### 2.1 概述

灾害荷载作用下, 材料微观层次的破坏(屈服面的错动、裂缝的张开)不断发展, 最终导致整体结构的宏观破坏。为了能准确的描述该过程, 需要将构件的宏观力学行为(构件的变形和内力)与材料的本构关系直接联系起来。为此, 清华大学土木工程系开发了以微平面模型为代表的高精度混凝土本构模型和以分层壳、纤维梁为代表的高精度构件模型, 将结构的微观力学行为和宏观力学行为直接联系, 从而能更好模拟各种复杂受力情况下的结构极限行为。

### 2.2 混凝土微平面本构模型

微平面模型<sup>[1]</sup>将材料内部存在于骨料和水泥胶体之间的各方向的交界面作为定义为微平面, 并将此作为直接研究对象, 通过定义在这些微平面上的非线性应力应变关系, 进而获得宏观的应力张量和应变张量。微平面模型虽然计算过程比较复杂, 但可以描述混凝土各类复杂非线性行为, 在三向受力和循环往复加载方面具有优势。图 1 所示为单向受压往复加载试验结果<sup>[1]</sup>和计算的对比, 计算采用微平面模型和通用有限元分析软件 MSC.MARC 和 ABAQUS 中的混凝土本构模型(MARC 中的 von Mises Plasticity、Drucker-Prager plasticity 和 Buyukozturk Concrete 模型; ABAQUS 中的 Concrete smeared cracking 和 Concrete damaged plasticity 模型), 更多比较和分析见文献[1]。

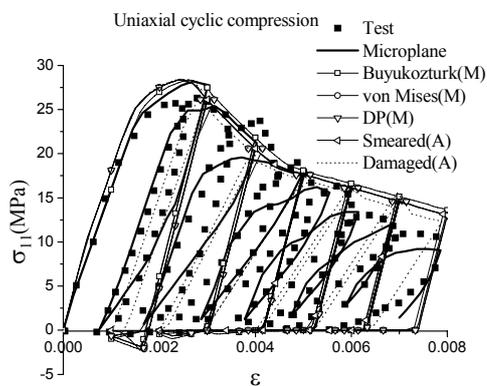


图 1 微平面模型计算单轴受压往复加载试验

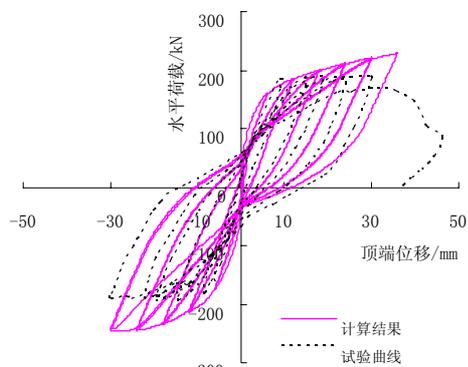


图 2 分层壳模型计算剪力墙往复加载试验

### 2.3 混凝土分层壳模型

钢筋混凝土剪力墙是目前高层建筑中的主要抗侧力构件。由于剪力墙构件与梁、柱等细长构

件相比, 截面尺寸大, 受力变形行为相对比较复杂, 其非线性计算模型一直是工程研究中的一个热点。清华大学土木工程系基于复合材料力学原理, 提出分层壳剪力墙单元。一个分层壳单元可以划分成若干层, 各层可以根据需要设置不同的厚度和材料性质(混凝土, 钢筋)。在有限元计算中, 通过平截面假定, 由中心层应变和曲率得到各钢筋和混凝土层的应变, 进而得到各层相应的应力, 并积分得到整个壳单元的内力。该单元直接将混凝土、钢筋的本构行为和剪力墙的非线性行为联系起来, 因而在描述实际剪力墙复杂非线性行为方面有着明显的优势, 可以描述钢筋混凝土剪力墙面内弯剪共同作用效应和面外弯曲效应。由于它能够较为准确的反映各种内力和变形的相互作用, 因此用较少的单元就能够准确模拟复杂加载条件下的剪力墙构件的力学性能。图2所示为基于分层壳单元的剪力墙计算结果, 可见与实验结果吻合良好<sup>[1]</sup>。

