

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.02.010

# 延期时差对多截面承重立柱框架结构 拆除爆破效果的影响<sup>\*</sup>

高文乐<sup>①</sup> 赵德龙<sup>①</sup> 李元振<sup>①</sup> 张泽华<sup>②</sup> 李坤鹏<sup>①</sup>  
①山东科技大学土木工程与建筑学院(山东青岛,266590)  
②中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院(山东青岛,266580)

[摘 要] 为了探究多截面承重立柱框架结构在三角形爆破切口下的最优延期时差,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件,采用有限元方法建立分离式共节点模型,对 8 种不同延期时差下结构的倒塌效果进行数值模拟,分析延期时差对多截面承重立柱框架结构拆除爆破效果的影响规律。通过分析比较得出:爆堆高度和后坐距离随着延期时差的增大先减小后增加,最后趋于稳定。其中,当延期时差为 500 ms 时,爆堆高度最小;当延期时差为 400 ms 时,后坐距离最小。且实际爆破现场也和数值模拟的结果较为相符,说明数值模拟可以有效地指导爆破施工。

[关键词] 拆除爆破;多截面承重立柱;框架结构;延期时差

[分类号] TU746.5

## Influence of Delayed Time Difference on Demolition Blasting Effect of Multi-Section Load-Bearing Column Frame Structure

GAO Wenle<sup>①</sup>, ZHAO Delong<sup>①</sup>, LI Yuanzhen<sup>①</sup>, ZHANG Zehua<sup>②</sup>, LI Kunpeng<sup>①</sup>

① College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology (Shandong Qingdao, 266590)  
② College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China) (Shandong Qingdao, 266580)

[ABSTRACT] In order to explore the optimal delay time difference of multi-section load-bearing column frame structure with triangular blasting cut, the finite element method was used to establish the separated common node model by using ANSYS/LS-DYNA Software. The collapse effect of the structure under eight different delay time differences was numerically simulated, and the influence law of delay time difference on demolition blasting effect of multi-section load-bearing column frame structure was analyzed. Through the analysis and comparison, it is concluded that height and recoil distance of the blasting pile first decrease and then increase with the increase of delay time difference, and finally tend to be stable. When the delay time difference is 500 ms, the blasting height is the minimum. When the delay time difference is 400 ms, the recoil distance is the minimum. And the actual blasting is also consistent with the numerical simulation results, which shows that the numerical simulation can effectively guide the blasting construction.

[KEYWORDS] demolition blasting; multi-section load-bearing column; frame structure; delay time difference

### 引言

伴随着我国城市化进程的加快,城市楼房改造和拆除重建的工程越来越多。爆破拆除因其具有安全高效、经济环保等优点而占有重要地位。爆破拆除理论的发展落后于实践,目前爆破拆除方案的设

计仍以经验公式为主;但拆除对象的结构及其所处的环境日趋复杂,各方面对爆破拆除的要求也越来越高。因此,爆破拆除必须向精确化、可控化方向发展。爆破拆除具有不可逆性,对其进行实体实验较为困难;因此,有必要通过数值模拟的方式对爆破方案的制定和参数的优化设计提供参考依据。

在拆除爆破中,延期时差的不同会直接影响爆

<sup>\*</sup> 收稿日期:2020-08-01  
基金项目:国家自然科学基金(51874189)  
第一作者:高文乐(1966 - ),男,硕士,教授,主要从事岩土力学和爆破安全技术的教学和科研工作。E-mail: wenlegao@163.com  
通信作者:赵德龙(1995 - ),男,硕士研究生,主要从事岩土力学和爆破安全技术的研究。E-mail:1102707042@qq.com

