

建筑结构在灾害作用下的高性能仿真分析

陆新征, 李 易, 缪志伟, 陈序平, 梁益

(清华大学土木工程系, 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、爆炸等荷载可能对建筑或建筑群造成严重损害, 是结构防灾设计的重要内容, 高性能计算为研究建筑物在各种灾害下的行为提供了有力工具。清华大学土木工程系开发了一系列的材料、构件和结构数值模型, 并基于高性能并行计算和非线性分析, 对倒塌、倾覆等结构极限状态以及城市群震害损失进行了研究。为建筑和城市减灾提供了有力工具。

【关键词】建筑结构, 高性能仿真分析, 有限元模型, 连续倒塌, 冲击波, 城市建筑群

High Performance Simulation for Building Structures under Disaster

Lu Xin-zheng, Li Yi, Miao Zhi-wei, Chen Xu-ping, Liang Yi

(Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: Buildings and building clusters could be destroyed by disaster load, such as earthquake and blast. Accurate prediction for the behavior of building structures in various disasters provided by high-performance numerical computing is important to structural design. The Department of Civil Engineering in Tsinghua University developed a series of advanced numerical models including material laws and element models. Therefore, base on parallel computing and nonlinear methods, analyses about some extreme problems of building structures such as collapse, overturning and the loss of earthquake damage of urban building clusters are successfully processed. Hence, the analyses provide important advice for disaster prevention and mitigation.

Keywords: building structure, high-performance simulating analysis, finite element model, progressive collapse, blast wave, urban building clusters

1 引言

随着城市化进程的加快, 城市建筑结构安全问题日益突出, 特别是“911”事件发生后, 工程界开始重视建筑结构在各种极限情况下的性能分析。尤其在地震、火灾、爆炸、撞击等自然和人为灾害下, 有必要进行结构的极限分析, 以提高结构的防灾减灾能力。但是通

*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)

常这类极限状态试验复杂并难以保证准确度，而且花费巨大、可重复性差。相比之下，仿真分析方法成本低且可重复性高，可以根据需要进行模型的简化以摒除次要因素的干扰，能够作为原型试验的有力补充，为设计施工提供有益的参考。

极限分析涉及各类复杂的非线性行为，包括材料非线性、几何非线性，接触非线性等，所以极限分析往往比较复杂。清华大学土木工程系基于通用有限元软件平台，开发了混凝土微平面模型等材料模型^[1]、钢筋混凝土分层壳单元^[2]和钢筋混凝土纤维梁单元^[3-5]等结构和构件模型，能够较好模拟建筑结构的极限状态。本文以一些仿真实例，包括框架结构连续倒塌^[3-4]、爆炸冲击波破坏建筑结构^[6]、以及城市建筑群的地震破坏等，介绍有关高性能计算在建筑防灾方面的应用。

2 材料模型和有限元单元

2.1 概述

长期以来，数值分析的精度和效率一直是一个难以调和的矛盾。高精度的模型往往需要较多的计算时间和存储空间，因而限制了它的广泛应用。高性能计算为高精度模型的应用提供了有力支持，计算机时和计算机容量不再是瓶颈因素。由此，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材料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

混凝土的非线性行为非常复杂，简单的弹塑性—断裂本构模型难以描述混凝土的各种非线性行为特点。微平面模型^[7]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的应力应变关系，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（比一般弹塑性—断裂本构模型消耗资源数十倍），但可以描述混凝土各类复杂非线性行为。图1~3所示为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