在火灾作用下, 钢筋混凝土楼板的受力模式由常温下的受弯转化为薄膜张拉, 给结构体系的防火能力带来重大影响, 因此建立钢筋混凝土楼板的热-力分析单元有助于准确模拟评估结构真实的防火承载力。在常规分层壳单元的基础上, 本文进一步加入温度自由度并建立单元热传导平衡方程, 并根据火灾下钢筋混凝土板内温度场的特点, 对辐射、对流等热边界条件进行了合理简化, 提出了支持温度场计算的非线性有限元单元模型。同时在各分层上建立不同材料在不同温度下的热弹塑性本构关系, 从而准确地模拟混凝土材料的开裂、屈服与压碎现象以及钢筋在高温下的屈服行为。另外根据全拉格朗日方法, 推导了考虑大变形几何非线性的壳单元切线刚度矩阵, 来反映楼板发生大位移后的薄膜张拉效应。在楼板的热分析上获得了成功的应用, 图4和图5为该单元对Lim<sup>[6]</sup>的双向板标准火灾试验温度场和挠度的模拟。

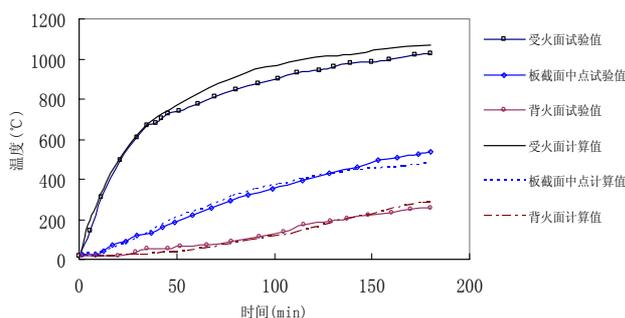


图3 分层壳模型的温度场计算

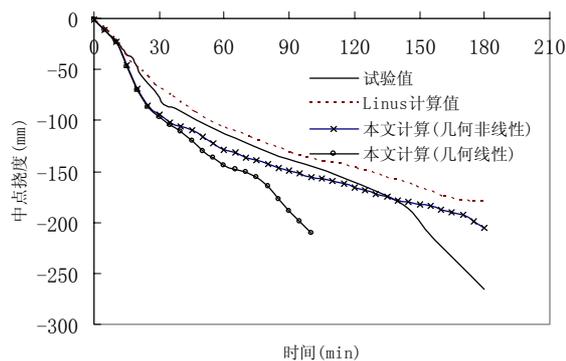


图4 分层壳模型的挠度计算

## 2.4 钢筋混凝土杆系纤维模型程序

杆系构件是另一种常见结构构件类型。纤维模型通过将杆件截面划分成若干纤维, 在每个纤维上使用单轴应力应变关系来描述该纤维材料的受力特性, 纤维间的变形协调则采用平截面假定。对于长细比较大的杆系结构, 纤维模型可以准确考虑轴力和(单向和双向)弯矩的相互关系。清华大学土木工程系基于纤维模型原理, 编制了THUFIBER等程序<sup>错误! 未找到引用源。</sup>, 可用于普通钢筋混凝土杆件和预应力钢筋混凝土杆件的数值计算。程序采用的混凝土本构模型考虑了受压混凝土的约束效应、循环往复荷载下的滞回行为(包括刚度和强度退化)以及受拉混凝土的“受拉刚化效应”。其钢筋本构考虑了钢筋的Bauschinger效应, 反映钢筋单调加载时的屈服、硬化和软化现象, 可以分别模拟具有屈服平台的普通钢筋和拉压不等强的没有明显屈服平台的高强钢筋或钢绞线的通用模型。可以对混凝土框架倒塌试验和往复荷载下的预应力试件(实验数据来源: 文献[7]和[8])进行准确模拟。(见图5~6)

纤维模型还可以应用于火灾分析。通过热传导计算得到截面的温度场, 将温度场赋予纤维模型, 不同纤维具有不同的温度, 可以计算得到各个纤维的热应变和热应力, 以及整个结构在火灾下的反应。图7和图8为纤维模型计算结果和柱构件防火试验<sup>[9]</sup>的比较, 显示出该模型在火灾分析中的良好性能。

