

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.017

22层框架楼房定向爆破拆除倒塌过程分析*

叶海旺^{1,2}, 李庆¹, 郑长青³, 戴霖⁴, 郑宗祺³, DAHE Monyegni Ghislain¹

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 武汉 430070;
3. 珠海爆破新技术开发有限公司, 珠海 519000; 4. 惠州中特特种爆破技术工程有限公司, 惠州 516000)

摘要: 河源市龙川县远东花园4号楼为22层框架结构楼房,系违章建筑需爆破拆除。紧挨楼房5 m处有一栋3层别墅,别墅的围墙与待拆除楼房只有0.5 m,需防止楼房产生后座。根据周围环境条件,采用定向倾倒的方式爆破拆除,采用梯形爆破缺口,爆破高度13.5 m。为确定最佳延期时间,用ANSYS/LS-DYNA对排间延期时间300 ms、500 ms和800 ms三种方案进行了模拟,根据模拟结果,确定最佳延期时间为300 ms。起爆时,利用多台高级数码相机、无人机、高清摄像机等从不同方位和角度抓拍了楼房爆破运动及解体的全过程。通过数值模拟与爆破实际对比分析,发现二者在楼房倒塌姿态、观测点的运动轨迹、解体程度、爆堆形态和堆积范围都十分接近,数值模拟的结果的准确性和可靠性满足工程要求。

关键词: 爆破拆除; 框架结构; 定向倾倒; 摄影分析; LS-DYNA

中图分类号: TU746.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)02-0111-07

Analysis on Collapse Process of 22 Storey Frame Building Demolished by Directional Blasting

YE Hai-wang^{1,2}, LI Qing², ZHENG Chang-qing³, DAI Lin⁴,
ZHENG Zong-qi³, DAHE Monyegni Ghislain¹

(1. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan 430070, China; 3. Zhuhai New Technology Development of Blasting Co Ltd, Zhuhai 519000, China; 4. Huizhou Zhongte Special Blasting Technology Engineering Co Ltd, Huizhou 516000, China)

Abstract: The No. 4 Building of Yuandong Garden, Longchuan County, Heyuan City, a 22-story building with frame structure is an illegal building to be demolished by blasting. There is a three-story villa 5 m away from the building, whose fence is only 0.5 m away from the building. Therefore, it is necessary to prevent the building from generating backward sliding at bottom. According to the surrounding conditions, the directional collapse blasting demolition method was adopted, and the trapezoidal blasting cut with 13.5 in height was selected. In order to determine the best delay time, ANSYS/LS-DYNA was used to simulate the delay time of 300 ms, 500 ms and 800 ms, and the simulation results showed that 300 ms was the best one. During the detonation, multiple advanced digital cameras, drones camera, high-definition cameras, etc. were used to capture the entire process of building blasting movement and disintegration from different positions and angles. Comparing the numerical simulation and actual blasting results, it was found that they were very close to each other in collapse posture, movement track of observation point, degree of disintegration, shape and range of blasting pile. The accuracy and reliability of the numerical simulation results meet the engineering requirements.

Key words: blasting demolition; frame structure; directional collapse; photographic analysis; LS-DYNA

目前爆破拆除成为高大建(构)筑物拆除的首选方式,而城镇拆除爆破周围环境复杂,对施工安全、环保的要求的提高,给爆破拆除带来了新的挑战^[1,2]。爆破拆除的设计依赖于工程经验,为了优化爆破方案,提高爆破的安全性和可靠性,可采用数值模拟的方法对爆破方案进行优化。

崔正荣等为了确定原地坍塌爆破方案的最小爆破高度^[3],用 LS-DYNA 进行了模拟,确定了最佳的爆破高度,并用于工程实践,取得了较好的效果;蒙云琪等用 ANSYS/LS-DYNA 对原地倒塌略前倾和单向折叠倒塌两种方案进行了模拟分析^[4],并对爆破方案的参数就进行了优化,确定了最佳的爆破方案;张建华等用 ANSYS/LS-DYNA 对冷却塔爆破拆除的传统爆破技术和小缺口爆破技术进行了模拟^[5],对比分析了倒塌范围和触地震动,发现小缺口爆破技术优于传统爆破技术。

