文章编号：1000－7598－(2008) 01－0285－04

建(构)筑物控制爆破拆除的仿真模拟

贾永胜[1,2]，谢先启[2]，李欣宇[3]，罗启军[2]，刘 军[4]

（1.武汉理工大学 资源与环境工程学院，武汉 430070；2.武汉爆破公司，武汉 430023；
3.武汉科技大学 理学院，武汉 430081；4.河海大学 岩土工程研究所，南京 210098）

摘 要：介绍了在 ABAQUS 有限元框架内，建（构）筑物爆破拆除仿真模拟的基本方法。提出了爆破缺口高度的确定方法、结构坍塌的力学判据与结构的离散化方法，利用 ABAQUS 有限元软件的非线性瞬态显式动力学模块模拟结构的失稳及倒塌过程，并用该方法对一个拆除爆破实例进行了仿真模拟。模拟结果表明，结构的坍塌过程及爆堆形状与实际接近。

关 键 词：拆除爆破；仿真模拟；建（构）筑物；ABAQUS 有限元软件

中图分类号：O 383；TU 751.9 **文献标识码：**A

Numerical simulation for demolition of structures

JIA Yong-sheng[1,2], XIE Xian-qi[2], LI Xin-yu[3], LUO Qi-jun[2], LIU Jun[4]

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Wuhan Blasting Engineering Corporation, Wuhan 430023, China;
3.College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;
4. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A technique for simulating the process of structures collapse under demolition blast was developed in the frame of ABAQUS finite element software. The choice methods of the height of cut, the mechanical criterion and the discretization of structures were put forward for demolition blast. The instability and collapse of structures were simulated using the nonlinear transient explicit dynamics module of ABAQUS. The technique described in this paper has been used to simulate the process of a practical demolition blast. The results of simulation show that the process of structure collapse and the shape of muck pile from simulation are similar to the practical one.

Key words: demolition blast; simulation; structures; ABAQUS

1 引 言

拆除爆破是在二次大战后兴起的新行业，主要用来清除战争遗留的废、旧、危建筑物。在和平时期，随着城市高层建（构）筑物改、扩建工程中对旧建筑物拆除的任务日趋繁重，这种快速、高效的拆除方法日益受到人们的重视。在我国，随着国民经济的快速发展，大量的废旧建筑物需要拆除以适应社会发展的新要求。控制爆破在城市高层建筑物和高耸构筑物拆除中占有极为重要的地位。由于城市高层建（构）筑物一般处于人口密集、建筑物相对集中的闹市地段或者处于厂房或其他建筑物内部等复杂环境下，因此，对拆除爆破技术的要求越来越高[1,2]。目前，对建（构）筑物结构特征的拆除原理的研究并不深入，拆除爆破是一个复杂的力学过程，其理论研究集中体现了岩土力学、爆炸力学、结构动力学等多学科的交叉与融合。迄今为止，理论研究主要局限于针对其中的某个现象进行定性分析，实际工程中往往靠爆破工程师的实践经验进行设计[3,4]，其依据主要以经验公式及实际拆除爆破施工经验为基础，难以通过理论分析选取参数，具有这种较高的专业知识和丰富的实践经验的工程师人数满足不了实际需要，这就造成了拆除爆破施工的不确定性及高风险性，施工中异常现象频频发生：如拆除物危立不倒、爆破碎石乱飞、甚至出现建筑物反向倾倒，一些爆破事故引起人员伤亡并对周围建筑造成重大损害。产生这些后果的主要原因是目前对拆除爆破力学机制缺乏明确认识，依靠经验进

收稿日期：2007-03-26
作者简介：贾永胜，男，1970 年生，博士研究生，教授级高级工程师，主要从事工程爆破的研究与实践工作。E-mail: jason03566@163.com

行的爆破设计在工程实践中都具有局限性。因而，对拆除爆破力学机制的研究尽管举步维艰，但至关重要。

本文在 ABAQUS 有限元软件的框架内，对拆除爆破从理论上进行了深入研究，并针对具体拆除爆破工程进行了仿真模拟，模拟结果和实际结果基本一致，因而本文的研究成果可以为拆除爆破的工程实践提供参考。

2 模拟方法

2.1 爆破模型

楼房拆除爆破的基本原理是利用炸药爆炸释放的能量破坏楼房关键承重部位的强度，使之失去承载能力，然后在自重的作用下失去整体的稳定性而倒塌，在与地面的碰撞中，使楼房的结构进一步解体和破坏[1]。为便于研究，选择砖砌楼房承重墙体为研究对象，模型见图 1。

