

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.014

框架结构楼房逐跨向内倾倒爆破拆除*

刘昌邦^{1,2,3}, 贾永胜^{1,2,3}, 黄小武^{1,2,3}, 伍岳^{1,2,3}, 孙金山^{1,2,3}, 姚颖康^{1,2,3}

(1. 爆破工程湖北省重点实验室, 武汉 430056; 2. 江汉大学湖北(武汉)爆炸与爆破技术研究院, 武汉 430056;
3. 武汉爆破有限公司, 武汉 430056)

摘要: 为提高爆破拆除的安全性, 拓宽爆破拆除的应用范围, 结合工程案例提出了框架结构楼房“逐跨向内倾倒”爆破拆除技术。通过无人机搭载夜视相机摄影观测和动力学有限元数值模拟计算, 分析了框架结构楼房爆破拆除倒塌运动过程与爆堆形态, 研究了逐跨向内倒塌爆破拆除的技术要点。通过布置4层爆破切口, 自中间向两侧逐跨延时310 ms依次起爆, 主动控制楼体的运动姿态, 确保楼房可靠地连续倒塌, 实现集中爆堆、充分解体和降低振动的目标。经研究发现: 两侧楼体在倒塌过程中既有纵向运动又有横向运动, 构件间的碰撞挤压几率增加, 承重构件由单一的受压破坏转化为形式多样的弯剪破坏。与传统定向爆破拆除技术相比, 逐跨向内倒塌爆破拆除技术在控制倒塌姿态、促进爆堆解体和削弱触地振动等方面更具优越性, 为城市复杂环境下建筑物爆破拆除提供了新的设计思路。

关键词: 爆破拆除; 框架结构楼房; 爆破效果; 摄影观测; 数值模拟

中图分类号: TU746.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)04-0081-08

Span-by-span Inward Collapse Blasting Demolition of Frame Structure Building

LIU Chang-bang^{1,2,3}, JIA Yong-sheng^{1,2,3}, HUANG Xiao-wu^{1,2,3},
WU Yue^{1,2,3}, SUN Jin-shan^{1,2,3}, YAO Ying-kang^{1,2,3}

(1. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Wuhan 430056, China;
2. Hubei(Wuhan) Explosions and Blasting Technology Institute of
Jiangnan University, Wuhan 430056, China;
3. Wuhan Explosions & Blasting Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: In order to improve the safety and broaden the application of blasting demolition, a technology of “span-by-span inward collapse blasting demolition” for the frame structure building is proposed combined with engineering cases. The collapse movement process and pile shape of blasting demolition were analyzed. Furthermore, the technical points of span-by-span inward collapse blasting demolition were studied through photographic observations of UAV equipped with night vision cameras and dynamics finite element numerical simulation. During the blast operation, four layers of blasting cuts were initiated sequentially from the middle to both sides with a delay time of 310 ms, which actively controlled the movement posture and ensured the reliable continuous collapse of the building. Those measures could realize the goals of concentrated blasting piles, full dismantlement and reduced vibrations. According to research, there are both longitudinal and transverse movements during the collapse of the buildings on both sides. Thus, the probability of collision and extrusion between the components increases, and the load-bearing components change from a single compression failure to various forms of bending and shear failures. Compared with traditional directional blasting demolition technology, blasting demolition of span-by-span inward collapse has more advantages in controlling the collapse posture, promoting the dismantlement of the blasting piles, and reducing the

touchdown vibrations. It provides a new design idea for blasting demolition of buildings in complex urban environments.

Key words: blasting demolition; frame building; blasting effect; photographic observation; numerical simulation

拆除爆破技术因其具有安全高效、经济环保等优点,在城市楼房拆除工程中得到广泛应用^[1-3]。在已有的拆除爆破技术中,定向倾倒方式设计原理最为简单,施工更加方便,备受国内爆破工程师们的青睐,往往作为高层楼房拆除工程首选。而随着我国城市化建设的快速发展,高层、异形框架结构建筑逐渐增多,高架桥、地铁管线及城市地下管网错综复杂,城市复杂的环境对爆破拆除技术提出了更高的要求,传统定向爆破受到更多的限制。