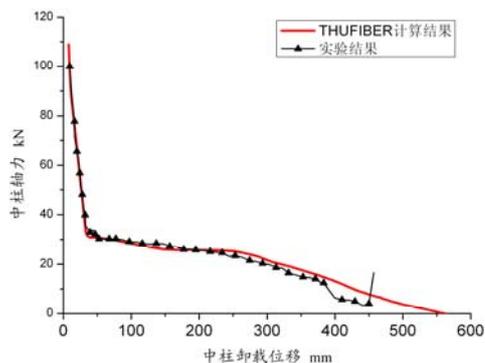


图 5 THUFIBER 计算结果与试验结果比较

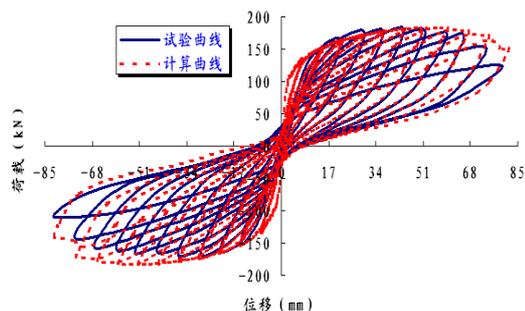


图 6 NAT-PPC 计算结果与试验结果的对比

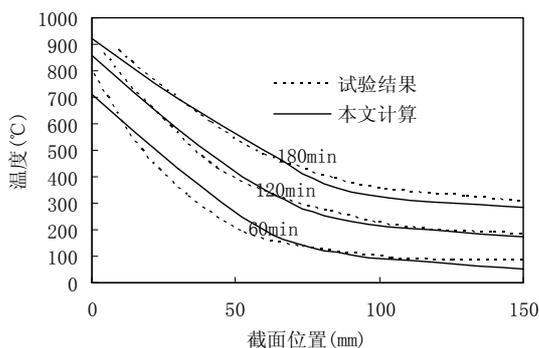


图 7 柱截面温度分布图

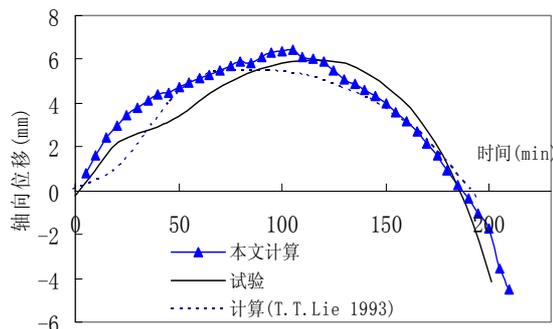


图 8 柱轴向位移

### 3. 科学研究与工程应用

#### 3.1 框架结构的连续倒塌

连续倒塌是由于意外事件(如煤气爆炸、炸弹袭击、车辆撞击、火灾等)造成结构的局部破坏,并引发连锁反应导致破坏向结构的其它部分扩散,最终造成结构的大范围坍塌。我国规范目前尚未对抗连续倒塌设计方法给出明确规定,故很有必要开展建筑物抗连续倒塌的研究工作。进行建筑物抗连续倒塌研究的前提是对发生连续倒塌的结构能够进行准确的全过程模拟,在模拟过程中研究局部破坏和整体破坏之间的关系。清华大学土木工程系利用开发的高性能钢筋混凝土框架结构分析程序 THUFIBER,对按我国规范设计的钢筋混凝土框架抗连续倒塌能力进行了评价和设计,得到了一些有益的结论<sup>[3]</sup>。图 9 和图 10 是抗连续倒塌设计前后,六层中间柱发生破坏后的结构动力弹塑性分析结果。