破振动的强弱、飞石范围的大小以及建(构)筑物倒塌效果的好坏<sup>[1]</sup>。王涛等<sup>[2]</sup>采用了数值模拟来预测建筑物倒塌并得到了较好的效果,提出切口部位施加爆炸载荷能更真实地模拟建筑物爆破拆除倒塌过程;张明等<sup>[3]</sup>利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,采用整体式模型研究得出:在相同切口形式时,爆破区段延期时间不同,框架结构塑性铰形成位置和倒塌效果有所不同;李胜林等<sup>[4]</sup>采用内爆法,对单榀钢混框架进行不同延期时间的爆破切口的数值模拟,并提出了延期时间的确定原则;田水龙等<sup>[5]</sup>研究了不同毫秒延时对后坐的影响;徐鹏飞<sup>[6]</sup>采用有限元分析方法对混凝土材料模型以及钢筋混凝土本构模型进行了研究。本文中,以多截面承重立柱酒店爆破拆除项目为例,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立有限元模型,进行数值模拟,探究延期时差对拆除爆破效果的影响;通过现场实际爆破倒塌情况和模拟情况对比,分析有限元模拟的实际工程价值,为类似的工程提供参考借鉴。

# 1 工程概况

## 1.1 爆破环境

待拆除酒店位于山东省烟台市开发区长江路与珠江路交叉口西南侧。因所在地块重新规划建设,地块内建筑物需要被拆除。该酒店北侧 75 m 为长江路;东侧 133 m 为珠江路;南侧 50 m 为需要保留的平房,88 m 为待拆除楼房;西侧距离二层锅炉房 15 m,距离办公楼 30 m。爆破环境示意图见图 1。

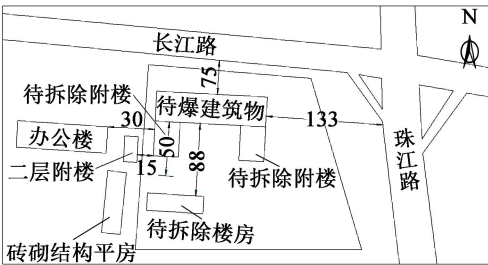


图 1 爆破环境(单位:m)

Fig. 1 Blasting environment( unit: m)

## 1.2 结构特点

该酒店主体结构 8 层(局部 10 层),框架结构。高 36.4 m,东西长 95.3 m,南北宽 17.3 m,建筑面积 13 000 m<sup>2</sup>。建筑物主体结构东西方向共 16 排立柱,跨度为 3.9~9.0 m;南北方向 3 排立柱,跨度为 2.2~8.6 m;单层共计 48 根承重框架立柱。框架柱的截面尺寸有 700 mm×700 mm、850 mm×850 mm、

1 400 mm×675 mm 3 种类型,纵向配筋情况分别为 16φ20、24φ20、24φ22。建筑物立柱布置见图 2。

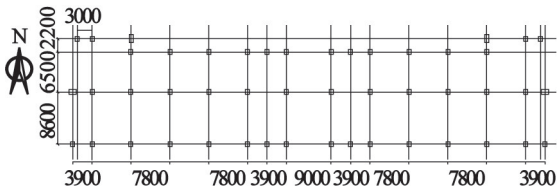


图 2 建筑物立柱布置图(单位:mm)

Fig. 2 Layout of building columns ( unit: mm)

# 2 爆破方案

考虑被爆建筑物的结构特点和周边环境情况,决定采用向南定向倒塌的爆破方案。由于该建筑物楼层较高、结构稳定,决定采用三角形爆破切口,切口的上仰角为 30°。将第 1~3 层设为爆破切口,缺口高度南高北低(第 1 层切口最大高度 3.9 m、第 2 层切口最大高度 3.6 m、第 3 层切口最大高度 3.0 m),爆破切口最高处为 10.5 m。爆破切口示意图见图 3。

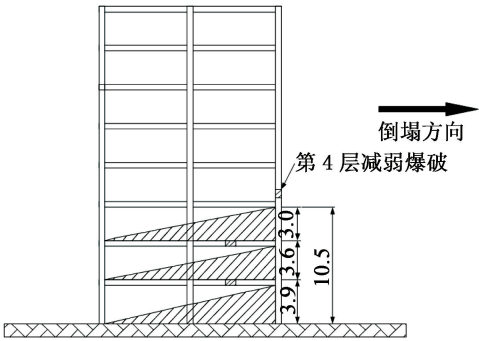


图 3 爆破切口(单位:m)