探索建(构)筑物爆破拆除失稳倒塌机理,研发爆破拆除新技术通常采用缩小尺寸物理模型试验、数值模拟和全尺寸建(构)筑物测试等方法。开展拆除爆破模型试验具有很高的危险性,不仅需要花费高额的成本,而且对试验条件要求很高^[4-6]。数值模拟在这一领域的优势毋庸置疑,既节省了大量的资金,也避免了实验测试中可能出现的各种危险;然而,构建精细化的数值模型,精准选取材料的物理力学参数并设置合理的失稳破坏法则,主要依赖仿真工程师的计算经验,且计算结果与实际工况仍有差距^[6-8]。现阶段,通过动态应变监测、高速摄影观测等试验手段,在待拆除建(构)筑物上开展原位试验,分析梁、柱、板等构件的破坏失效,以及整个结构的失稳倒塌,仍是一个研究拆除爆破新技术的重要的研究方法。

Loizeaux 和 Osborn 研究了四个实际建筑物的内爆法(Impllosion)爆破拆除连续倒塌过程,分析了几个结构系统的倒塌机制^[9]。Sasani 等对一个实际的10层钢筋混凝土结构进行了爆破拆除实验研究,认为楼板在结构倒塌过程中形成空腹效应,抑制了结构的解体垮塌^[10]。Matthews 等对某两层钢筋混凝土原型结构在爆炸作用下的反应进行了试验研究,认为建筑框架在重新分配荷载时保持线弹性^[11]。贾永胜等通过典型工程案例和多刚体动力学模拟,进行了高层楼房折叠爆破拆除关键参数研究,得出了单项折叠和双向折叠模式各自的最佳切口布置方

式及起爆时差确定方法^[12]。李勇等通过对一复杂环境下多跨不规则框架结构大楼成功实施爆破,阐明了逐跨坍塌爆破技术的可行性^[13]。王洪刚等采用纵向逐跨坍塌技术对武汉虹锦公寓进行了爆破拆除,框剪结构楼房解体充分,爆堆范围较小^[14]。在众多高层楼房爆破拆除案例中,折叠爆破、纵向逐跨爆破等技术的应用,都有效解决了楼房倒塌空间受限的难题^[15]。如今,越来越多的高层建筑周围地面上上下下遍布着各类保护设施,可供建筑物爆破拆除倒塌空间范围越发狭小,且需严格控制塌落触地振动、个别飞散物和爆破粉尘等有害效应。

因此,进一步发展高层建筑爆破拆除倒塌模式,创新爆破拆除系列新技术,对提高爆破拆除的安全性、扩大爆破拆除的应用范围具有重要的理论与实践意义。结合某7层框架楼房爆破拆除工程实践,提出了框架结构楼房“逐跨向内倒塌”爆破拆除技术。它是对原地坍塌和纵向逐跨坍塌方式的进一步改进,其基本原理是通过改变立柱起爆顺序,合理控制爆破延期时间,使得建筑中间部位先触地,两边结构向内挤压倾倒,以达到减小构件塌落堆积范围、降低触地冲击振动的效果。通过红外摄像技术对楼房失稳倒塌过程进行动态观测,并对该楼房倒塌过程进行了数值模拟分析,验证了“逐跨向内倒塌”爆破拆除技术的科学性和实用性,可供类似爆破拆除工程参考借鉴。

1 工程案例

1.1 工程简介

待拆楼房为7层框架结构,长43.2m,宽14.1m,高32.4m,建筑面积为6002.96m²。楼房横向共3排立柱,纵向共13排立柱,内设1个电梯井,2个楼梯间。主要立柱截面尺寸为450mm×600mm,楼板为现浇板,板厚120mm;填充墙体为240mm砖墙。具体结构如图1所示。

楼房东侧距10kV电缆沟1.0m,距下正街36.4m,距1层民房6.7m;东南侧距10kV电缆沟1.0m,南侧距围墙24.6m,距110kV变电站41m;西侧距电缆沟1.0m,距9层楼房27.8m;北侧距10kV电缆沟2.0m,距围墙7.9m,距架空电线8.7m,距转车楼路10m,距9层楼房22.4m。具体环境如图2所示。

收稿日期:2020-10-15

作者简介:刘昌邦(1982-),男,高级工程师、工学硕士,主要从事工程爆破研究与实践工作,(E-mail)57175907@qq.com。

通讯作者:贾永胜(1970-),男,教授、工学博士,主要从事工程爆破研究与实践工作,(E-mail)jason03566@163.com。

基金项目:湖北省自然科学基金重点项目(创新群体,2020CFA043);湖北省重点研发计划项目(2020BCA084)

