

MSC. MARC 在土木工程极限分析中的应用

Applications of MSC. MARC in Ultimate Analysis for Civil Engineering

张炎圣 陆新征 李易 梁益
(清华大学土木工程系)

摘要: 土木工程极限分析涉及大量的非线性, 因此比较复杂。本文通过超高车辆撞击桥梁上部结构, 重型车辆过桥, 以及建筑结构连续倒塌三个方面的仿真实例, 介绍 MSC. MARC 软件在土木工程极限分析中的应用。仿真结果表明, MSC. MARC 具有优异的非线性计算能力, 可以作为土木工程极限分析的有力工具。

关键字: MSC. MARC, 土木工程, 极限分析, 非线性

Abstract: The ultimate analysis in civil engineering is very complicated because of high nonlinearity. This paper presents the applications of MSC. MARC on impact between over-high truck and bridge superstructure, heavy truck passing bridge and progressive collapse of building structure. The computational results show that with the outstanding nonlinear capacity, MSC. MARC can be well used for ultimate analysis in civil engineering.

Keywords: MSC. MARC, civil engineering, ultimate analysis, nonlinear

1 引言

结构在极限状态下的力学行为是土木工程领域重要的研究内容, 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。由于结构的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。MSC. MARC 具有优异的非线性计算能力和二次开发能力, 因此成为土木工程极限分析的有利工具。本文的仿真实例, 包括超高车辆撞击桥梁上部结构^[1,2], 重型车辆过桥, 以及框架结构连续倒塌, 都在 MSC. MARC 软件的基础上, 分析了结构在局部或者整体进入极限状态后的力学行为。

2 超高车辆撞击桥梁上部结构

鉴于超高车辆撞击立交桥梁的事故屡见不鲜, 研究超高车辆-桥梁上部结构的碰撞机理很有必要。借助 MSC. MARC 软件, 车厢与桥梁的接触非线性, 以及撞击区域的材料非线性、几何非线性都能得到很好的模拟, 因此可以很好地分析撞击过程以及结果, 为桥梁的防撞、加固提供参考。

超高车辆有限元模型(图 1)采用美国“国家碰撞分析中心”(National Crash Analysis Center, NCAC)提供的标准双轴卡车模型。模型原本基于 LS-DYNA 软件, 本文对其进行适当的修改以适应 MSC. MARC 的分析。

图 2 是钢-混凝土组合简支梁桥有限元模型, 上部是混凝土面板, 下部是两个钢箱梁。桥梁面板混凝土划分成实体单元, 采用基于 von Mises 屈服准则的弹塑性模型模拟其受压行为, 采用基于最大拉应力准则的弥散裂缝模型模拟其受拉开裂行为^[3,4]。钢箱梁划分成壳单

元, 材料模型采用基于 von Mises 屈服准则的理想弹塑性本构。混凝土面板内部钢筋采用 MARC 自带的 Rebar 单元, 材料模型采取基于 Von Mises 屈服准则的理想弹塑性本构。

