

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.01.010

基于 MAT96 本构模型的钢筋混凝土结构 爆破拆除数值模拟*

李 清 杨 阳 杨仁树 张 迪 王茂源

中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院(北京,100083)

[摘 要] 采用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA,分析了基于 MAT96 本构模型的钢筋混凝土结构爆破拆除过程。混凝土实体单元的单轴压缩模拟试验表明,材料的峰值抗拉强度为 2.4 MPa,抗压强度为 30.0 MPa,无围压压缩强度约为拉伸强度的 12 倍;在三轴压缩模拟试验中,随着围压升高,混凝土的抗压强度显著增加、变形显著增大,其模拟结果与真实混凝土试验相近。基于 MAT96 本构关系的混凝土试件在拉伸模拟试验中呈现的是混凝土的劈裂破坏,而压缩呈现的是对角线破坏,类似于混凝土材料实验室破坏模式,验证了 MAT96 材料本构关系与混凝土吻合较好。结合整体式建模模拟钢筋混凝土结构爆破拆除倒塌过程,基于计算结果,分析了建筑物在倒塌过程中的前冲、后坐、鼓胀等问题,并对整个倒塌过程做出了定量描述。通过与工程实践相对比,得知模拟结果较符合实际情况,对钢筋混凝土结构建筑物的拆除爆破工程具有指导意义。

[关键词] 爆炸力学;爆破拆除;数值模拟;钢筋混凝土结构;MAT96

[分类号] TU746.5;TD235.37

引言

最近的统计资料显示高楼拆除越来越集中于城市人口密集区,这就对爆破拆除的精确性、安全性和可控性提出了更高的要求^[1],然而拆除爆破比一般的爆破技术复杂得多,除了要遵循普通爆轰机理、介质破坏机理外,还要分析结构倒塌机制、倒塌过程中复杂的动力学原理以及各种有害效应产生的原因和控制措施,要想在理论上把这些因素完全分析清楚是非常困难的,但科研工作者们在工程实践和理论研究过程中发现,如果能在爆破前通过计算机仿真的方法模拟建(构)筑物的倒塌过程,并给出建(构)筑物倒塌数据的定量范围,将对爆破工程的实施有重要的指导意义^[2]。

本文以丽江市古城区抗震大楼爆破拆除工程为例,利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 在已经过论证的本构模型基础上对大楼进行有限元计算,重现大楼模拟倒塌过程,并给出相关重要指标的定量描述,有助于在爆破实施前对建筑物倒塌进行预测^[3-6]。

1 混凝土 MAT96 本构模型

在 LS-DYNA971 最新版本中新添了一些用来描述混凝土的本构模型,MAT96 就是其中比较具有针

对性的一款,在其参数定义中有配筋率选项,可更加贴切地描述钢筋混凝土材料,得到较为准确的数值解析^[7-8]。

1.1 混凝土力学性质测试

为了验证材料本构在力学模型和数学模型计算方面的准确性,决定在 ANSYS/LS-DYNA 中对 MAT96 定义的单个单元进行测试,同时用来验证混凝土模型在程序中的适用性和选定部分材料参数。测试的单个单元尺寸均为 40 mm 的立方体,丽江市古城区抗震大楼混凝土等级强度为 C30,无围压压缩强度为 30 MPa,测试的内容为单轴和三轴压缩,计算后为了便于分析测试结果,在 LS-PREPOST 中绘制基本的应力-应变曲线。

由图 1 可知,材料峰值抗拉强度为 2.4 MPa,抗压强度为 30.0 MPa,无围压压缩强度约为拉伸强度的 10 倍左右,此峰值抗拉、抗压强度也作为接下来古城区抗震大楼的材料参数,试件在压力作用下出现破坏,承载能力下降,但并没有降到零,仍然具有一定的残余强度。

图 2 为有围压的压缩曲线,在 LS-DYNA 的 K 文件中设定侧向围压维持一个常数不变。从图 2 中可以看见,模型在有围压的条件下进行压缩,其强度

* 收稿日期:2014-04-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374212)

作者简介:李清(1969~),男,教授,博导,主要从事材料动力学和工程爆破技术的研究。E-mail:liq@cumt.edu.cn

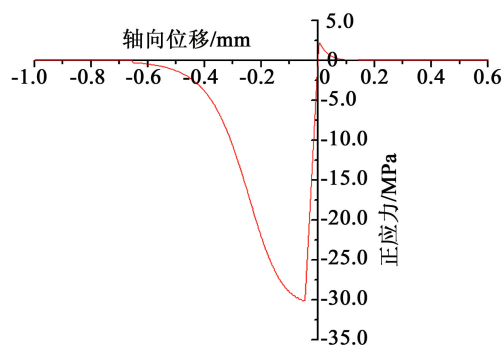


图 1 无围压单元的轴向变形与正应力曲线

Fig. 1 Axial deformation and normal stress curve of unit without confining pressure