Fig. 3 Blasting incision( unit: m)

爆破后,建筑物的支撑稳定性被破坏,在自身重力作用下向南定向倒塌。根据倒塌方向,采用自南向北逐排逐层延期起爆方式。为了快速形成爆破切口,加快建筑物向南侧倾斜的速度,自南向北各排立柱分别采用非电毫秒延期雷管 MS3 段、MS11 段和 MS15 段,延期时间分别为 50、460 ms 和 880 ms。

# 3 不同延期时差下的数值模拟

## 3.1 有限元模型建立

利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对工程进行 1:1 建模<sup>[7]</sup>。为了能够真实地反映出钢筋和混凝土两种材料的力学性能差异,采用分离式共节点模

型。其中,梁、柱和地面选用 solid 164 单元,钢筋选用 beam 161 单元,楼板选用 shell 163 单元。为了提高建模和计算的速度,在不严重影响计算精度的前提下,对模型做出了以下简化<sup>[8]</sup>:1) 不考虑钢筋外面的混凝土保护层厚度;2) 不设置箍筋,通过适当提高混凝土强度来代替箍筋的作用;3) 地面设置为刚体,不发生变形;4) 将墙的质量等效分配到梁上;5) 不考虑炸药爆炸对切口的形成以及爆炸后切口断面的影响。同时,考虑到计算的准确性,采用规则的六面体映射网格进行网格划分,网格尺寸设置为 0.2 m,单元数量总计 344 703 个。结构的有限元模型见图 4。

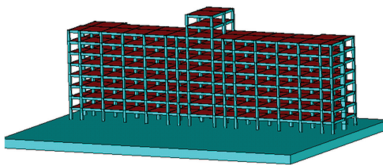


图 4 结构的有限元模型  
Fig.4 Finite element model of structure

3.2 模型的材料及接触

钢筋和混凝土的材料类型选用 \* Mat\_Plastic\_Kinematic(塑性随动模型),各材料的力学性能参数如表 1 所示。通过关键字 \* Mat\_Add\_Erosion 控制爆破切口的形成以及混凝土材料的失效<sup>[9]</sup>,钢筋的失效则通过定义材料自带的 FS 参数进行控制。

表 1 各材料的力学性能参数

Tab.1 Mechanical property parameters of each material

材料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	拉伸极限/ MPa
钢筋	7 850	210	0.3	$3.2 \times 10^2$
梁、柱	2 400	30	0.2	5.2
板	3 400	30	0.2	5.2

考虑到建(构)筑物在倒塌过程中接触的复杂性,在各种接触类型中,用 Contact\_Eroding\_Single\_Surface 定义混凝土单元之间以及混凝土单元和地面的接触;用 Contact\_Nodes\_To\_Surface 定义钢筋单元和地面的接触<sup>[10]</sup>,防止钢筋穿透地面。模拟时,取静摩擦系数和动摩擦系数为 0.6。

3.3 不同延期时差设置

有限元模型建立完毕后,设置 8 种不同的延期方案,延期时差分别为 0、100、200、300、400、500、600 ms 和 900 ms。其中,8 种延期方案相邻两排立柱之间的延期时差相同。通过 ANSYS/LS-DYNA 进行模拟,分析不同延期时差下多截面承重立柱框架

结构的拆除爆破效果。

4 数值模拟结果及对比分析

4.1 数值模拟结果

模型的其他设置保持不变,只改变延期时差,通过数值模拟得到各个延期方案的爆破效果。不同同时差时的最终倒塌效果见图 5。利用 LS-DYNA 的后处理模块对图 5 中不同延期时差时的倒塌形态进行数据处理,得到不同延期方案的爆堆高度(图 6)及后坐距离(图 7)。