尽管很多学者对爆破拆除的数值模拟做了很多工作,但是,对于判断数值模拟结果与真实情况是否相符,大多是进行爆堆参数对比,对于倒塌过程的分析很少,而倒塌过程的运动参数对于研究倒塌机理具有重要意义。部分学者采用摄影技术来获取建筑物的运动参数,崔晓荣使用近景摄影测量技术对建筑物的倒塌过程进行测量分析^[6],通过图像分析和数据处理获得倒塌过程的动力学参数,测量精度满足工程要求。郑长青等使用高级数码相机从不同角度对钢筋混凝土烟囱的倒塌过程拍摄了数百张照片^[7],从转角、角速度、角加速度等物理量定量分析了烟囱倒塌过程的运动状态。

首先用 ANSYS/LS-DYNA 对不用延期时间的爆破方案进行了模拟,确定了最佳的延期时间,并用于工程实践,通过近景摄影,获取建筑物的运动参数,对比分析模拟结果与实际的运动轨迹、爆堆范围等参数,证明了模拟结果是真实可靠的。

1 工程概况

1.1 基本情况

龙川县麻布岗镇远东花园第四栋建筑物系违章

建筑,存在安全隐患,需进行爆破拆除。待拆除楼房为22层钢筋混凝土框架结构,总建筑面积16998 m²。主楼长26.6 m,宽25 m,高71.2 m,地下室2层,地面20层,1楼高3.4 m,2楼高3.2 m,3楼高5.0 m,4楼高3.8 m,5~22楼每层高3.1 m。紧挨着高层楼房有一4层的裙楼,长32 m,宽25 m,高15.4 m。

1.2 环境特点

待拆除楼房东面65 m处为一层平顶铁皮房,南面5 m处有一栋3层楼别墅,35 m处有一栋2层住宅,东南面30 m处有一栋4层住宅,42 m处有一栋16层高楼,西面与西北面68 m处有三栋教学楼,北面为空地,如图1所示,周围环境较复杂。

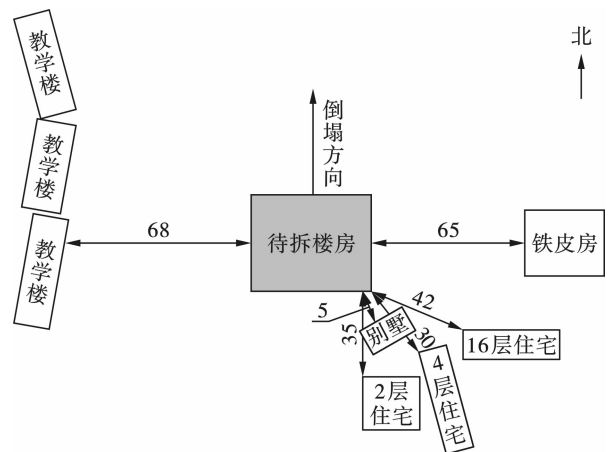


图1 周围环境示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of surroundings(unit:m)

1.3 结构特点

楼房为钢筋混凝土框架结构,南北方向为5排立柱,东西方向为4排立柱。承重柱有4种规格,截面尺寸为120 cm×60 cm、100 cm×60 cm、100 cm×40 cm和60 cm×60 cm,梁有2种规格,截面尺寸为85 cm×30 cm和70 cm×24 cm。1~4层保留西侧和南侧一跨裙楼,5~22层为H型结构,如图2所示。承重柱横截面钢筋分布如图3所示。

2 爆破方案

2.1 爆破定向倒塌方向的选择

考虑东面65 m处有需要保护的平房,南边距离5 m处有一栋别墅,西面68 m处有教学楼及需重点保护的农田,只有北边有足够定向倒塌的空地,根据周边环境对比确定,采用向北定向倒塌的爆破拆除方案。

收稿日期:2021-02-23

作者简介:叶海旺(1971-),男,副教授、博士,武汉理工大学资源与环境学院采矿系主任,从事采矿、爆破、安全等方面的教学和科研工作,(E-mail) yehaiwang@sina.com。

通讯作者:郑长青(1963-),男,教授级高级工程师、博士,中国爆破行业协会专家委员会副主任,从事爆破理论及爆破技术应用研究,(E-mail) zh-bp@163.com。

基金项目:湖北省安全生产科技专项资助项目(KJZX201907007)