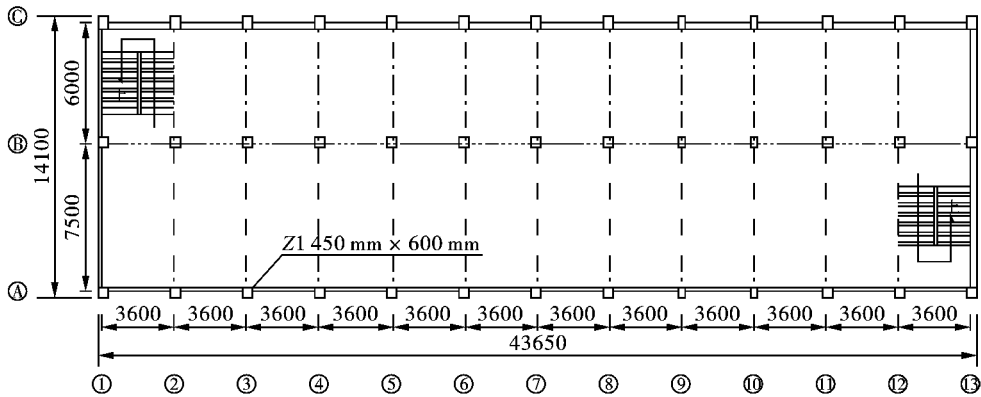


图1 结构平面图(单位:mm)

Fig. 1 Planar graph of structure(unit :mm)

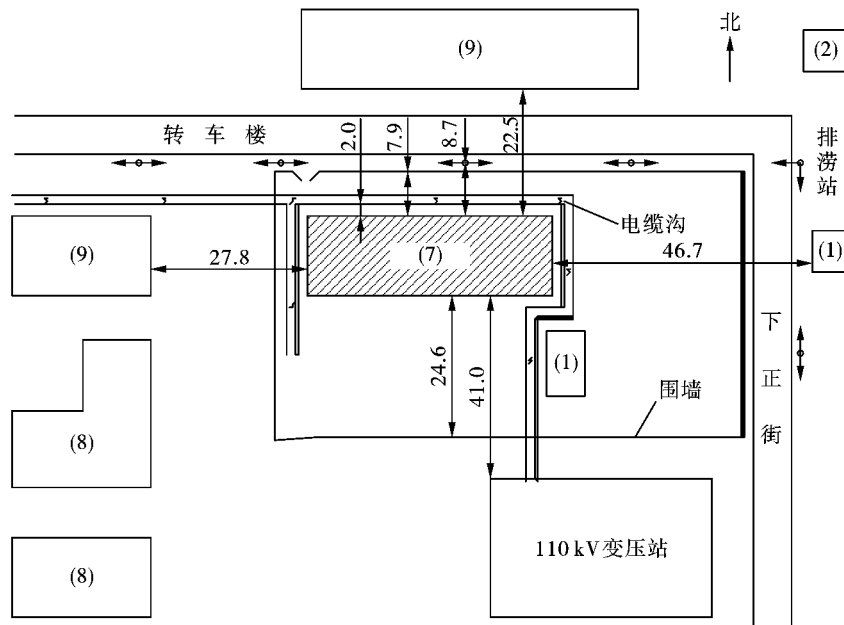


图2 周边环境图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of surroundings(unit :m)

1.2 爆破拆除方案

1.2.1 总体方案

待爆楼房为框架结构,强度大、刚度大,地处城市闹市区,四周均有保护目标,可供定向倒塌的空间不足,且楼房倒塌堆积范围需严格控制。楼房爆破拆除对爆破振动与塌落触地振动、个别飞散物等有害效应均需严格控制。根据待爆楼房的结构特征及周边环境情况,可考虑以下两种爆破方案:(1)向南侧定向折叠爆破;(2)逐跨向内倾倒爆破。方案1:楼房倾倒前冲对南侧围墙、110 kV 变电站等保护目标的安全风险较高,楼房后坐极易导致北侧电缆沟受损;同时,楼房倾倒触地产生的振动对周边的建构物、市政管网等构成安全威胁。方案2:楼房爆破堆积范围类似于原地坍塌,楼房爆破后渣块堆积范围较为集中;楼房在倾倒过程中结构在空中剪切、弯

折破坏,构件逐跨依次落地,削弱楼房触地引起的冲击、振动。综上,拟选取方案2,采用逐跨内向倾倒爆破拆除的总体方案,既可以控制构件塌落的堆积范围,又能控制塌落振动等有害效应。