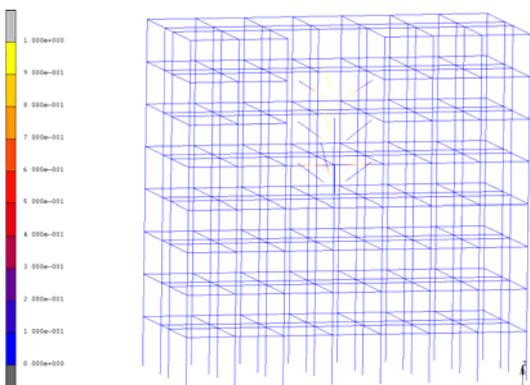


图 9 抗连续倒塌设计前, 结构发生倒塌

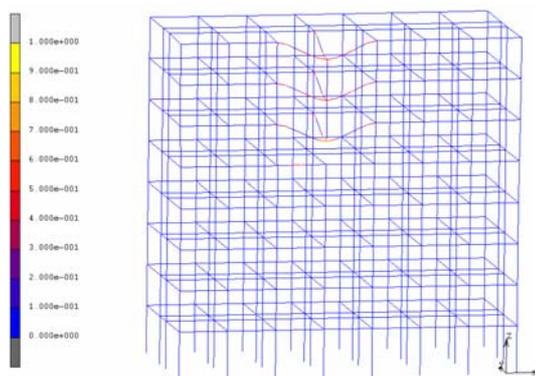


图 10 抗连续倒塌设计后, 结构未发生倒塌

### 3.2 爆炸冲击波下的建筑结构破坏模拟

地下室的设计需要满足人防需要, 在冲击波作用下, 上部结构会传给地下室很大的水平力和倾覆力矩, 有可能使地下室发生倾覆而丧失防护功能<sup>[4]</sup>, 此类问题的研究必须依赖于高性能的计算机仿真模拟。清华大学土木工程系基于其开发的纤维梁单元模型和分层壳剪力墙模型, 对冲击波作用下高层框架结构和剪力墙结构房屋的倒塌及其附建人防地下室的倾覆问题进行了研究, 得到了框架结构和剪力墙结构各自的冲击倒塌模式(部分结果如图 12 和图 13 所示), 以及不同上部结构形式对下部人防设施安全的影响。为人防设施的抗倾覆设计提供了参考依据。

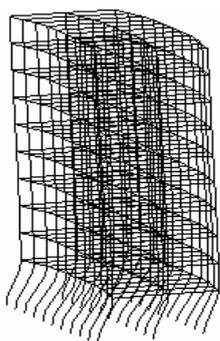


图 11 冲击波下框架结构倒塌模式

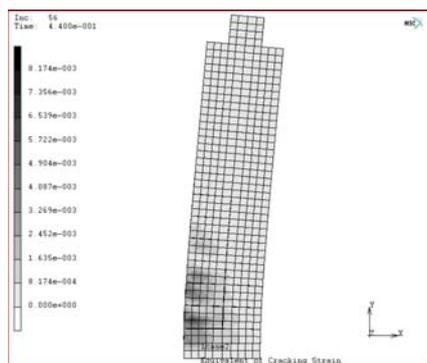


图 12 冲击波下剪力墙结构的开裂破坏

### 3.3 火灾下结构抗火性能研究

目前, 整体结构的火灾试验非常少见, Cardington 足尺框架结构的火灾试验表明火灾试验的昂贵并且其试验结果只能适用于特定的结构。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应的重要手段。清华大学土木工程系利用支持热-力耦合计算的纤维梁模型和分层壳模型, 建立了带楼板的 layered concrete frame structure model, 并进行了一些分析和研究<sup>[5]</sup>。图 13 所示为火灾下楼板对混凝土柱变形的影响, 图 14 所示为火灾发生在不同位置时, 楼板的抗火性能以及对抗火时间的影响, 可见混凝土结构抗火性能研究中楼板构件的重要性。

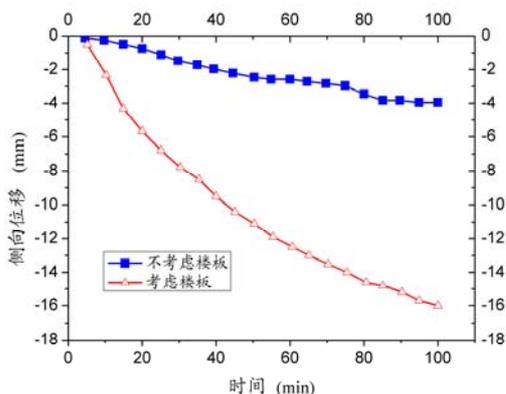


图 13 受火区域边柱侧向位移变化图

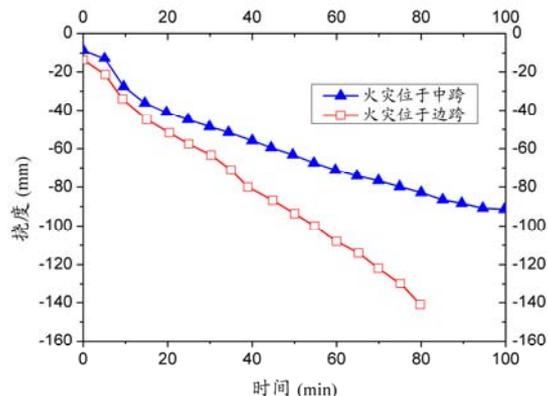


图 14 不同受火区域的楼板挠度变化图

### 3.4 复杂结构设计

本文的高性能计算模型在实际工程设计中也得到了充分的应用。以北京汽车博物馆设计为例(图 16), 该博物馆为框架剪力墙结构, 结构平面不对称, 构件采用钢筋混凝土、钢骨混凝土、钢结构等多种形式, 结点复杂且上下柱的轴线不一致。对该结构进行静力推覆分析, 并将唐山地震波输入获得动力弹塑性时程曲线, 通过比较得到该结构满足抗震需要的结论(图 16)。对结点进行极限分析获得破坏包络线, 并将推覆分析的内力与之比较可知结点满足要求(图 17 和图 18)。