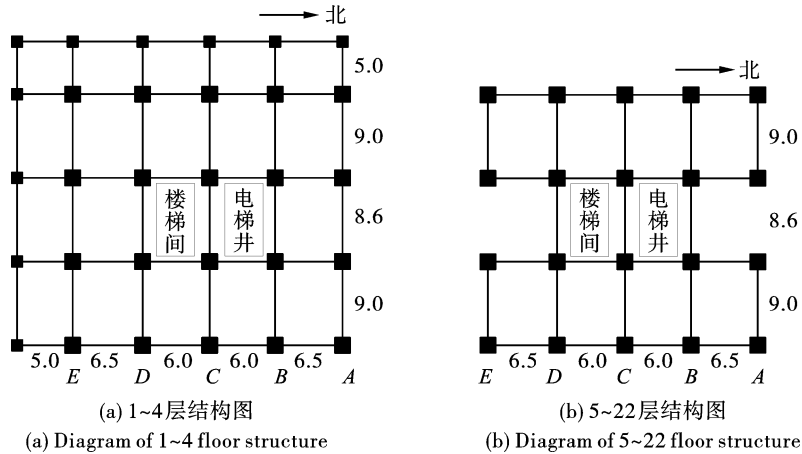


图2 结构平面图(单位:m)
Fig. 2 Planar graph of structure(unit:m)

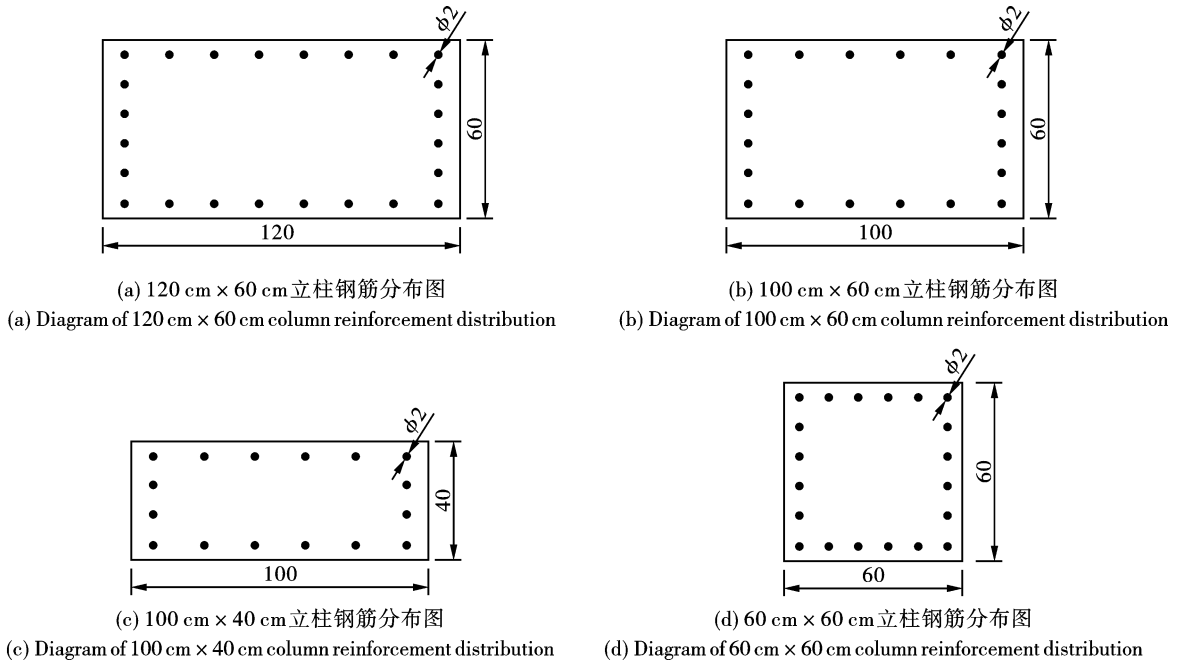


图3 立柱钢筋分布图(单位:cm)
Fig. 3 Diagram of column reinforcement(unit:cm)