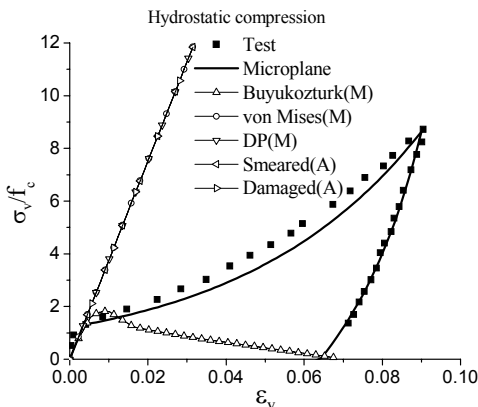


图1 静水压缩
Fig 1. Hydrostatic compression

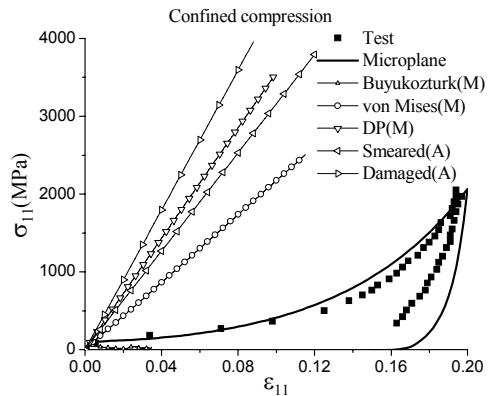


图2 单轴应变压缩
Fig 2. Confined compression

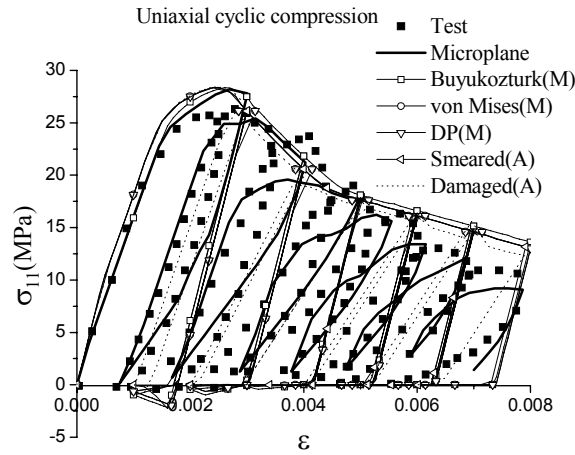


图3 单轴受压往复加载

Fig 3. Uniaxial cyclic compression

型, 以及相关实验结果^[8]对比 (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), 可见微平面模型在三向受力以及循环往复加载方面具有优势, 因而可以用于诸如剪力墙等复杂应力混凝土结构的分析计算中。

2.3 混凝土剪力墙分层壳模型

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, 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。