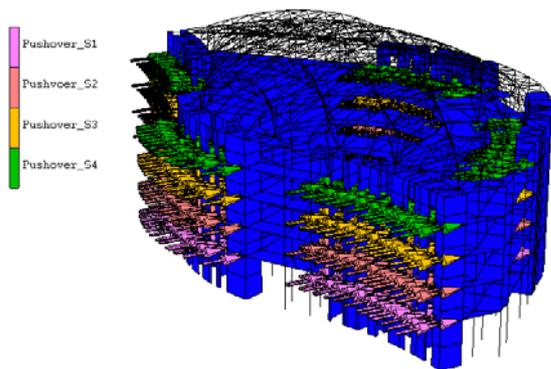


图 15 北京汽车博物馆结构有限元模型

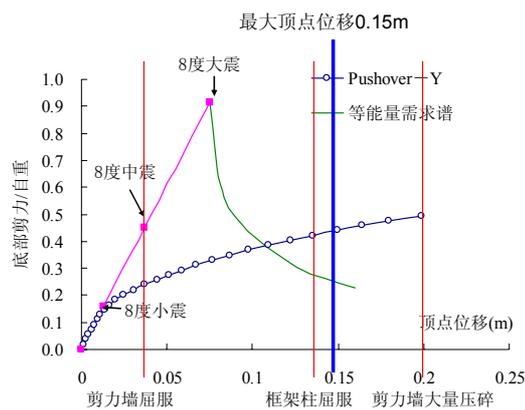


图 16 唐山波短轴输入时的顶点位移

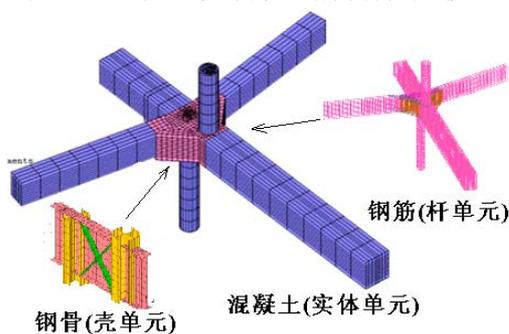


图 17 结点有限元模型

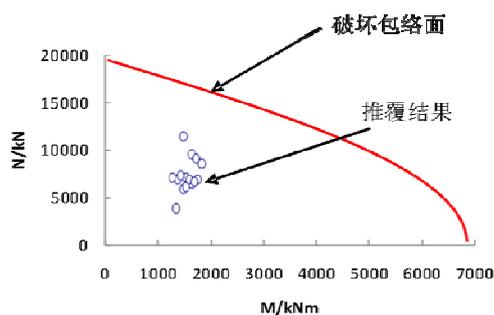


图 18 结点破坏可能性分析

## 4. 结论

纤维梁模型和分层壳模型, 配合以适当的材料本构关系, 可以对地震、火灾、连续倒塌等多种灾害作用下结构的非线性全过程进行模拟, 其精度和效率能够满足科学研究和工程实践的需求。

## 5. 致谢

本文感谢国家“十一五”科技支撑计划(编号: 2006BAK01A02-09)和清华大学基础研究基金(编号: JC2007003)对本研究的支持。

## 参考文献

- [1] 缪志伟, 陆新征, 李易, 等. 基于通用有限元程序和微平面模型分析复杂应力混凝土结构. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24(1):49-53.
- [2] 叶列平, 陆新征, 马千里, 等. 混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例. 工程力学, 2006, S2:131~140.
- [3] 梁益, 陆新征, 李易, 等. 3层 RC 框架的抗连续倒塌设计. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(6):659~664.
- [4] 张正威, 陆新征, 宋二祥, 等. 核爆冲击波作用下高层框架结构对附建式人防地下室的倾覆荷载分析. 防护工程, 2006, 28(3):1~8.
- [5] 陈适才, 陆新征, 任爱珠, 等. 火灾下混凝土结构破坏模拟的纤维梁单元模型. 计算力学学报, 已录用
- [6] Linus L. Numerical modeling of two-way reinforced concrete slabs in fire. Engineering Structures, 2004, 26: 1081-1091.
- [7] 易伟建, 何庆锋, 肖岩. 钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能的试验研究. 建筑结构学报, 2007, 28(5):104~109.
- [8] 苏小卒. 预应力混凝土框架抗震性能研究. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.
- [9] Lie T T, Irwin R J. Method to calculate the fire resistance of reinforced concrete columns with rectangular cross section. ACI Structural Journal, 1993, 90(1):52~60