2.2 爆破缺口

采用梯形爆破缺口,缺口高度 13.5 m,缺口倾角 36°。见图 4。

3 不同延期时间的数值模拟

3.1 建立模型

为了确定最佳的排间延期时间,采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对框架结构楼房的倒塌进行数值模拟,分析排间不同延期时间间隔对建筑物爆破拆除效果的影响,分别建立排间延期时间 300 ms、500 ms 和 800 ms 三种模型,模型进行了一定的简化处理。

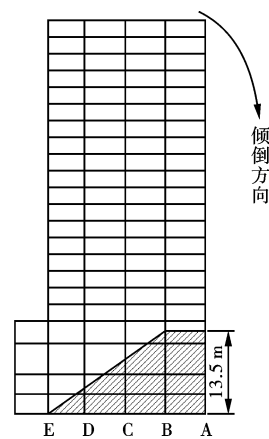


图4 爆破缺口示意图
Fig. 4 Schematic diagram of blasting incision

钢筋混凝土计算模型一般分为分离式、组合式和整体式。李清为了验证 LS-DYNA 中材料 MAT_BRITTLE_DAMAGE 的本构关系在模拟中的准确性^[8],对该材料定义的单个单元进行测试,发现其应力-应变曲线和破坏规律都与混凝土比较复合,并采用整体式建模模拟了建筑物的倒塌,模拟结果与实际接近。张明^[9]、李祥龙用同种材料采用整体式建模方法对建筑物的爆破拆除进行了数值模拟^[10],都取得了较好的效果。

本次采用整体式模型对钢筋混凝土结构进行建模,单元类型为 SOLID164,采用六面体网格划分,单

元数为 77794。楼房材料选用 * MAT_BRITTLE_DAMAGE,这种材料模型可以定义钢筋混凝土复合材料,可以设置钢筋和混凝土的各项参数和配筋率,主要参数如表 1。地面采用刚性材料 RIGID,接触方式为 AUTOMATIC_GENERAL 全局自动接触,摩擦系数为 0.5,对与地面接触的楼房立柱节点施加位移约束,使用关键字 * LOAD_GRAVITY_PART 给楼房施加重力,用关键字 * DEFINE_ELEMENT_DEATH_SOLID_SET 控制单元失效时间模拟爆破缺口的形成,添加关键字 * ADD_EROSION 模拟结构在触地时的解体。

表 1 钢筋混凝土材料参数

Table 1 Material parameter of reinforced concrete

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	拉伸极限/ MPa	配筋率	钢筋弹性 模量/GPa	屈服极限/ MPa	钢筋极限 应变
2550	30	0.2	2.5	1%	200	335	0.017

3.2 倒塌效果对比

分别采用 300 ms、500 ms 和 800 ms 排间延期时

间间隔对进行了模拟,模拟结果如图 5 所示,爆堆参数如表 2。

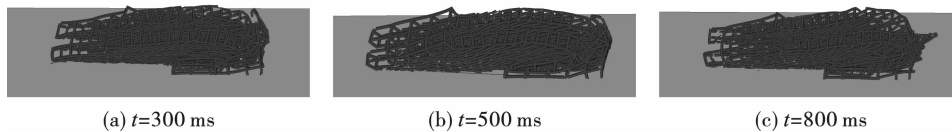


图 5 不同延期时间爆破效果对比

Fig. 5 Comparison of different delay time

表 2 不同延期时间爆堆尺寸

Table 2 Blasting muck pile size of different delay time

延期时间	爆堆长度/m	爆堆宽度/m	爆堆高度/m
300 ms	65.1	36.2	11.8
500 ms	67.1	35.6	10.2
800 ms	67.6	35.5	12.7

根据模拟结果,采用排间延期时间为 300 ms、500 ms 和 800 ms 的方案时,楼房倒塌过程中后方裙楼都产生了不同程度的后座,分别为 1.9 m、4.1 m、6.1 m。楼房可以按照设计向预期方向倾倒,在倒塌过程中充分解体,有利于减小触地震动。根据数值模拟结果,排间延期时间间隔时间为 300ms 的爆破方案最能满足实际需要,故本次爆破选择此方案。

4 结果分析

4.1 倾倒过程分析

为了精确观测楼房爆破倾倒过程中爆破缺口的形成、楼房运动姿态和运动轨迹、触地破坏等过程,

采用佳能 1DX、7D、5D 高级数码相机在不同位置连续抓拍了数百张照片,并用无人机在楼房上方、高清摄像机在西北侧同时拍摄视频,获得了大量科研数据。使用影像处理软件,对楼房倾倒过程进行分析。