1.2.2 爆破切口

结合楼房的结构特征,爆破切口设置在1~2层、4层和6层,如图3所示。多个切口可有效划分楼房整体的重力势能,减小触地冲击力。1轴和13轴作为支撑区,仅对1层进行松动爆破。各楼层立柱切口高度见表1。为了降低楼房整体刚度,将电梯井的填充墙全部拆除,将1~2层楼梯全部拆除,3层以上楼梯弱化处理,即将上下楼梯第一踏步位置处混凝土破碎,破碎宽度不小于20 cm,但保留楼梯钢筋。

表1 爆破切口高度(单位:m)
Table 1 Hight of blasting cut(unit:m)

轴号	1	2	3-5	6-8	9-11	12	13
第六层	-	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	-
第四层	-	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	-
第二层	-	1.2	2.1	2.1	2.1	1.2	-
第一层	0.6	1.2	2.1	4.5	2.1	1.2	0.6

1.2.3 孔网参数

待拆楼房的立柱截面尺寸均为 450 mm × 600 mm, 布置单排炮孔, 炮孔间距 30 cm, 孔深 40 cm。根据现场试爆效果, 炸药单耗取 1.5 kg/m³, 对于配筋较高的区域, 适当提高装药量。炸药装填采用连续装药结构。见表 2。

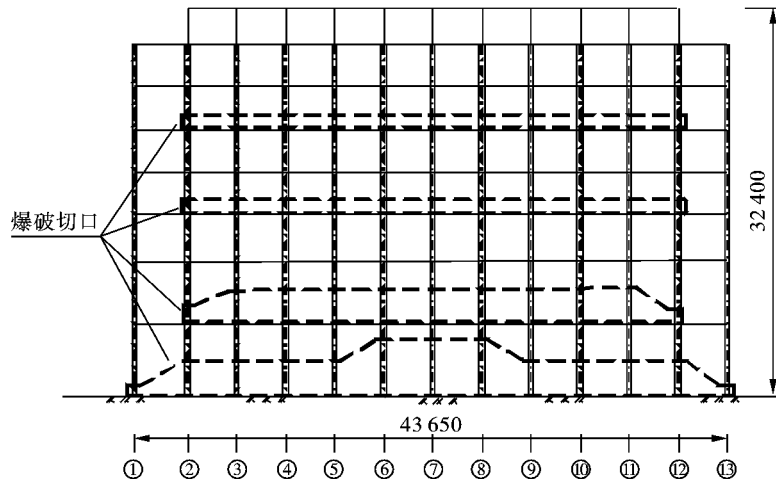


图3 爆破切口示意图(单位:mm)

Fig. 3 Schematic diagram of Blasting cut(unit:mm)

表2 爆破参数表

Table 2 Blasting parameter

立柱尺寸/ mm	最小抵抗线 w / cm	孔径 d / mm	孔距 a / cm	排距 b / cm	孔深 l / cm	单耗 k / ($g \cdot m^{-3}$)	单孔药量 q/g	布孔方式	装药结构
450 × 600	22.5	40	30	-	40	1500	120	单排布孔	连续装药

1.2.4 爆破网路

逐跨向内倒塌爆破拆除模式的设计核心就是要控制立柱的起爆顺序与延期时间, 起爆网路采用孔内装 MS19(1700 ms) 段非电导爆管雷管、孔外 MS9

(310 ms) 段非电导爆管雷管接力延时起爆网路。同纵排各楼层立柱同时起爆, 6、7、8 轴首先起爆, 依次向两边立柱对称同步延期, 立柱起爆延期时间见表 3。

表3 爆破延期时间(单位:ms)

Table 3 Blasting delay-time(unit:ms)

轴号	1	2	3	4	5	6-8	9	10	11	12	13
孔外	1550	1240	930	620	310	0	310	620	930	1240	1550
孔内	3250	2940	2630	2320	2010	1700	2010	2320	2630	2940	3250

1.3 楼房失稳倒塌过程

为实现夜间观测楼房爆破拆除失稳倒塌过程, 采用无人机搭载夜视相机, 在距离起爆中心 500 m 远处倾斜拍摄, 摄影效果如图 4 所示。从组图中可以看出, 楼房在起爆后按照设计方案自中间向两侧依次逐段倒塌。由于楼房 6~8 轴爆破切口高度相对 1~5 轴和 9~13 轴的爆破切口更高, 给中部爆堆腾出了更大的空间, 导致楼房在坍塌过程中呈现明

显的“M”形。采用无人机搭载夜视相机可实现大规模宏观夜间拍摄, 可清晰捕捉建筑失稳倒塌过程中(楼房塌落触地之前)的轮廓、姿态。楼房塌落触地后, 瞬间激起浓厚而翻滚的粉尘, 影响进一步观测。