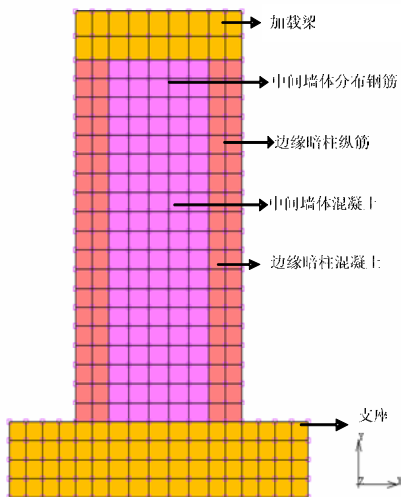


图4 分层壳剪力墙有限元计算模型

Fig 4. FE model for shear wall based on multi-layer shell

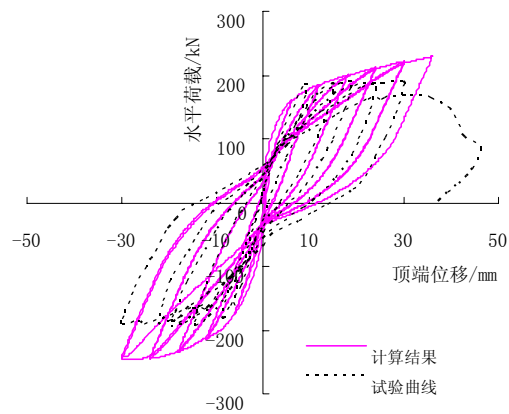


图5 荷载—位移曲线

Fig.5 Load-displacement curves

一个分层壳单元可以划分成很多层,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)。在有限元计算过程中,首先得到壳单元中心层的应变和曲率,然后根据各层材料之间满足平截面假定,就可以由中心层应变和曲率得到各钢筋和混凝土层的应变,进而由各层的材料本构方程可以得到各层相应的应力,并积分得到整个壳单元的内力。由此可见,与已有的等效梁模型、等效桁架模型和多垂直杆元模型等剪力墙计算模型^[9]相比,该单元可以直接将混凝土、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。而基于高性能计算,可以满足采用分层壳增加的计算量。图 4、5 所示为基于分层壳单元的剪力墙和计算结果,可见与实验结果^[10]吻合良好,并可以用于复杂结构的计算。

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。纤维模型是描述杆件复杂受力行为的重要单元类型。纤维模型通过将杆件截面划分成若干纤维,每个纤维均为单轴受力,并用材料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,纤维模型具有以下优点:①可适用于各种截面形状;②可以准确考虑轴力和(单向和双向)弯矩的相互关系;③采用更加符合构件受力状态的单轴本构关系。清华大学土木工程系基于纤维模型原理,编制了 THUFIBER 错误!未找到引用源。和 NAT-PPC 错误!未找到引用源。程序,分别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可以合理反映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)

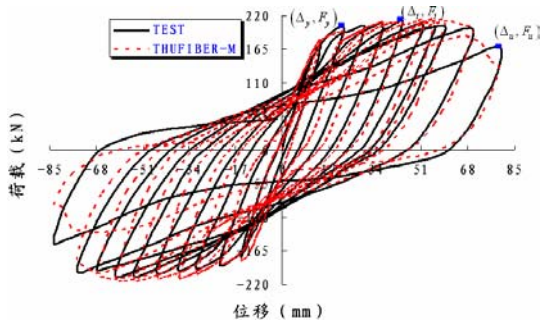


图 6 S-1 计算结果与试验结果比较

Fig.6 Comparison for S-1, test vs. computation

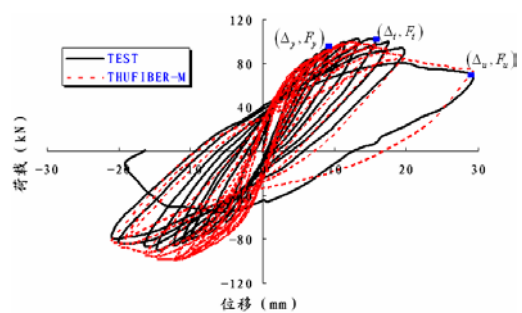


图 7 YW0 计算结果与试验结果比较

Fig.7 Comparison for YW0, test vs. computation

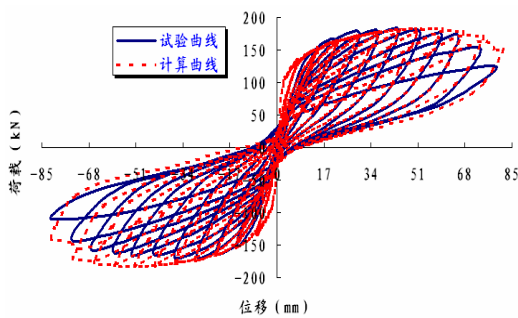


图 8 S-2 计算结果与试验结果的对比^[12]

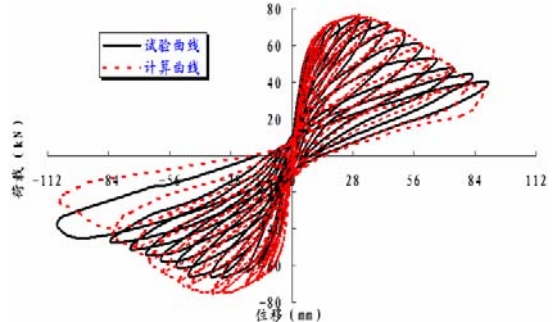


图 9 UB-2 计算结果与试验结果的对比^[13]