根据现场拍摄的影像资料,楼房倒塌历时约 7.5 s,数值模拟楼房倒塌历时约 7.2 s,楼房的倒塌过程与实际倒塌过程基本一致,图 6 为实际倒塌过程与模拟倒塌过程对比。

4.2 运动轨迹分析

对于对称结构建筑物的定向倾倒爆破拆除,可以看作竖直方向和沿倾倒方向构成平面的二维运动。单机摄影时,摄影方向垂直于倾倒平面,正对建筑物可获得观测点二维坐标。双机、多机呈一定角度同步摄影可以解析三维空间坐标^[6]。

在与建筑物倾倒方向垂直倾倒平面摄影测量,摄影时保证摄影设备固定,拍摄照片间隔时间相等。在楼房侧面选取 3 个观测点如图 7 所示,通过连拍照片和图像处理软件分析不同时刻观测点位移变化。取倾倒方向为水平正方向,竖直向下为竖直正

方向。以导爆管产生起爆火花时刻为起爆时刻,每隔 0.2 s 记录一次观测点水平方向位移和竖直方向位移。在数值模拟后处理软件 Isprepost 中输出与观测点对应的节点的水平方向位移和竖直方向位移,与实际观测的位移进行对比,绘制时间位移图,如图 8。

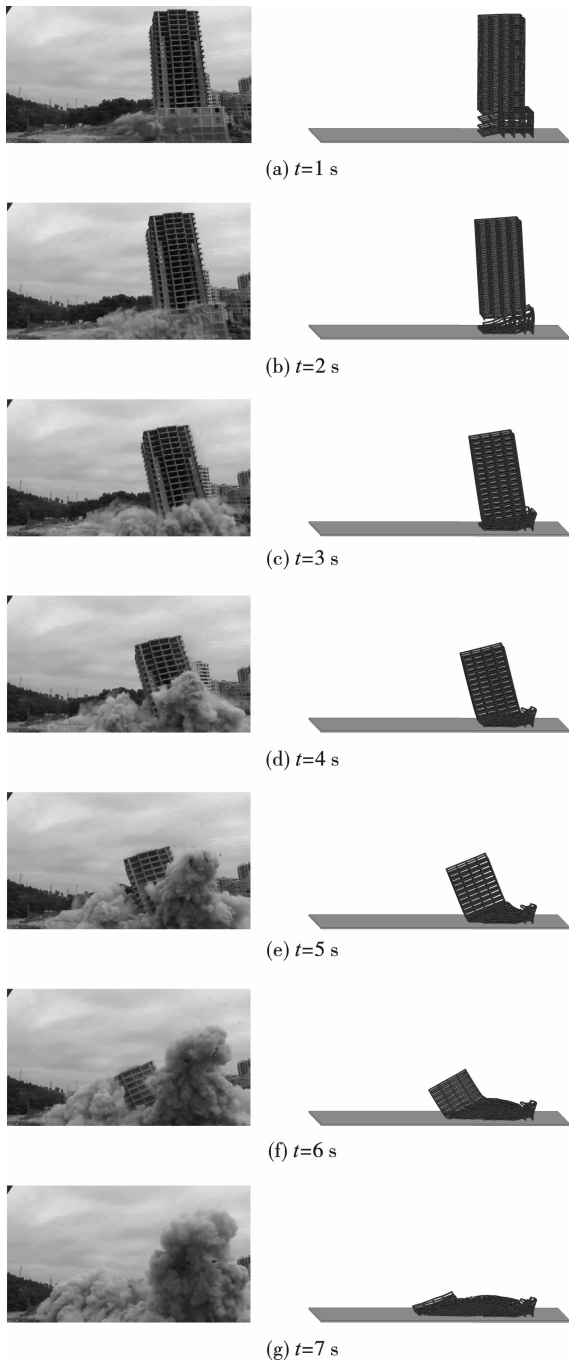


图 6 楼房倒塌过程

Fig. 6 Collapse of buildings

根据倒塌过程照片和观测点时间位移曲线,楼房倒塌主要分为爆破缺口形成、结构绕铰点转动、下座、向前倾倒、触地解体五个阶段。在爆破缺口和塑性铰形成后,结构发生偏转,下部支座发生破坏,上