待尘埃落定及天亮后再次踏勘爆破现场, 开展航拍和实测, 发现楼房爆破拆除后的爆堆形态, 如图 5 所示。楼房的主要构件在爆破拆除后几乎都堆积在原来的范围, 仅有少量渣块外溢。爆堆整体呈现

中间低、两头高的形态,最大高度约 6.5 m。

2 内塌式爆破拆除技术分析

2.1 数值仿真验算

采用 ANSYS/LS-DYNA 大型有限元程序,对该楼房逐跨向内倒塌模式进行仿真验算,探究框架楼房内塌式爆破拆除技术的科学性,分析楼房倒塌过程中的力学机理。根据上述工程案例中楼房结构参

数,建立 7 层钢筋混凝土框架有限元模型。为了研究楼房爆破倒塌时的宏观变形情况,钢筋混凝土结构采用整体式建模^[16],即将钢筋单独划分,大大减少结构的单元数目,提高运算效率。同时,在不影响计算精度的情况下对计算模型进行简化,适当提高混凝土的屈服强度;其次,把承重墙的质量等效到楼板混凝土中,不考虑楼梯间、厨房、卫生间等狭小结构对楼房刚度的提升。

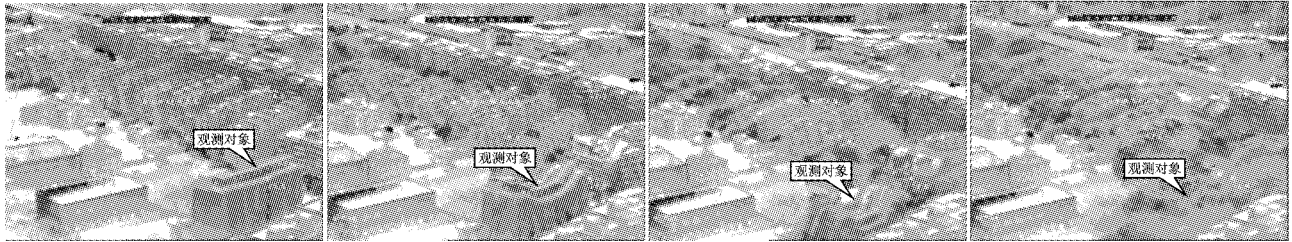


图 4 楼房爆破拆除失稳倒塌过程

Fig. 4 Collapse process of building due to blasting demolition

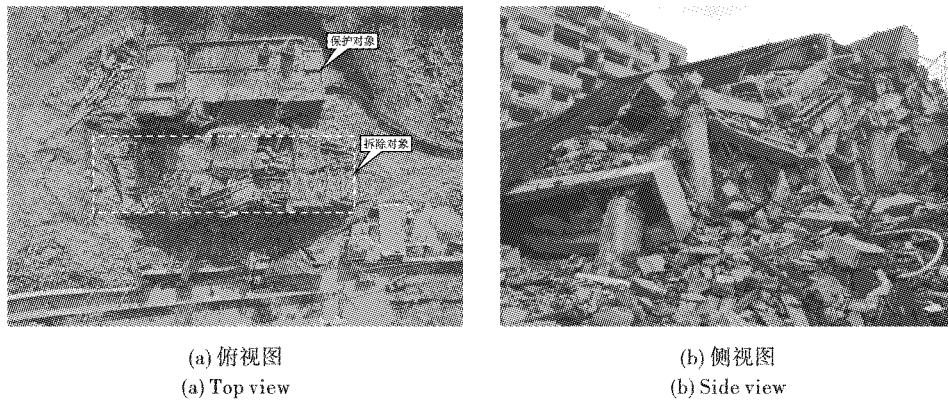


图 5 楼房爆堆效果图

Fig. 5 Effect picture of blasting pile

结构的梁、柱、板单元均采用 SOLID164 单元,钢筋混凝土计算模型选用塑形随动硬化材料模型,地面设置为刚体。采用 8 节点六面体单元对模型进行网格划分,单元尺寸为 40 cm,整个模型划分得到

的单元数为 54563,节点数为 106103。接触形式采用自动单面接触,自动识别楼房各部件之间以及楼房与地面之间的碰撞接触。钢筋混凝土材料的物理力学参数,如表 4 所示。

表 4 材料的物理力学参数

Table 4 Mechanical parameters of materials

名称	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
梁柱板	3000	40	0.20	4.0	50
地面	2400	25	0.16	-	-