Fig.8 Comparison for S-2, test vs. computation

Fig.9 Comparison for UB-2, test vs. computation

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，可以对往复荷载下的混凝土压弯柱试件 (S-1⁰、YW0⁰) 和预应力试件 (实验数据来源：文献[12]和[13]) 进行准确模拟。(见图 6~9)

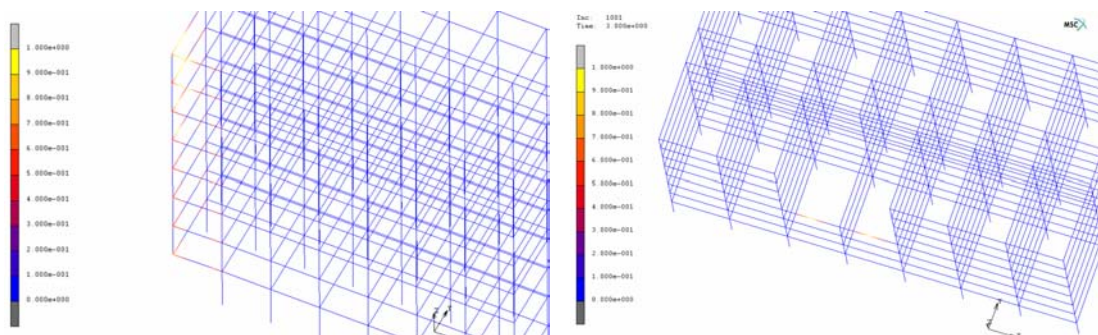
3 框架结构的连续倒塌

自“911”事件以来，连续倒塌灾害引起广泛关注。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。一般来说，如果结构的最终破坏状态与初始破坏不成比例，即可称之为连续倒塌^[14]。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，必须依赖高性能计算手段，通过进行拆除构件模拟，研究其局部破坏和整体破坏之间的关系。

表 1 八层框架原始结构和拉结设计后结构的破坏模式

Table 1 Collapse modes of 8-story frame after normal design and TF design

		角柱	长边中柱	短边中柱	内柱
首层	原始结构	不倒塌	不倒塌	不倒塌	不倒塌
	拉结设计后结构	不倒塌	不倒塌	不倒塌	不倒塌
第 2 层	原始结构	不倒塌	不倒塌	不倒塌	—
	拉结设计后结构	不倒塌	不倒塌	不倒塌	—
第 3~4 层	原始结构	倒塌	不倒塌	不倒塌	—
	拉结设计后结构	倒塌	不倒塌	不倒塌	—
第 5~8 层	原始结构	倒塌	倒塌	不倒塌	—
	拉结设计后结构	倒塌	倒塌	不倒塌	—



(a) 首层角柱拆除后，上部结构未发生倒塌

(b) 第五层长边中柱拆除后，上部结构发生倒塌

图 10 八层框架原始结构拆除构件后的破坏状况

Fig.10 Failure modes for original 8-story frame after columns are removed

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, 参考美国的 DoD 2005^[15]规范, 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, 部分结论如表 1 和图 10 所示。由以上分析结果可知我国规范设计的钢筋混凝土结构具有一定的抗连续倒塌能力, 但仍然存在一些不足。按照国外规范的拉结强度法加固我国现有框架结构, 不能提高其抗连续倒塌能力。本文在拆除构件法的基础上, 对薄弱部分进行如下加强设计流程: 加强设计——拆除构件法仿真分析——再设计, 经过这个流程后获得的框架结构抗连续倒塌能力得到完善, 如图 11。由此可见高性能计算在结构抗连续倒塌能力研究中有不可替代的作用。