部结构开始下座和后座,主楼后座距离 1.6 m,西面和南面一跨裙楼受主楼下座产生的拉力向内倾倒,3 s 时前跨触地,爆破缺口闭合,触地之后下部结构被压碎,结构继续下座,下座高度约为 19 m,随后结构向前倾倒,倾倒过程中下部结构触地时发生剪切破坏,直至倒塌结束。



图 7 位移观测点位置

Fig. 7 Position of displacement observation point

数值模拟倒塌过程和观测点运动轨迹与楼房实际倒塌过程和观测点运动轨迹十分接近,时程曲线中模拟位移与实际位移略有偏差的主要原因是进行图片处理时没有消除摄影倾斜误差,在远处观测点产生位移偏差,并且模拟结果与实际倒塌在倾倒时间上相差 0.3 s。

4.3 爆堆范围分析

从现场爆堆情况来看,楼房在触地时充分解体,并且基本没有产生后座,很好地保护了后方仅隔 5 m 的建筑物。模拟结果的爆堆形状与实际爆堆形状非常相似,爆堆如图 9 所示,实际爆堆与模拟爆堆尺寸对比如表 3。

表 3 实际效果与模拟效果对比

Table 3 Comparison of actual effect and simulation effect

	爆堆长度/m	爆堆宽度/m	爆堆高度/m
实际	66.0	35.1	9.8
模拟	67.1	35.6	10.2
绝对误差	1.1	0.5	0.4
相对误差/%	1.6	1.4	4.1

5 结论

通过对 22 层钢筋混凝土框架楼房定向爆破拆除不同排间延期时间的数值模拟和现场的摄影观测,对比分析倒塌过程、运动轨迹、解体程度、爆堆范围等,得出如下结论:

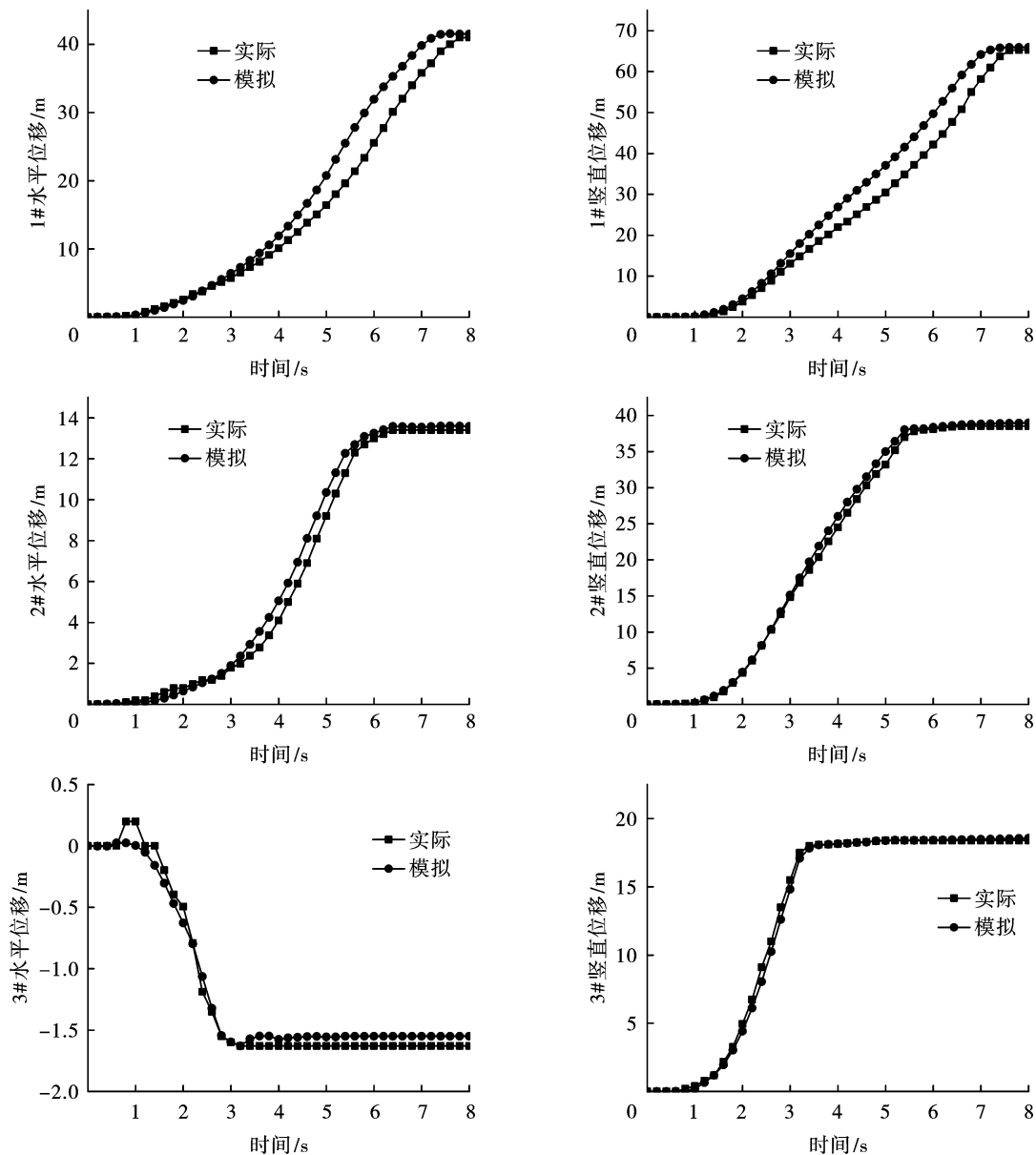


图8 观测点位移对比图

Fig. 8 Displacement comparison of observation points

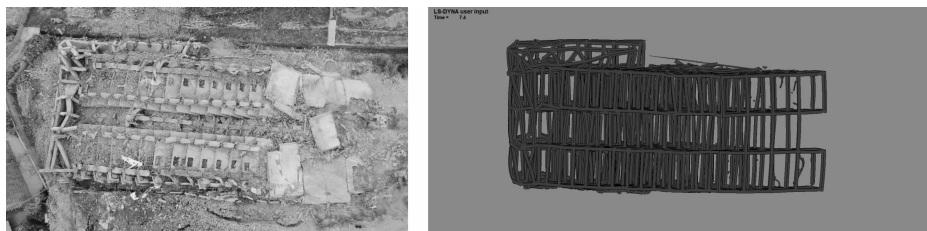


图9 爆堆对比图

Fig. 9 Comparison of blasting muck pile

(1) 采用 ANSYS/LS-DYNA 对排间延期时间分别为 300 ms、500 ms 和 800 ms 三种方案进行了数值模拟, 结果表明采用 300ms 延期时间时爆破效果最好。

(2) 通过摄影观察, 楼房采用定向倾倒的倒塌方式, 倒塌过程主要分为爆破缺口形成、结构绕铰点

转动、下座、向前倾倒、触地解体五个阶段。

(3) 利用影像设备, 获得了建筑物的运动参数, 并与模拟进行对比, 二者在倒塌姿态、观测点运动轨迹、解体情况、爆堆范围十分接近, 摄影分析可为爆破拆除数值模拟的准确性的验证提供新方法。

参考文献 (References)