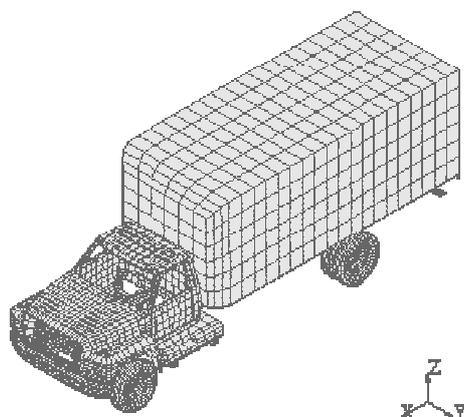


图 1 超高车辆有限元模型

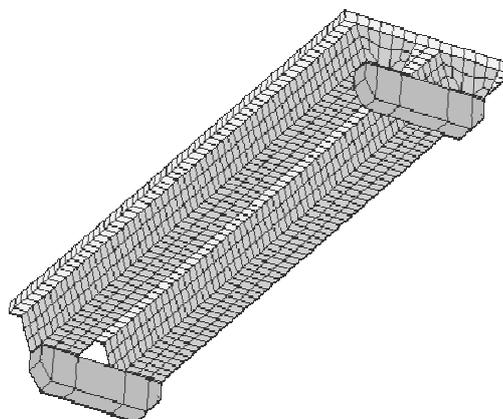


图 2 桥梁有限元模型

图 3, 图 4 分别是 30km/h 和 90km/h 的撞击速度下, 钢箱梁的屈服情况和混凝土面板的开裂情况。可见, 钢箱梁的塑性区域随着撞击速度的增大而增大, 90km/h 工况的塑性区面积约为 30km/h 工况的 2 倍。另外, 碰撞区域附近混凝土的开裂范围和裂缝宽度也随着撞击速度的增大而增大。仿真结果表明, MSC.MARC 以其优异的极限状态非线性分析能力, 很好地模拟了碰撞区域局部的损伤。

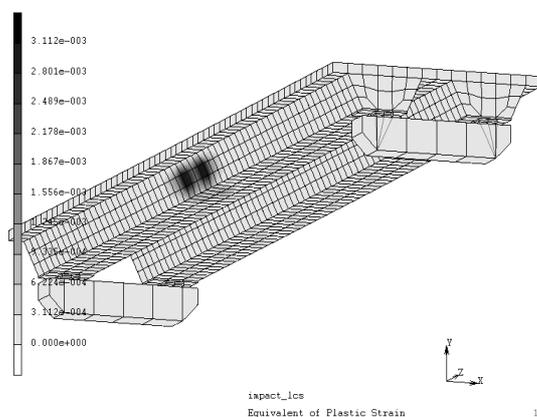


图 3.1 V=30km/h, 钢箱梁塑性应变云图

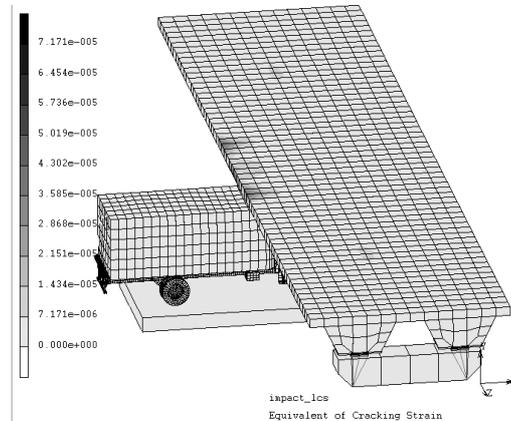


图 3.2 V=30km/h, 混凝土面板开裂应变云图

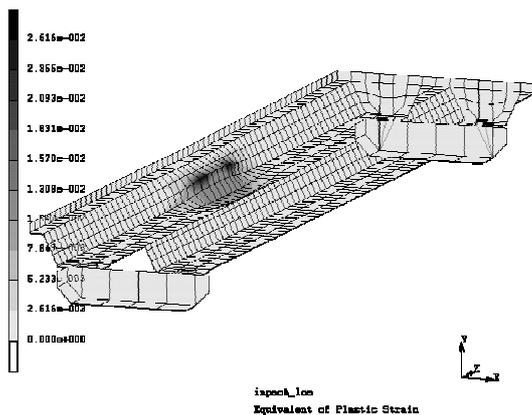


图 4.1 V=90km/h, 钢箱梁塑性应变云图

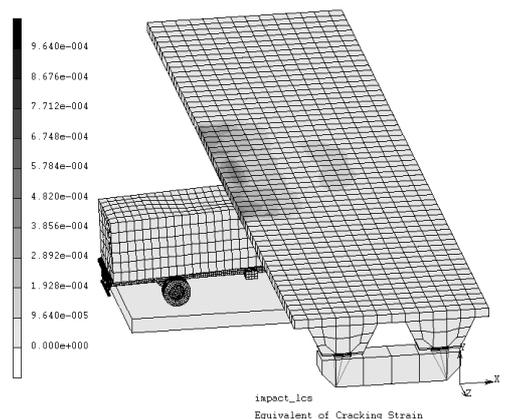


图 4.2 V=90km/h, 混凝土面板开裂应变云图

通过研究撞击后桥梁的荷载-挠度曲线, 可以分析撞击造成的桥梁承载力损失情况。图 5 是各种工况的荷载-挠度曲线。荷载施加方法是在桥梁自重的基础上, 按比例增加公路 I 级车道荷载 (包括均布力和跨中集中力)。图 5 表明, 各种工况下极限承载力是一致的, 但随着撞击速度的增大, 桥梁损伤也较大, 桥梁的刚度减小, 对正常使用产生不利影响。可见, MSC.MARC 可以较好地预测整桥的极限承载力。