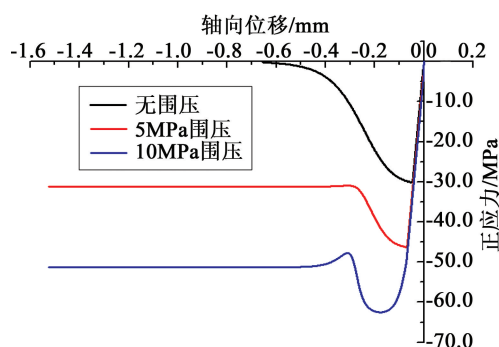


图 2 有围压单元的轴向变形与正应力曲线

Fig. 2 Axial deformation and normal stress curve of unit with confining pressure

和延展性都会随之变大,破坏前材料的应变随围压的增大而增加,同时随着围压的增大,材料的抗压强度显著增加,变形显著增大,弹性极限也显著增大。由于围压的改变,材料的应力-应变曲线形态发生明显改变,其性质也发生了变化,由弹脆性转化为弹塑性,这些都与常规实验结果保持一致。

由以上的分析结果可知,用 MAT96 定义的单个单元的应力-应变曲线在不同加载条件下模拟得出的结果符合典型试验,证明 MAT96 在 LS-DYNA 混凝土模拟中具有良好适用性。

1.2 混凝土材料力学行为模拟

为了进一步验证材料本构在整体模型中的执行情况,决定建立混凝土试件模型,用以显示混凝土构件破坏的基本情况。用于模拟试验的试件为直径 150 mm、长度 300 mm 的圆柱体。模拟时以对构件端部施加速度的方式对试件进行直接拉伸和无围压的压缩,但在实际模拟中是运用位移控制加载^[9]。鉴于试件及加载的对称性,同时为了方便划分网格,所建立的模型均为 1/2 模型(图 3 和图 4)。

采用 MAT96 定义的混凝土模型试件成功地模拟拉伸、压缩试验:试件在准静态荷载下加载时,拉伸显示的为混凝土的劈裂,而压缩显示的对角线

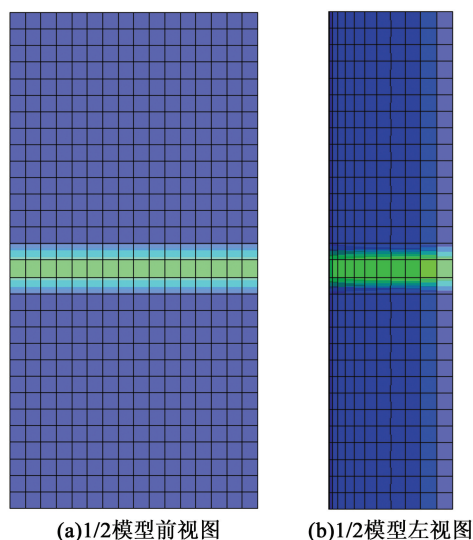
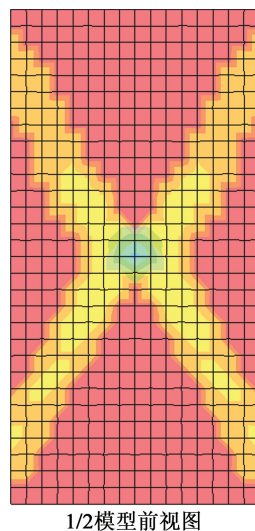


图 3 拉伸破坏前有效应变图

Fig. 3 Effective strain fringe of concrete element before tension failure



1/2模型前视图

图 4 无围压压缩破坏前有效应变图

Fig. 4 Effective strain fringe of concrete element before failure 破坏,这与典型试验结果相一致,证明 MAT96 材料本构模型能较好地模拟混凝土。

2 钢筋混凝土结构有限元模型

2.1 爆破拆除方案

爆破拆除对象丽江古城区抗震大楼为 15 层框架结构建筑物,高 57.7 m,东西长 28.0 m,南北宽 24.4 m。

该爆破工程旨在对建筑物使用单向折叠倾倒爆破方案,大楼分为 3 个爆区,具体策划施工方案如图 5 所示,按第 1、第 2、第 3 爆区一次性起爆,间隔时间为 0.5 s。