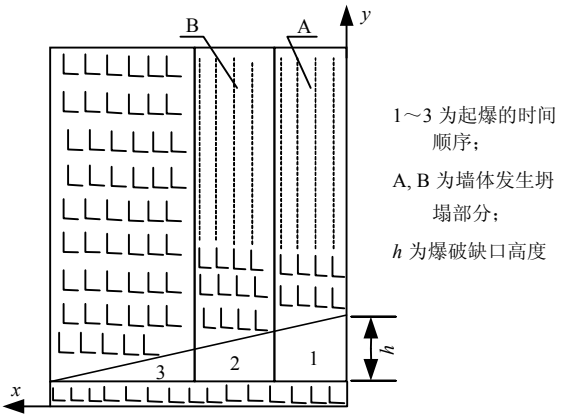


图 1 楼房拆除爆破坍塌模型
Fig.1 The sketch of structure collapse in demolition blast

当 A 部分缺口内的承重墙体被爆破后，满足一定的力学条件时，A 部分墙体与 B 部分之间会发生剪切破坏，即楼房并不是做整体转动，在转动中及与地面碰撞前，由于楼房各部分失去承载能力的时间不同，楼房的各部分之间已经产生了破坏。

2.2 爆破缺口高度的确定

关于缺口高度目前主要凭经验确定。文献[3]从能量观点出发给出了一种计算方法，考虑 1.5 的安全系数，则砖砌楼房爆破缺口的计算公式为

$$h_{\min} = 0.75H_1 - 0.75\sqrt{H_1^2 - 2.72Lb_1} \qquad (1)$$

式中：H_1 为缺口所在楼层的高度；L 为楼房的宽度；b_1 为墙体的厚度。

2.3 剪切坍塌的力学判据

当墙体的缺口部位被爆破形成时，缺口内所有的柱、阻止墙体下塌的构件均被爆破破坏，上部墙体发生较小位移时，不会有其他阻力存在。将楼房的每一面墙作为一个整体进行力学分析，上部墙体形成弯矩引起剪切面上拉应力产生，拉应力的存在减小了墙体的强度，有助于墙体沿该面发生剪切破坏，因此，不考虑弯矩影响情况下建立的剪切坍塌力学判据是趋于安全的。基于以上分析，发生坍塌部分的墙体受力情况见图 2。图中 W 为每层楼板的重力；H 为楼高； q 为楼板作用在墙体单位长度的力， L_0 为楼板的跨度； F_Z 为剪切坍塌体自重重力。

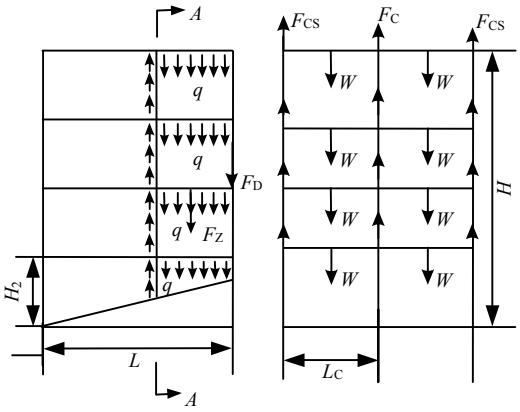


图 2 墙体受力分析图
Fig.2 The sketch of forces of structure wall

可以假定楼板的重量在承重墙上是均匀分布的，那么发生剪切坍塌的力学判据为

$$F_Z + F_C + F_D \geqslant \tau S \qquad (2)$$

式中：F_C 为楼板作用在剪切坍塌部分上的力；F_D 为非承重墙体的重量，通过楼板作用于承重墙上；S 为剪切面面积；τ 为墙的抗剪强度。

墙体的剪切面可以认为是一个垂直面，剪切面的强度受砖缝中的砂浆及砖体影响，不同砌筑方式的墙体垂直面上砂浆与砖体所占的比例不同，即墙体垂直面上的剪切强度与砌筑方式有关。坍塌体下部的缺口部位的形成具有同时性，上部墙体的剪切力是在瞬间产生的，具有准动态性，因此不适用静态的强度准则。必须对静态强度准则进行修正。剪切面的剪切强度可以用下式近似计算：

$$\tau = k_d[k_s\tau_s + (1-k_s)\tau_Z] \qquad (3)$$

式中：k_d 为动载荷强度提高系数，一般取 1.4；k_s 为剪切面上砂浆所占比重，与墙体的砌筑方式有关；τ_Z 为砖的剪切强度；τ_s 为砂浆的剪切强度。文献[4]