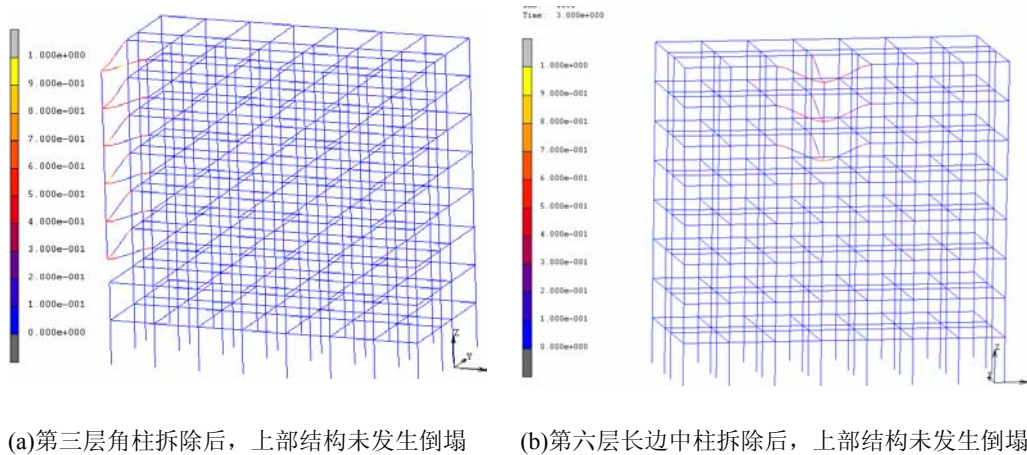


图 11 拆除构件法设计后框架的倒塌验算

Fig.11 Checking calculation for collapse of frames after AP design

4 爆炸冲击波下的建筑结构破坏模拟

我国由于城市人口密度极大, 为满足战时人防的需要, 大多在高层建筑下修建附建式人防地下室。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^[6], 此类问题研究难度很大, 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的分层壳剪力墙模型, 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, 较圆满的完成了任务。

4.1 框架结构

以北京地区典型高层住宅建筑为例, 其结构形式是十层两跨钢筋混凝土框架结构。对不同冲击波水平下结构的倒塌过程以及倾覆荷载进行了模拟, 进而讨论了其安全性。部分分析结果如图 12 所示。

4.2 剪力墙结构

与梁柱等构件相比, 剪力墙具有较大的刚度, 在结构中往往承担了水平力的大部分。在低矮剪力墙结构中, 剪力墙主要起到抗剪的作用, 并以剪切破坏为主; 但在高层剪力墙

中, 在水平力作用下由于弯矩和轴力相对较大, 破坏往往由弯曲控制。剪力墙结构虽然对抗震有利, 但对于人防地下室的倾覆问题来说影响却正好相反。上部结构的刚度和承载力越大, 冲击波作用下传给地下室的倾覆力就越大。因而相比框架结构而言, 剪力墙结构房屋的附建人防地下室更为危险。利用分层壳剪力墙单元, 并结合纤维模型, 可以很好地模拟带暗柱剪力墙的面内剪切破坏、面内弯曲破坏及面外弯曲破坏等各种复杂非线性行为, 并能够同时考虑墙体面内和面外受力行为的耦合效果^[2]。最终计算得到结果如图 13 所示。

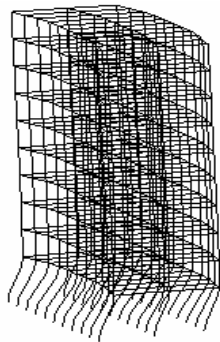


图12 框架结构倒塌模式

Fig.12 Collapse model for frame structures

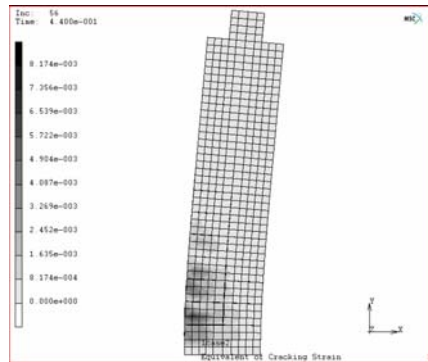


图13 剪力墙结构的开裂破坏

Fig.13 Crack in shearwall structure

5 地震作用下城市建筑群的破坏

很多灾害有着明显的区域性特点, 仅对单体建筑进行灾害模拟往往不能满足减灾救灾综合决策的需要。高性能计算手段为研究城市建筑群的抗灾能力提供了非常有力的手段。通过模拟城市建筑群的震害, 可以为应急交互救灾、人员疏散、灾害链模拟等奠定良好基础。