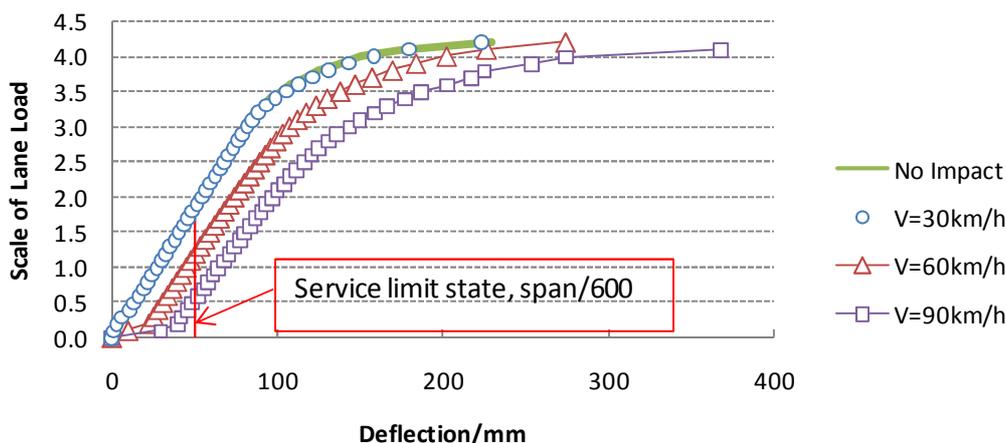


图 5 不同工况桥梁承载力损失情况

3 重型车辆过桥

重型车辆荷载, 既是公路桥梁设计的重要控制工况, 也是桥梁安全性检测的重要手段。由于成本、技术等手段的限制, 完全基于实验研究重车对桥梁的作用尚存在一些不足。而通过准确的计算机模拟, 可以辅助实验更加深入的了解重车对桥梁的影响。准确的重车过桥模拟是一个非常复杂的非线性课题, 涉及车轮与桥面的接触非线性, 以及结构损伤后的材料非线性和几何非线性。而 MSC.MARC 提供的强大的非线性分析功能为解决该问题提供了有力的工具。

图 6 是重型车辆有限元模型, 严格按照我国公路桥梁规范轴重建模。图 7 是钢筋混凝土拱桥有限元模型, 采用壳单元建模。本例重在研究车辆移动荷载的影响和冲击效应, 因此车轮-桥面的接触非线性得到精确的模拟。