使用关键字 * MAT_ADD_EROSION 来控制材料的失效;爆破立柱通过时间参数控制使之按照设定的时刻依次失效。当楼房爆破切口形成后,建筑物逐步倾倒并伴有结构破坏。结构主体部分发生断裂或破碎的阈值,通过定义失效应变(本次计算设置失效应变值为 0.045)控制。

计算结果表明,框架楼房按照设计逐跨向内倒塌,自立柱爆破到完全触地历时约 5 s。爆堆形态与实际工程楼房的爆堆形态相似,均在保护区域范围以内。爆堆(如图 6 所示)长 44.97 m、宽 15.43 m、高 7.24 m,为楼房屋址占地面积的 1.14 倍。

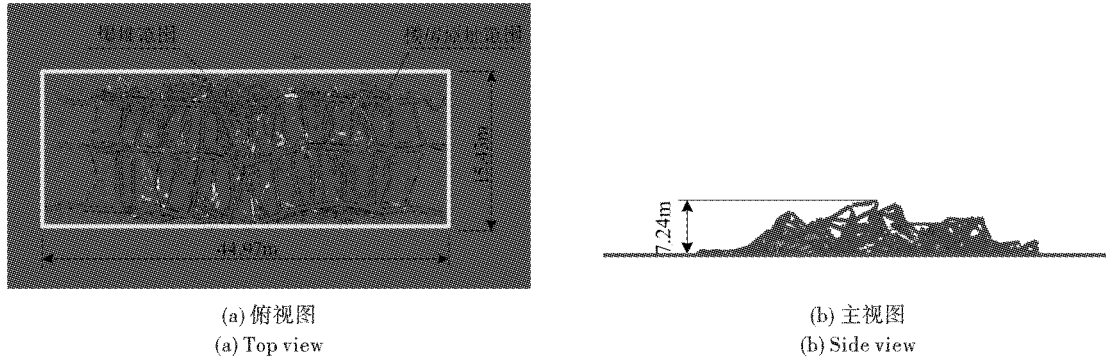


图 6 楼房模拟爆堆形态及尺寸
Fig. 6 Shape and size of building blasting pile

2.2 技术要点分析

从楼房倒塌过程(图 7)中可以看到,当楼房中部 6、7、8 轴各爆破层立柱拆除后,中部楼体的梁结构跨度突然变大,并由负弯矩变为正弯矩,继而发生弯曲变形、破坏。在 5、9 轴的立柱拆除后,可明显看到在梁节点处出现断裂区,同时,立柱等承重结构被逐渐向中间方向拉拽,产生一定的倾斜。随着两侧立柱按照设定的时刻逐跨拆除后,这一变化趋势越来越明显。因此,

承重构件的受力形式发生了较大改变,由之前的受压状态变为受剪、弯、压组合力状态。根据钢筋混凝土材料的力学特性可知,楼房构件更易在弯、剪作用下发生破坏,从而使爆堆解体更加充分,便于后续清渣作业。

分别在楼房的 7 轴、10 轴和 13 轴立柱顶部选取三个节点进行位移分析,1#、2#、3#号点分别对应节点 102966、104139 和 27762,绘制 X、Y 方向上的位移-时间曲线,如图 8 所示。