给出了砂浆抗剪强度的计算式：

$$\tau_s = \frac{3R_s}{14 + R_s} \qquad (4)$$

式中：R_s 为砂浆抗压强度。

2.4　建(构)筑物离散方法

将建(构)筑物简化为杆系结构，并运用矩阵位移法计算其结构内力。杆系结构是由若干个单根杆件相互联结而成的，所以节点与单元的划分比较自然。一般到杆件联结点为节点，每根杆件就取为一个单元。刚架的载荷可以作用在刚结点上，也可以作用在刚结点之间的杆件上。在划分节点单元时，可以只取刚结点为节点，取刚结点之间的杆件单元。另外，还可以把集中力、集中力偶矩作用点和分布载荷的分界点也取为节点，把任何两个节点之间的杆段取为单元。

3　结构倒塌过程的模拟

利用 ABAQUS/Explicit 模拟结构倒塌过程，主要有两类方案：一是从材料破坏的全过程入手，模拟结构局部破坏断裂到结构解体倒塌的局部和全局过程；二是从结构的失稳分析开始，找到结构转变为机构的关键部位，利用块体运动理论分析模拟结构的倒塌过程。

对于第 1 种方案，需要非常巨大的资源，要求在超级计算机上进行模拟。第 2 种方案国内的贾金河等作过平面问题的模拟工作[5]，所用资源相对就少得多，贾金河等的工作主要集中在平面问题上，而笔者主要在空间上进行数值模拟计算工作。

数值模拟针对的实际工程为武汉市外滩花园 1# 楼中的一个片段，也就是图 3 中 3-3 断面的一跨结构。该楼为框架结构，共 3 个单元，长 86.0 m，宽 29.1 m，最高标高为 31.70 m，平均标高为 28.7 m。楼房共有承重立柱 102 根，断面尺寸为 400 mm×400 mm，450 mm×450 mm，400 mm×500 mm 和 500 mm×500 mm 等 4 种；立柱竖向钢筋大部分为 ϕ18 mm，ϕ20 mm，ϕ22 mm，数量为 18～40 根，箍筋为 ϕ10 mm，混凝土等级为 C35～C25；主梁大部分为 250 mm×500 mm，内外墙体为加气混凝土砌块；楼面均为现浇板，厚 0.10 m，单层布筋，钢筋为 ϕ10 mm；楼房有电梯间 3 个，其两根承重立柱为 400 mm×400 mm。

对于图 3 中 3-3 断面的一跨结构，将它用可变形的 255 块块体和 42 块板来进行倒塌模拟。结构的整体模型如图 4 所示。材料的弹性模量取为 28.6 GPa，泊松比为 0.15，摩擦角为 80°，模拟了结构爆破后在重力作用下的坠落倒塌过程。整个模拟过程历时为 4.5 s。1.5，2.5，4.5 s 时刻的结构倒塌构形见图 5～7，图 8 为实际结构爆破拆除后的照片。模拟的结果与实际结果的对比见表 1。从表 1 可以发现，数值模拟结果与实际结果基本一致。