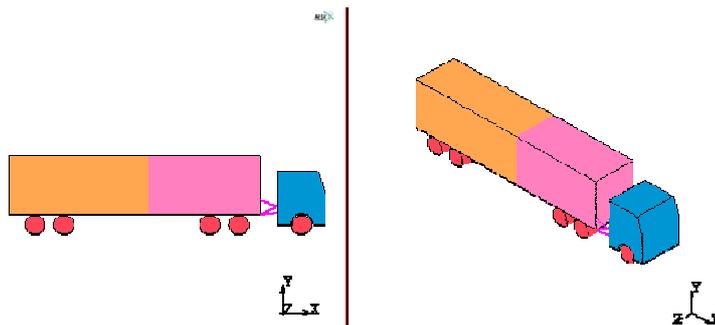


图 6 重型车辆有限元模型

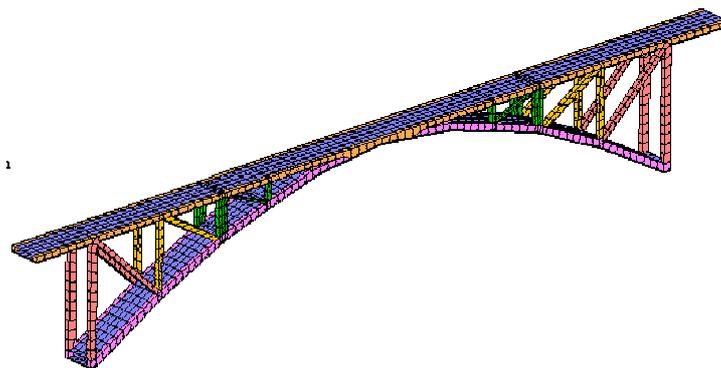


图 7 桥梁有限元模型

图 8 是两车分别在桥的两端时桥梁的主压应力云图, 图 9 是两车在桥的跨中相遇时桥梁的主压应力云图。重车过桥引起的桥梁附加挠度如图 10 所示, 最大值为-13.3mm, 发生在两车相遇时。重车过桥的冲击荷载系数约为 0.07。可见, 通过 MSC.MARC 软件, 可以全面把握整个重车过桥过程中各个杆件各个部位的应力分布情况, 可以研究移动荷载和冲击作用下结构的力学响应, 为进一步分析桥梁的损伤情况, 以及考虑重车过桥的桥梁承载力提供必要基础。

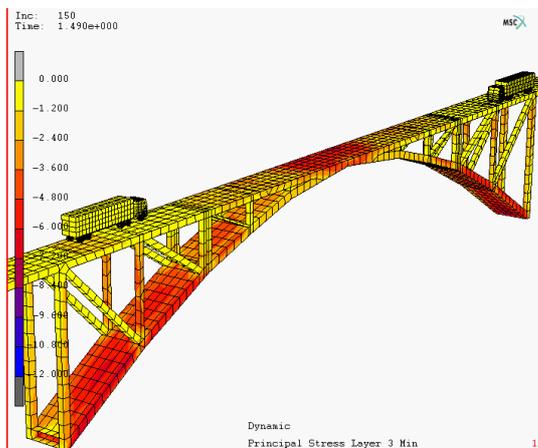


图 8 两车分别在桥的两端时, 桥梁主压应力云图

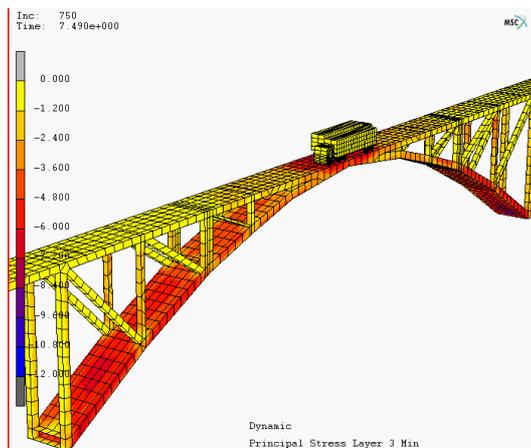


图 9 两车在桥的跨中相遇时, 桥梁主压应力云图

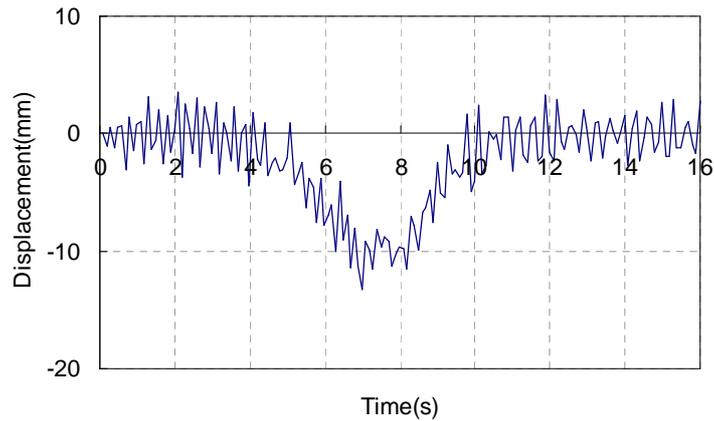


图 10 重车过桥引起的桥梁附加挠度时程

4 框架结构连续倒塌

建筑结构由于意外事件造成的局部破坏, 可能引发连锁反应导致破坏范围扩散, 最终造成大范围结构坍塌。由于结构连续倒塌事故时有发生而且损失惨重, 有必要开展相关研究。

框架结构的连续倒塌, 需要混凝土的开裂、压碎, 以及钢筋的屈服、断裂等材料非线性。清华大学土木工程系在 MSC.MARC 的基础上, 利用二次开发功能, 开发了适用于钢筋混凝土杆系结构的 THUFIBER 程序^[5]。THUFIBER 的材料本构如图 11-13 所示, 充分考虑了材料非线性, 所以在框架结构倒塌分析方面有着成功的应用^[5-7]。