2.2 三维实体模型

ANSYS/LS-DYNA 适用于模拟大变形及非线性问题,本文利用 ANSYS/LS-DYNA 建模计算,

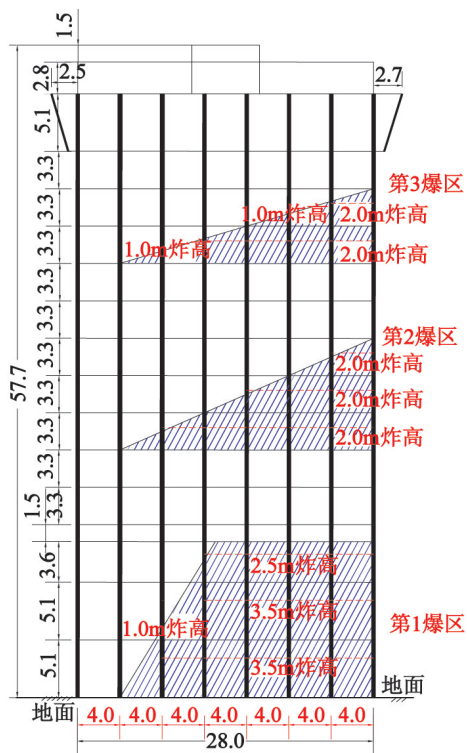


图5 爆破切口示意图(单位:m)

Fig. 5 Schematic drawing of blasting cut(unit:m)

SOLID164 用于模拟大楼的梁柱等实体单元, SHELL 用来模拟地面楼层等壳单元, 六面体映射网格划分, 材料本构关系沿用已经过充分论证的 MAT96。因大楼第 15 层圆盘结构在施工中已提前人工拆除, 故本有限元模型显示的为 14 层大楼形态, 与实际爆破工程相一致, 有限元模型如图 6 所示。



图6 大楼有限元模型

Fig. 6 Finite element model of the building

3 数值模拟结果及分析

3.1 倒塌过程模拟

建筑物的模拟倒塌过程如图 7 所示, 通过模拟可以将倒塌过程分为爆破切口形成阶段、大偏心受压阶段、冲击触地阶段、折叠坍塌阶段。

爆破切口形成后, 支承部在大偏心受压下发生脆性破坏, 形成“塑性铰”, 倾倒地矩大于支承构件抵抗力矩, 支持力矩第 3 层和第 4 层处产生应力集中现象首先发生破坏, 随后第 1、第 2、第 3 层立柱逐渐被“压倒”, 上部结构下落, 在此过程中第 2 爆区

和第 3 爆区的切口依次形成, 上部结构体逐次折叠坍塌落在有限范围内, 整个过程上部结构的运动状态可分为围绕“塑性铰”的转动、平移和下落折叠^[10]。

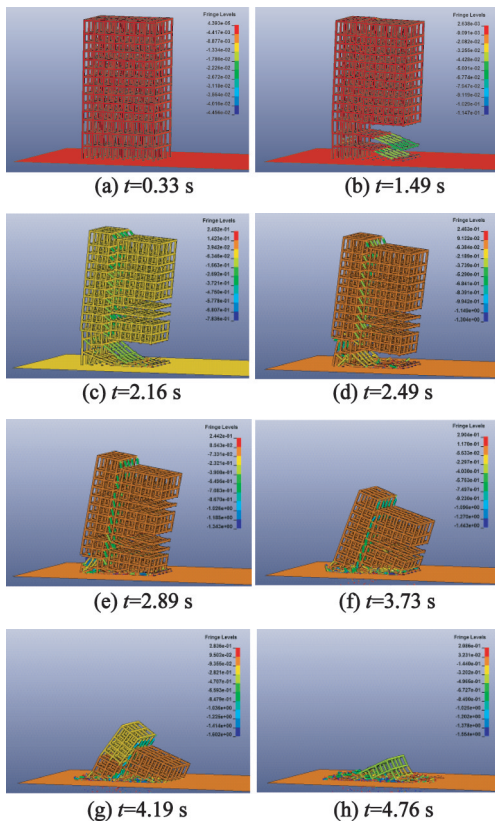


图7 大楼倒塌过程

Fig. 7 Process of building collapse

3.2 模拟结果分析

大楼倒塌整个模拟过程为 5.25 s, 初期建筑物呈微倾斜状态, 加速度比较小, 整体主要处于塑性铰形成阶段; 其后运动速度加快, 切口范围内结构体处于快速变形和倾倒地阶段, 整个建筑物在变形倾倒地及碰撞过程中逐渐解体; 最后结构体各个部分陆续触地, 运动速度骤降, 建筑物及结构体与地面剧烈碰撞, 整体呈破碎状。为对大楼整个倒塌过程给出定性分析, 对大楼顶部单元合成速度进行提取做图, 如图 8 所示。