清华大学土木工程系开展的城市建筑群的地震破坏高性能计算模拟。通过将 GIS 技术、

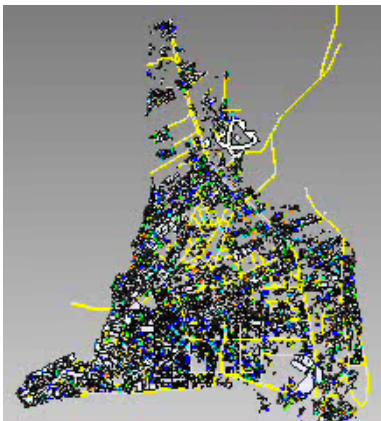


图14 城市建筑群震害损失(不同颜色表示不同震害水平)

Fig.14 Loss of earthquake damage of urban building clusters



图15 震害场景模拟

Fig.15 Scene simulation of earthquake damage

CAD 技术和高性能计算技术相结合, 实现了对城市建筑群数千座房屋震害的综合模拟与预测, 为发展灾害应急救援技术等提供了工具。部分模拟结果如图 14 和图 15 所示。

6 结论

随着计算机的发展, 利用仿真分析方法分析工程结构在各种灾害作用下极限状态时的力学性能, 已经成为一种重要的分析手段。通过发展高性能的材料模型和先进的有限元方法, 还可以不断提高仿真分析方法的准确度和可靠度, 使仿真分析方法成为结构设计的有力工具。

7 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] 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, S2:131~140.
- [2] 门俊, 陆新征, 宋二祥, 陈肇元. 分层壳模型在剪力墙结构计算中的应用[J]. 防护工程, 2006, 28(3): 9~13.
- [3] 陆新征, 缪志伟, 江见鲸, 叶列平. 静力和动力荷载作用下混凝土高层结构的倒塌模拟[J], 山西地震, 2006. 126(2): 7~11.
- [4] 陆新征. 倒塌分析中框架及土体的模型[J]. 计算机辅助工程, 2006, S 1 :417~419.
- [5] 汪训流, 叶列平, 陆新征. 往复荷载下预应力混凝土结构的数值模拟[J], 工程抗震与加固改造, 2006. 28(6) :25~29.
- [6] 张正威, 陆新征, 宋二祥, 陈肇元. 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[J]. 防护工程, 2006, 28(3) : 1~8.
- [7] Bažant, Z.P. and Oh, B.H. Microplane model for progressive fracture of concrete and rock[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE,1985: 111(4), 559~582.
- [8] Caner, F.C. and Bažant, Z.P. Microplane model M4 for concrete. II: Algorithm and calibration[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2000,126(9) : 954~961.
- [9] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [10] 魏勇. 外钢框架—混凝土核心筒抗震性能及设计方法研究[D]. 清华大学土木工程系, 2006
- [11] Zatar W, Mutsuyoshi H. Residual displacements of concrete bridge piers subjected to near field earthquakes [J] ACI Structural Journal, 2002. 99(6), 740~749.
- [12] 李静. 矩形截面 FS 约束混凝土柱抗震性能的试验研究与理论分析[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [13] 苏小卒, 预应力混凝土框架抗震性能研究 [M], 上海: 上海科学技术出版社, 1998.
- [14] Ellingwood BR. Mitigating Risk from Abnormal Loads and Progressive Collapse[J].Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20(4): 315-323.
- [15] UFC 4-023-03, Design of Structures to Resist Progressive Collapse[S].