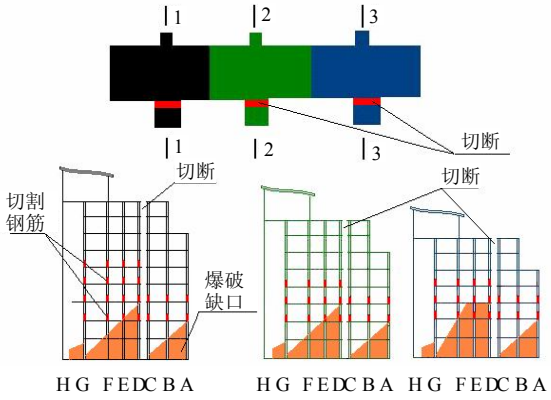


图 3　爆破方案示意图
Fig.3　The sketch of demolition blasting scheme

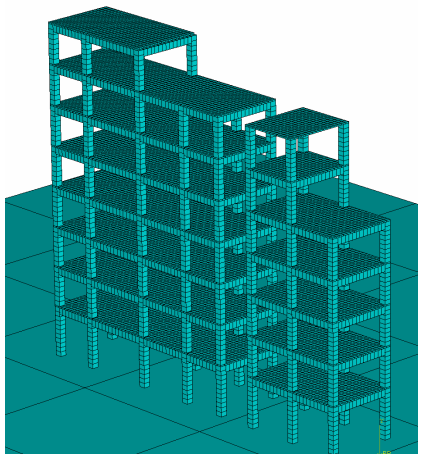


图 4　整体结构模型
Fig.4　The model of structure

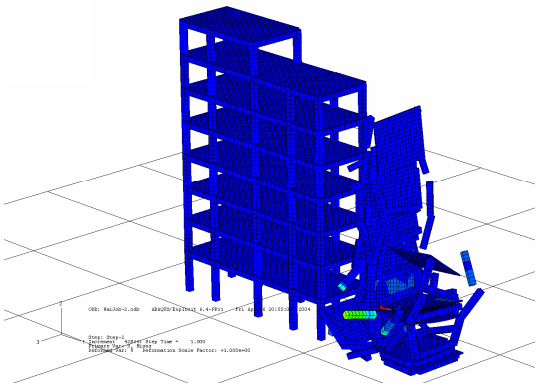


图 5　1.5 s 时的模拟结果
Fig.5　The configuration of structure at 1.5 second in simulation

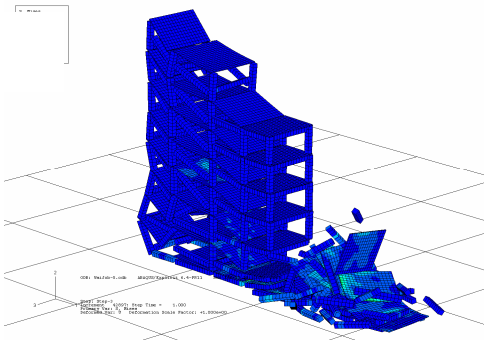


图 6 2.5 s 时的模拟结果
Fig.6 The configuration of structure at 2.5 second in simulation

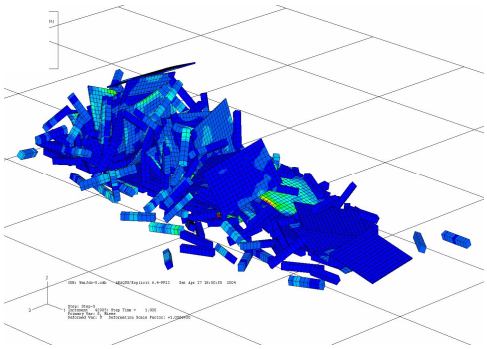


图 7 4.5 s 时的模拟结果
Fig.7 The configuration of structure at 4.5 second in simulation



图 8 实际爆破结果
Fig.8 The resultant practical configuration of demolition blast

表 1 模拟结果与实际结果比较
Table 1 Comparison of results from practice and simulation

结果	持续时间 / s	爆堆高度 / m	爆堆最远点 / m
实际	6.0	10.0	44.0
模拟	5.8	9.0	42.0

4 结 语

建(构)筑物的爆破拆除倒塌本质上是一个从连续体到离散的体变化过程，同时也可以看作一个几何不变体系转换为几何可变体系的过程，其力学机制的分析模拟是一个高度复杂的过程。本文在有 ABAQUS 限元软件框架内，对爆破拆除倒塌的模式和结构体的倒塌过程进行了分析，模拟结果和实际结果基本一致，因而该方法可以为拆除爆破的工程设计提供参考。

参 考 文 献

[1] 贾永胜. 建(构)筑物爆破拆除力学模型及数值计算[硕士学位论文 D]. 武汉: 武汉科技大学, 2004.

[2] 高金石, 张奇. 爆破理论与爆破优化[M]. 西安: 西安地图出版社, 1993.

[3] 张奇. 筒形建筑物爆破拆除的失稳原理及其参数分析[J]. 爆炸与冲击, 1998, (4): 168－172.
ZHANG Qi. Destability principle and parameter analysis of blasting demolition of tube-shaped structure[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1998, (4): 168－172.

[4] 潘国斌, 张双计, 李成志. 拆除爆破与特种爆破[M]. 西安: 西安地图出版社, 1997.

[5] 贾金河. 爆破拆除框架结构建筑物的力学模型及数值模拟研究[博士学位论文 D]. 北京: 北京科技大学, 2000.

书 讯

路基路面工程(21 世纪高等教育土木工程系列规划教材)

机工版/建筑科学类/包惠明、曹晓岩主编/16 开/632 千字/508 页/估价:39.00 元/2007 年 9 月出版/ISBN:978-7-111-22085-5

本书共 17 章，以当前我国最新的有关公路和城市道路的工程技术标准、规范为依据，着重于系统阐明路基路面工程的基本概念、基本技术理论和基本方法，并尽可能地融入这一领域的新技术、新理论和新进展。

读者对象：土木工程及其相关专业师生，城市地下与隧道工程、岩土工程、道路工程、水利水电工程和工程技术人员等。

（摘自 新华书目报·科技新书目）