4.2 对比分析

通过对徐轩等<sup>[11]</sup>的研究和本次数值模拟结果

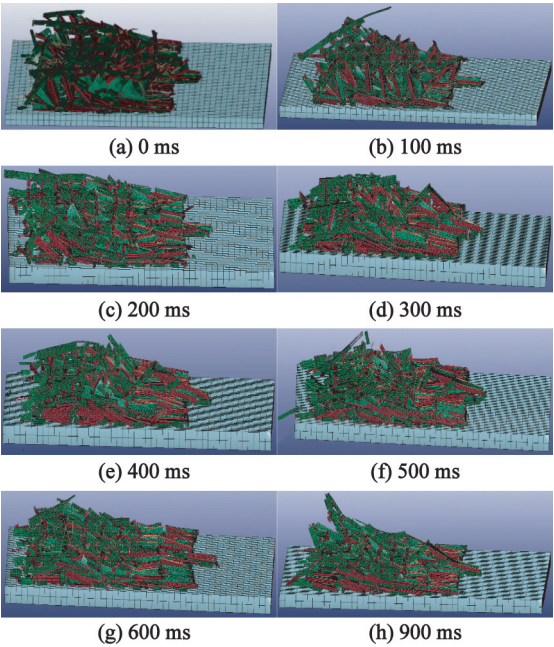


图 5 不同延期时差的倒塌效果示意图  
Fig.5 Schematic diagram of collapse outcome with different delay time difference

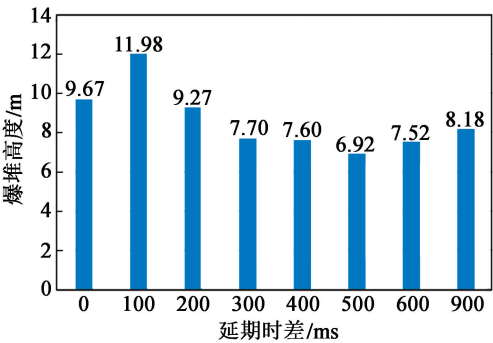


图 6 不同延期时差时的爆堆高度  
Fig.6 Blasting height with different delay time difference

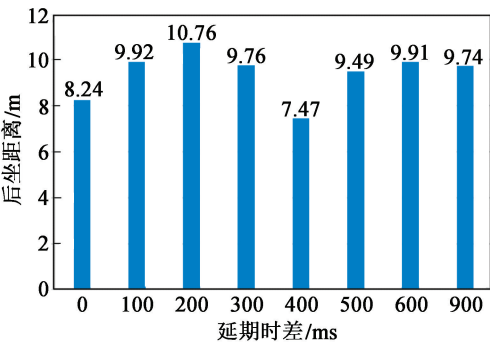


图 7 不同延期时差下的后坐距离

Fig. 7 Rear-seat distance with different delay time difference

的相互论证可以发现,控制延期时差的大小可以有效地将爆堆高度和后坐距离控制在可承受的范围

4.2.1 爆堆高度

以爆堆的最高点作为爆堆高度的选取点。从图 5 和图 6 中可以看出,爆堆高度随着延期时差的增加呈先减后增、最后趋于稳定的变化规律,并在 500 ms 出现最小值。其中,延期时差为 100 ms 时,由于东北侧一根立柱尺寸为1 400 mm × 675 mm,南北向截面刚度较大,在倒塌过程中立柱未完全破碎并且翘起,导致爆堆高度在延期时差 100 ms 时陡升。结构的破碎解体主要依靠构件之间的冲击碰撞作用,当延期时差较小时,在大偏心受压下,最后一排形成塑性铰,上部结构整体发生偏转,但仅第一排的动能会因为距塑性铰较远而比较大,无法使结构完全解体;随着延期时差的增大,每排立柱在梁柱节点处均能形成塑性铰,且在 500 ms 时各塑性铰转动充分,产生的竖向动能足以使结构完全解体,爆堆高度为 6.92 m;延期时差大于 500 ms 后,塑性铰转动充分后并趋于稳定,部分动能转化为内能,能量的耗损反而不利于结构的解体,因此,爆堆高度趋于常数。