- [1] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. 爆破, 2019, 36(2):1-12.
- [1] XIE Xian-qi. Development situation and trend of demolition blasting technology[J]. Blasting, 2019, 36(2):1-12. (in Chinese)
- [2] 汪旭光. 中国工程爆破新进展[J]. 河北科技大学学报, 2009, 30(1):1-7.
- [2] WANG Xu-guang. New progress and development of engineering blasting in China[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2009, 30(1):1-7. (in Chinese)
- [3] 崔正荣, 赵翔. 框架楼房原地坍塌爆破拆除模拟与优化[J]. 爆破, 2014, 31(2):100-103.
- [3] CUI Zheng-Rong, ZHAO Xiang. Simulation and optimization of explosive demolition of frame structure collapse in situation[J]. Blasting, 2014, 31(2):100-103. (in Chinese)
- [4] 蒙云琪, 倪明亮, 操鹏, 等. 基于数值模拟的铁四院前大楼拆除爆破方案优化[J]. 爆破, 2018, 35(1):96-103, 160.
- [4] MENG Yun-qi, NI Ming-liang, CAO Peng, et al. Optimization of demolition blasting scheme of TieSiYuan former building based on numerical simulation[J]. Blasting, 2018, 35(1):96-103, 160. (in Chinese)
- [5] 张建华, 叶永喜, 罗余祥, 等. 小缺口爆破技术对冷却塔拆除的影响数值模拟研究[J]. 爆破, 2019, 36(2):85-91.
- [5] ZHANG Jian-hua, YE Yong-Xi, LUO Yu-Xiang, et al. Numerical research on effect of small-notch blasting technology on explosion demolition of cooling tower[J]. Blasting, 2019, 36(2):85-91. (in Chinese)
- [6] 崔晓荣. 建(构)筑物爆破倒塌过程的摄影测量分析[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2011.
- [6] CUI Xiao-rong. Close-range photogrammetry analysis of building-collapse due to blasting demolition[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [7] 郑长青, 张静, 赖经建, 等. 钢筋混凝土烟囱拆除爆破倾倒过程摄影分析[J]. 爆破, 2017, 34(4):106-108, 114.
- [7] ZHENG Chang-qing, ZHANG Jing, LAI Jing-jian, et al. Photography analysis of toppling process of reinforced concrete chimney during explosive demolition[J]. Blasting, 2017, 34(4):106-108, 114. (in Chinese)
- [8] 李清, 杨阳, 杨仁树, 等. 基于MAT96本构模型的钢筋混凝土结构爆破拆除数值模拟[J]. 爆破器材, 2015, 44(1):41-45.
- [8] LI Qing, YANG Yang, YANG Ren-shu, et al. The numerical simulation of reinforced concrete structure blasting based on MAT96 constitutive model[J]. Explosive Materials, 2015, 44(1):41-45. (in Chinese)
- [9] 张明, 刘军, 贾永胜, 等. 切口方式与延期时差对框架结构爆破拆除效果的影响[J]. 爆破, 2017, 34(2):1-8.
- [9] ZHANG Ming, LIU Jun, JIA Yong-sheng, et al. Influence of cut pattern and delay time difference on effect of frame structure explosive demolition[J]. Blasting, 2017, 34(2):1-8. (in Chinese)
- [10] 李祥龙, 杨阳, 栾龙发. 基于整体式模型的钢筋混凝土结构爆破拆除定向倒塌数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(12):1220-1223.
- [10] LI Xiang-long, YANG yang, LUAN Long-fa. Numerical simulation of reinforced concrete structure directional collapse by blasting demolition based on integral model[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(12):1220-1223. (in Chinese)

英文编辑:黄刚

(上接第110页)

- [7] 刘昌邦, 贾永胜, 黄小武, 等. 框架结构楼房逐跨向内倾倒爆破拆除[J]. 爆破, 2020, 37(4):81-88.
- [7] LIU Chang-bang, JIA Yong-sheng, HUANG Xiao-wu, et al. Span-by-span inward collapse blasting demolition of frame structure building[J]. Blasting, 2020, 37(4):81-88. (in Chinese)
- [8] 许建刚, 李翠林, 王中全, 等. 两栋紧邻的不同结构高楼同时爆破拆除[J]. 爆破, 2020, 37(3):109-114.
- [8] XU Jian-gang, LI Cui-lin, WANG Zhong-quan, et al. Simultaneous blasting demolition of two adjacent tall buildings with different structures[J]. Blasting, 2020, 37(3):109-114. (in Chinese)
- [9] 孙金山, 贾永胜, 姚颖康, 等. 拆除爆破数值模拟中钢筋混凝土构件的建模及参数取值方法[J]. 爆破, 2020, 37(3):115-121.
- [9] SUN Jin-shan, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Simplification and parameter selection of reinforced concrete component for numerical simulation of demolition blasting[J]. Blasting, 2020, 37(3):115-121. (in Chinese)
- [10] 高文乐, 李元振, 赵德龙, 等. 多截面承重立柱框架结构爆破拆除数值模拟研究[J]. 爆破, 2021, 38(1):93-99.
- [10] GAO Wen-le, LI Yuan-zhen, ZHAO De-long, et al. Numerical simulation on blasting demolition of multi-section load-bearing column frame structure[J]. Blasting, 2021, 38(1):93-99. (in Chinese)

英文编辑:柯波