图 9 为大楼第 1 爆区切口顶部 A 2 342 单元 Z 轴位移图。通过第 1 爆区切口顶部单元 Z 轴位移图可以看出, 在三维模型中钢筋混凝土结构在倒塌过程中的后坐最多为 3.75 m, 实际爆破工程实施后现场测量的结果为 3.50 m, 两者之间误差控制在可以接受的范围内。

图 10 为大楼西侧顶部单元 Z 轴位移图, 它表示的是大楼向西侧的前冲。根据模拟结果显示大楼在模拟倒塌过程中前冲 15 m, 而在实际爆破工程实施后经测量前冲为 16 m, 由此可见, 模拟结果也能较

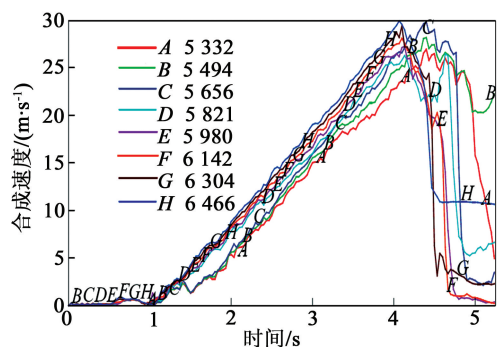


图 8 顶层部分单元运动速度图

Fig. 8 Diagram of the building top unit synthesis speed curve

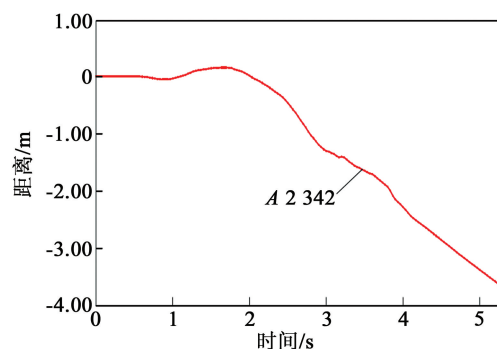


图 9 第 1 爆区切口顶部单元 Z 轴位移图

Fig. 9 Displacement of the first blasting area cut top unit Z axis

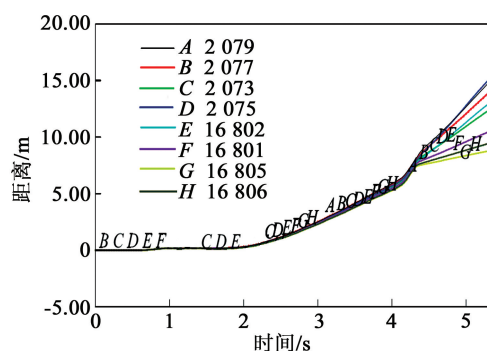


图 10 大楼西侧顶部单元 Z 轴位移图

Fig. 10 Displacement of the west building top unit Z axis

好地与实际效果吻合。

图 11 为大楼南侧单元 X 轴位移图,它显示的是模拟大楼爆堆形成后的南北向坍塌范围,数值模拟单元在 X 轴上最大位移为 1.37 m,即鼓胀的最大位移为 1.37 m,实际鼓胀范围控制在 1.60 m 左右,对周边建筑物无影响。

4 结论

1) 采用 MAT96 定义的单个单元应力-应变曲线在不同加载条件下模拟得出的结果符合典型试验。单轴压缩模拟试验,单个单元的材料峰值抗拉强度为 2.4 MPa,抗压强度为 30.0 MPa,这与 C30 混

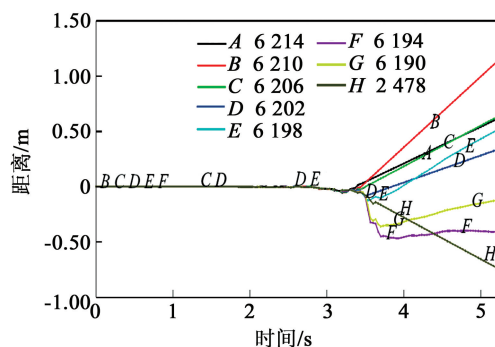


图 11 大楼南侧单元 X 轴位移图

Fig. 11 Displacement of the south building unit X axis

凝土模拟参数设定相一致,无围压压缩强度约为拉伸强度的 12 倍;三轴压缩模拟试验,随着围压升高,混凝土的抗压强度、应变、弹性极限也随着增大,变形显著增加,结果与经典试验相一致,说明 MAT96 对模拟对象有良好的适用性。