4.2.2 后坐距离

从图 5 和图 7 的数值模拟结果对比中可以发现,后坐距离随着延期时差的增加呈先减小后增大、最后趋于稳定的变化规律,并在 400 ms 出现最小值。楼体在爆破时会产生下坐和沿设计方向的倾

m。随着延期时差的继续增大,前端结构提前触地,对后端结构产生支撑作用,导致后坐增大,最终稳定在一个常数。

5 现场爆破效果

综合考虑最小爆堆高度以及最小后坐距离的原则,爆破方案最终选取自南向北排间延期时差分别为 410 ms 和 420 ms。具体通过非电毫秒延期雷管实现。现场爆破过程如图 8 所示,

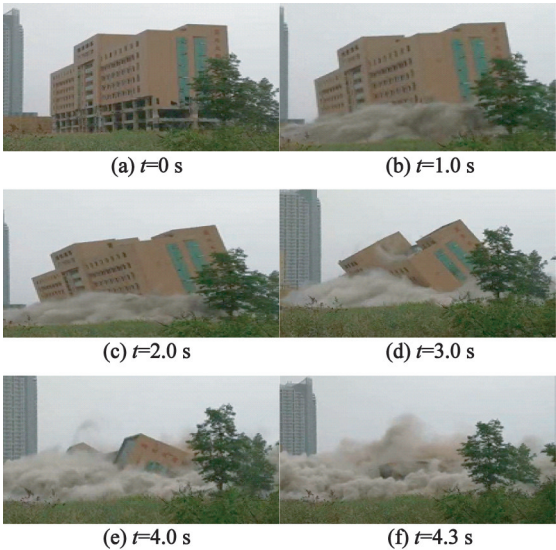


图 8 爆破倒塌过程

Fig. 8 Collapse process of blasting

起爆后,结构按预定方向倒塌。对实际爆破和数值模拟的爆堆形态进行对比:实际爆堆高度约 8.10 m,后坐距离约 6.20 m;数值模拟的爆堆高度为 7.36 m,后坐距离为 6.81 m。可认为现场爆破效果与模拟结果比较符合,模拟结果较好。

本次爆破中,整体产生了明显的后坐现象。分析其主要原因为结构的高宽比仅为 1.77,楼房重心偏低,导致支撑体受到偏心力超过其最大的承载能力;支撑体因承载能力不足而迅速发生粉碎性破坏或弯折断裂破坏,楼体以一定角度下沉;同时,转动轴后移,即上部楼体开始做类似于自由落体运动与绕转动轴转动的合成运动<sup>[13]</sup>。因此,在爆破施工时应合理地控制后排立柱的装药量,减少小高宽比结构因支撑体承载力不足而产生的后坐现象。

6 结论

1)通过与其他研究对比发现,框架结构在进行定向爆破拆除时,爆堆高度和后坐距离随着延期时差的增大先减小、后增加,最后趋于稳定。最佳延期

时差则根据不同的建筑形态有不同的数值。

2) 为避免数值模拟中出现的大截面立柱破而不碎的情况,多截面承重立柱框架结构在爆破拆除时,应对截面刚度较大的立柱进行松动爆破,确保其完全解体。

3) 模拟过程中建立的是分离式共节点模型,综合地考虑了钢筋和混凝土的共同作用,虽然没有考虑炸药在爆炸时对整体结构的冲击作用,但也能很好地模拟出结果,与实际工程吻合。

4) 对于本文中的建筑形式,当爆堆高度最小时,数值模拟得到的最佳延期时差为 500 ms;当后坐距离最小时,数值模拟得到的最佳延期时差为 400 ms。模拟结果也与实际爆破相符,说明数值模拟可以有效地对实际爆破结果进行模拟预测。