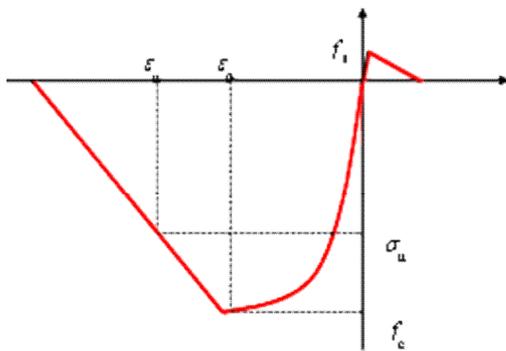


图 11 混凝土本构模型

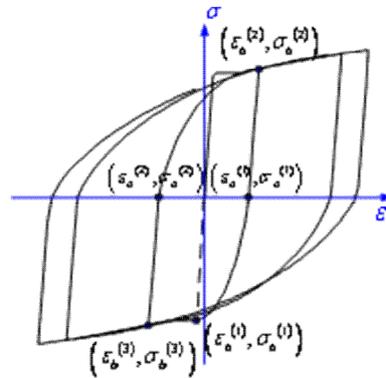


图 12 钢筋本构模型

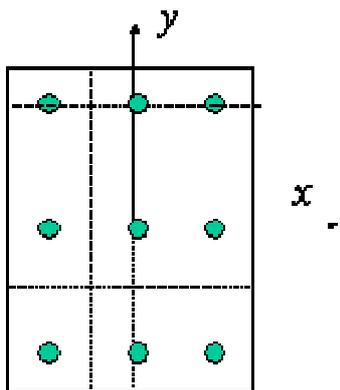


图 13 杆件截面纤维划分

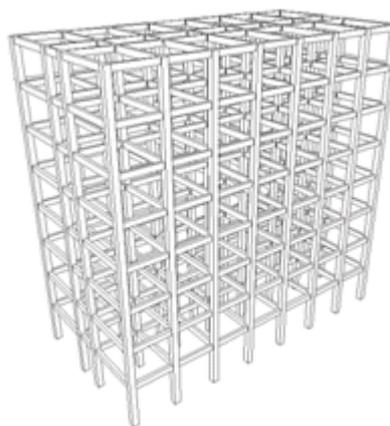
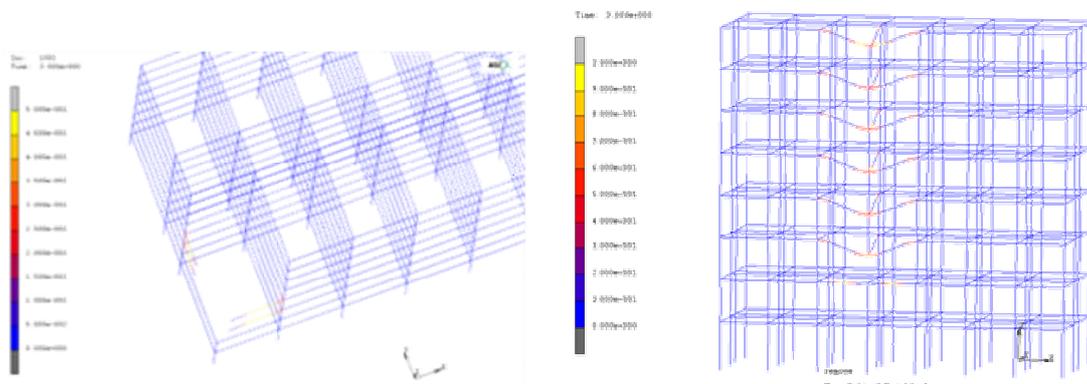