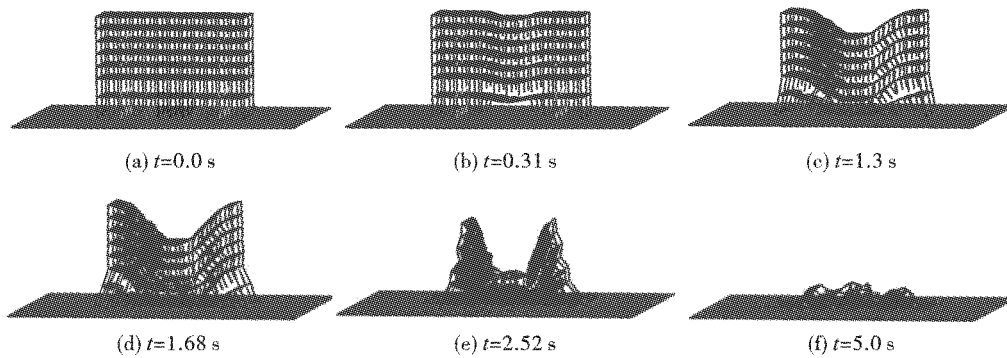


图 7 楼房倒塌过程数值仿真
Fig. 7 Collapse process of building by numerical simulation

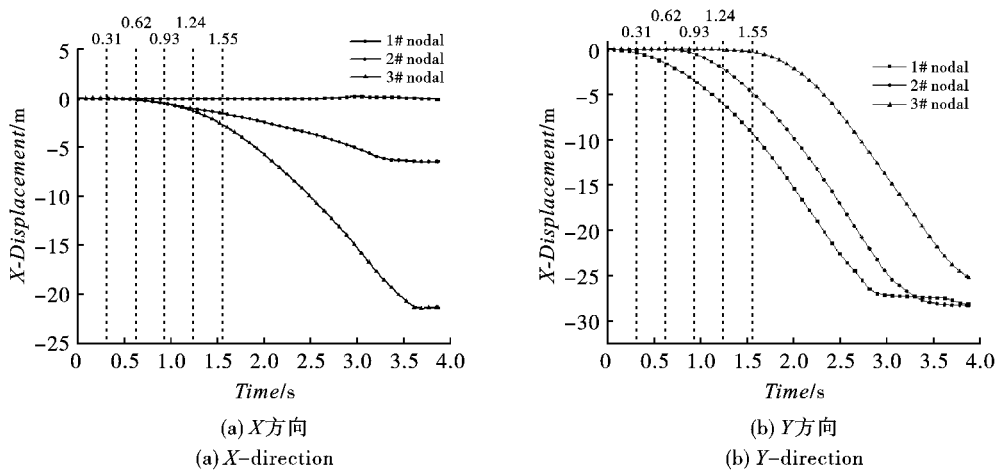


图 8 代表性节点的位移-时间曲线
Fig. 8 Displacement-time curves of representative nodes

从图8中可以看出,1#节点在X方向位移几乎为0,在6、7、8轴立柱起爆后,开始在重力作用下垂直下落,在2.8s时Y方向位移趋于平缓,此时该节点附近楼体开始与下层构件接触碰撞。2#节点在0.62s开始出现X、Y方向位移,而10轴各层立柱起爆时刻为0.93s,说明该区域楼体提前受到中部楼体塌落产生的拉力作用而开始破坏变形,再结合该区域楼体倒塌过程变形分析,9~11轴区域的楼体倒塌时受力较为复杂,由单纯的受压状态变为受剪、弯、压组合力状态。3#节点在0.62s开始出现X方向位移,而在1.24s开始出现Y方向位移,最终3#节点X方向位移较大,达到20m,Y方向位移小于1#、2#节点,说明两侧楼体最开始受到水平拉力作用向内部倾覆;之后倒塌在中部楼体爆堆上,充分解体。由此,从中部向两侧可将逐跨向内倒塌过程中的框架楼房划分为“垂直塌落受压破坏区、挤压倒塌组合力破坏区、向内倾覆受拉破坏区”三个区域。

从能量耗散的角度来看,采用逐跨向内倒塌模式,使两侧楼体在倒塌过程中既有纵向运动又有横向运动,左右、上下不同方向构件间的碰撞挤压几率明显增加,大大消耗了楼房的重力势能,不仅改善了楼体解体破碎的程度,而且减小了楼体塌落冲击的动能,削弱了触地振动效应。

因此,框架结构楼房逐跨向内倒塌爆破拆除的技术要点在于,通过合理地设计爆破切口和延期时间,主动控制楼体的运动姿态,使楼体承重构件由单一的受压破坏转化为形式多样的拉、弯、剪破坏,确保楼房可靠地连续倒塌,实现集中爆堆、充分解体和削弱振动的目标。

3 结论

与传统定向爆破拆除技术相比,逐跨向内倒塌爆破拆除技术在控制倒塌姿态、促进爆堆解体和削弱触地振动等方面更具优越性,不仅提高了爆破拆除的安全性,而且拓宽了爆破拆除的应用范围。通过摄影观测和数值模拟,研究了框架楼房爆破拆除倒塌运动过程与爆堆形态,分析了逐跨向内倒塌爆破拆除的技术要点,得到如下结论:

(1)框架结构楼房逐跨向内倒塌爆破拆除的关键技术是通过合理地设计爆破切口和延期时间,主动控制楼体的运动姿态,确保楼房可靠地连续倒塌,实现集中爆堆、充分解体和降低振动的目标。

(2)框架结构楼房逐跨向内倒塌过程中,两侧楼体在倒塌过程中既有纵向运动又有横向运动,构件间的碰撞挤压几率增加,承重构件由单一的受压破坏转化为形式多样的拉、弯、剪破坏,不仅改善了楼体解体破碎的程度,而且削弱了塌落触地振动