2) 采用 MAT96 定义的混凝土圆柱形试件成功地模拟拉伸、压缩试验;混凝土圆柱体试件在准静态荷载下加载时,拉伸显示的为混凝土的劈裂,而压缩显示的为对角线破坏,这与典型试验结果相一致,证明 MAT96 材料本构模型能较好地模拟混凝土。

3) 对于钢筋混凝土结构的模拟采用 MAT96 本构和整体式建模,能够有效地描述建(构)筑物在倒塌过程中的力学特征及响应,其模拟结果与实际效果极为接近,可为类似工程及其数值模拟提供参考。

参 考 文 献

- [1] 言志信,刘培林,叶振辉. 框架剪力墙结构的定向爆破倒塌过程[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(6): 647-652.
Yan Zhixin, Liu Peilin, Ye Zhenhui. Directional blasting collapse process of frame-shear wall structure[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(6): 647-652.
- [2] 李承,顾祥林,陈建兵. 钢筋混凝土框架结构拆除爆破计算机仿真及存在的问题[J]. 工程力学, 1999(增刊): 361-366.
- [3] 冯叔瑜,吕毅,杨杰昌,等. 城市控制爆破[M]. 2 版. 北京:中国铁道出版社, 1985.
- [4] 贾永胜,谢先启,李欣宇,等. 建(构)筑物控制爆破拆除的仿真模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 285-288.
Jia Yongsheng, Xie Xianqi, Li Xinyu, et al. Numerical simulation for demolition of structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 285-288.
- [5] 陈宝心,邓籽,钱虎. ANSYS 模拟框架结构楼房逐段解体爆破拆除[J]. 爆破, 2004, 21(3): 5-7, 20.
Chen Baoxin, Deng Zi, Qian Hu. ANSYS simulation of the blasting process by gradual disintegration[J]. Blas-

- ting, 2004, 21(3):5-7, 20.
- [6] 杨国梁, 杨军, 姜琳琳. 框-筒结构建筑物的折叠爆破拆除[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(4):380-384.
Yang Guoliang, Yang Jun, Jiang Linlin. Numerical simulations on fold blasting demolition of frame-tube structures[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(4): 380-384.
- [7] 刘伟. 建筑物爆破拆除有限元分析与仿真[D]. 武汉:武汉理工大学, 2006.
Liu Wei. Finite element analysis and simulation of buildings blasting demolition [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2006.
- [8] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994.
Jiang Jianjing. Collected in works contemporary civil and architectural science and technology [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1994.
- [9] 李胜林, 王宇涛, 黄明升, 等. 单榀钢混框架结构内爆法拆除模拟[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(4): 354-357, 385.
Li Shenglin, Wang Yutao, Huang Mingsheng, et al. Numerical simulation of single concrete framework implosion demolition[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(4): 354-357, 385.
- [10] 余德运, 杨军, 陈大勇, 等. 基于分离式共结点模型的钢筋混凝土结构爆破拆除数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(4):349-354.
Yu Deyun, Yang Jun, Chen Dayong, et al. Numerical simulation of reinforced concrete structure based on separate element and common node model [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(4): 349-354.

The Numerical Simulation of Reinforced Concrete Structure Blasting Based on MAT96 Constitutive Model

LI Qing, YANG Yang, YANG Renshu, ZHANG Di, WANG Maoyuan

School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing, 100083)

[ABSTRACT] The process of blasting demolition of reinforced concrete structures based on MAT96 constitutive model was analyzed by finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA. The simulation of uniaxial compression test of concrete solid elements show that the peak tensile strength is 2.4 MPa, the compressive strength is 30.0 MPa, and the unconfined compression strength is about 12 times as much as the tensile strength. In the triaxial compression simulation experiments, along with the confining pressure increases, the compressive strength and deformation increase significantly, similar to the real concrete simulation experiment results. With the MAT96 constitutive relation, concrete specimen in tensile simulation experiments presented the cleavage cracking of concrete, the diagonal is presented in the compression damage, similar to the failure mode of concrete material in the lab, which verifies that the MAT96 materials are in good agreement with the concrete constitutive relations. It simulated the collapse of reinforced concrete structures blasting combined integral model based on the calculation results, analyzed the pediment, recoil, bloating and other issues of building collapse, and made a quantitative description of the entire collapse process. Compared with engineering practice, the simulation result is consistent with the actual situation, which is meaningful to reinforced concrete structure building demolition.

[KEY WORDS] mechanics of explosion; molitionblasting; numerical simulation; reinforced concrete; MAT96

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部