图 14 八层框架结构透视图

结构抗连续倒塌设计方法主要包括拉结强度法和拆除构件法^[8-10]。本例的研究对象为按照我国现行规范设计的 8 层钢筋混凝土框架结构, 如图 14 所示。图 15 显示未经抗连续倒塌设计的结构在拆除构件分析中的倒塌情况。图 16 显示采用拆除构件法设计后, 结构在拆除构件分析中的倒塌情况。对比图 15 和图 16, 可见采用拆除构件法设计可以提高结构的抗连续倒塌能力。仿真结果表明, 通过 MSC.MARC 强大的非线性计算和二次开发功能, 可以很好模拟拆除构件以后结构的连续倒塌情况, 从而为探索合理的抗连续倒塌设计方法提供参考。



a) 第三层角柱拆除后, 受其支承的上部结构倒塌 b) 第三层长边中柱拆除后, 受其支承的上部结构未倒塌

图 15 未经抗连续倒塌设计, 拆除构件后的结构倒塌情况

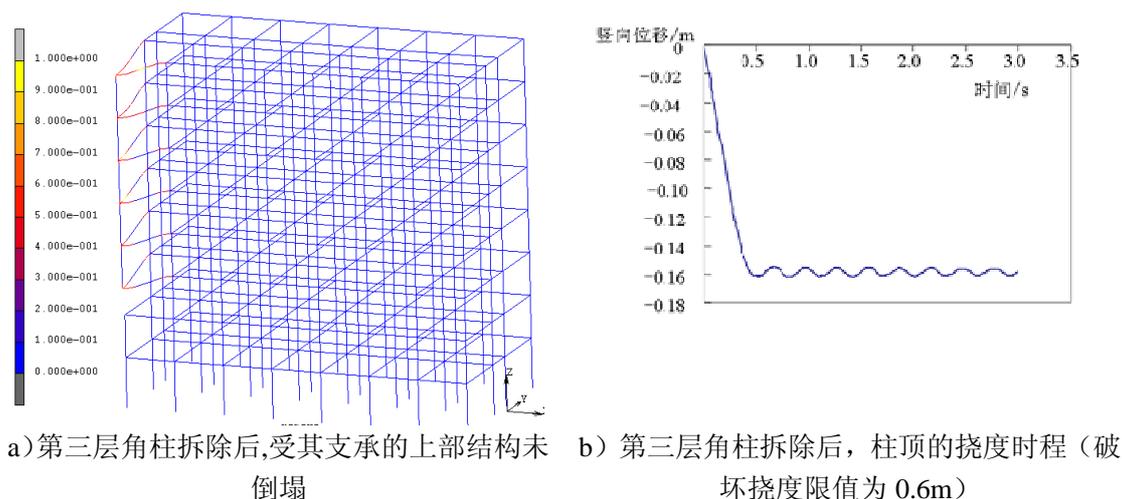


图 16 经拆除构件法设计, 拆除构件后的结构倒塌情况

5 结论

数值模拟技术是进行土木工程极限分析的重要手段。MSC.MARC 软件具有优异的非线性计算能力和二次开发能力, 可以成为土木工程极限分析的有力工具。

致谢

感谢国家十一五科技支撑计划(2006BAK01A02-09), 北京市科委“桥梁结构安全实时评价体系研究及计算机仿真”项目和清华大学基础研究基金(JC2007003)对本项目的支持。

参考文献

- [1] 陆新征,张炎圣,宁静,江见鲸,任爱珠.超高车辆与立交桥碰撞的高精度非线性有限元仿真[J].石家庄铁道学院学报,2007,20(1):29~34.
- [2] 张炎圣,陆新征,宁静,江见鲸.超高车辆撞击组合结构桥梁的仿真分析[J].交通与计算机,2007,3(25):65~69.
- [3] 江见鲸,陆新征,叶列平.混凝土结构有限元分析[M].清华大学出版社,2005.
- [4] 江见鲸,何放龙,何益斌,陆新征.有限元法及其应用[M].机械工业出版社,2006.
- [5] 陆新征,张炎圣,江见鲸.基于纤维模型的钢筋混凝土框架结构爆破倒塌破坏模拟[J].爆破,2007,24(2):1-6.
- [6] 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.
- [7] 陆新征,倒塌分析中框架及土体模型研究[A].计算机辅助工程,2006,15(Sup.):417-420.
- [8] Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-05) and commentary (ACI 318RM-05) [S]. American Concrete Institute, 2005.
- [9] GSA2003, Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization project[S].
- [10] UFC 4-023-03, Design of Structures to Resist Progressive Collapse[S].