### 参 考 文 献

- [1] 高文乐,张泽华,苏凯凯,等. 多截面承重立柱酒店定向拆除爆破[J]. 工程爆破,2018,24(2):59-65.  
GAO W L, ZHANG Z H, SU K K, et al. Directional blasting demolition of hotel with multi-section bearing column[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(2): 59-65.
- [2] 王涛,宋庆刚,谢春明,等. 爆炸荷载下六层框架结构建筑爆破拆除数值模拟[J]. 爆破,2014,31(2):104-107,110.  
WANG T, SONG Q G, XIE C M, et al. Numerical Simulation of six-story frame structure explosive demolition under explosive loading [J]. Blasting, 2014, 31(2): 104-107, 110.
- [3] 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.  
ZHANG M, LIU J, JIA Y S, et al. Influence of cut pattern and delay time difference on effect of frame structure explosive demolition [J]. Blasting, 2017, 34(2): 1-8.
- [4] 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 S L, WANG Y T, HUANG M S, et al. Numerical simulation of single concrete framework implosion demolition [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(4): 354-357, 385.
- [5] 田水龙,张程娇,黄雄,等. 8 层框架结构楼房爆破拆除后坐数值模拟[J]. 工程爆破,2019,25(1):13-18.  
TIAN S L, ZHANG C J, HUANG X, et al. Numerical simulation of backward collapse in blasting demolition of 8-storey frame building [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(1): 13-18.
- [6] 徐鹏飞. 拆除爆破中钢筋混凝土本构模型及应用研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2017.  
XU P F. Study on reinforced concrete constitutive model and its application in blasting demolition [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2017.
- [7] 费鸿禄,刘梦,张玉莹,等. 10 层框架结构楼房爆破拆除的数值模拟[J]. 工程爆破,2016,22(3):48-53.  
FEI H L, LIU M, ZHANG Y Y, et al. Numerical simulation of blasting demolition of 10-storey frame structure building [J]. Engineering Blasting, 2016, 22(3): 48-53.
- [8] 余德运,杨军,陈大勇,等. 基于分离式共节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 D Y, YANG J, CHEN D Y, 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.
- [9] 吴建宇,龙源,纪冲,等. 城市高层框架-筒体结构建筑物拆除数值模拟研究[J]. 爆破,2015,32(2):95-99.  
WU J Y, LONG Y, JI C, et al. Numerical simulation of explosive demolition of urban high-steered frame-tube structures [J]. Blasting, 2015, 32(2): 95-99.
- [10] 周丹. 爆破拆除框架结构建筑物的力学模型及工程应用[D]. 长沙:中南林学院,2005.  
ZHOU D. Study on the mechanical model and engineering apply of blasting demolition of reinforced frame structures [D]. Changsha: Central South Forestry University, 2005.
- [11] 徐轩,徐颖,刘伟,等. 延期间隔对建筑物拆除爆破效果的影响[J]. 爆破,2017,34(1):143-147.  
XU X, XU Y, LIU W, et al. Effect of delay intervals on building demolition with explosive [J]. Blasting, 2017, 34(1): 143-147.
- [12] 康翠平,高艳敏,孙江,等. 14 层办公楼定向爆破拆除[J]. 工程爆破,2008,14(4):43-45.  
KANG C P, GAO Y M, SUN J, et al. Directional blasting demolition of 14-storey office building [J]. Engineering Blasting, 2008, 14(4): 43-45.
- [13] 范龙泉,李小帅,李杜一,等. 毫秒微差爆破在高层楼房拆除中的应用与研究[J]. 爆破器材,2018,47(5):54-58,64.  
FAN L Q, LI X S, LI D Y, et al. Application and study of millisecond delay blasting technology in high-rise building demolition blasting [J]. Explosive Materials, 2018, 47(5): 54-58, 64.