效应。

(3)无人机搭载夜视相机可实现大规模宏观夜间拍摄,能清晰捕捉建筑失稳倒塌过程中的轮廓和姿态;运用动力有限元数值计算方法,较好地还原了框架结构楼房逐跨向内倒塌爆破拆除失稳倒塌运动过程,并解释了主要建筑构件的破坏失效机理。

参考文献 (References)

- [1] 乐松,赵明生,吴慧,等. 茅台三栋高层住宅楼爆破拆除设计与施工[J]. 爆破,2016,33(3):81-87.
- [1] YUE Song,ZHAO Ming-sheng,WU Hui,et al. Design and construction of explosive demolition of three high-rise residential buildings in Maotai brewery[J]. *Blasting*,2016,33(3):81-87. (in Chinese)
- [2] 黄土辉. 国内城市高层建筑爆破拆除方式的探讨[J]. 工程爆破,2006(4):22-27.
- [2] HUANG Shi-hui. Investigation on methods of blasting demolition of urban high-rise in China[J]. *Engineering Blasting*,2006(4):22-27. (in Chinese)
- [3] 谢先启,贾永胜,黄小武,等. 17层框-剪结构大楼定向爆破拆除[J]. 爆破,2016,33(2):107-112.
- [3] XIE Xian-qi,JIA Yong-sheng,HUANG Xiao-wu,et al. Directional explosive demolition of 17-layer frame-shear structure building[J]. *Blasting*,2016,33(2):107-112. (in Chinese)
- [4] KAZUNORI Fujikake,PEERASAK Aemlaor. Damage of reinforced concrete columns under demolition blasting[J]. *Engineering Structures*,2013(55):116-125.
- [5] 黄小武,谢先启,贾永胜,等. 钢筋混凝土立柱爆破破坏过程及个别飞散物试验研究[J]. 爆破,2020,37(1):13-18.
- [5] HUANG Xiao-wu,XIE Xian-qi,JIA Yong-sheng,et al. Experimental study on failure process and flyrock of reinforced concrete columns induced by blasting[J]. *Blasting*,2020,37(1):13-18. (in Chinese)
- [6] MARIO B,SANTOS A P,GOICOLEA Jos M. Development of practical finite element models for collapse of reinforced concrete structures and experimental validation[J]. *Shock and Vibration*,2017(2017):1-9.
- [7] BERMEJO Castro,MARIO,SANTOS Yanguas,et al. A methodology to calibrate structural finite element models for reinforced concrete structures subject to blast loads[C]//9th International Conference on Structural Dynamics,Eurodyn,2014:3497-3502.
- [8] MUNJIZA,BANGASH A,JOHN T,et al. The combined finite discrete element method for structural failure and collapse[J]. *Engineering Fracture Mechanics*,2004,71(4-6):469-483.
- [9] LOIZEAUX M,OSBORN A E. Progressive collapse-an implosion contractor's stock in trade[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*,2006,20(4):391-402.
- [10] SASANI M,BAZAN M,SAGIROGLU S. Experimental and

- analytical progressive collapse evaluation of actual reinforced concrete structure[J]. *ACI Structural Journal*, 2007, 104(6):731-739.
- [11] MATTHEWS T, ELWOOD K J, HWANG S J. Explosive testing to evaluate dynamic amplification during gravity load redistribution for reinforced concrete frames [C] // *Research Frontiers at Structures Congress*, 2007:16-19.
- [12] 贾永胜, 谢先启, 姚颖康, 等. 高层建筑物折叠爆破拆除关键技术参数探讨[J]. *爆破*, 2016, 33(3):75-80.
- [12] JIA Yong-sheng, XIE Xian-qi, YAO Ying-kang, et al. Discussed on key parameters of folding explosive demolition of high-rise building [J]. *Blasting*, 2016, 33(3):75-80. (in Chinese)
- [13] 李 勇, 汪 浩. 复杂环境下多跨框架不规则高楼的逐跨坍塌爆破[J]. *爆破*, 2005, 22(1):59-61.
- [13] LI Yong, WANG Hao. Span-by-span blasting demolition of an irregular building under complex environment[J]. *Blasting*, 2005, 22(1):59-61. (in Chinese)
- [14] 王洪刚, 姚颖康, 王 威, 等. 复杂环境下楼房纵向逐跨坍塌爆破技术应用[J]. *爆破*, 2020, 37(2):80-84.
- [14] WANG Hong-gang, YAO Ying-kang, WANG Wei, et al. Application of vertical span by span collapse explosive demolition technique in complex environment [J]. *Blasting*, 2020, 37(2):80-84. (in Chinese)
- [15] 刘昌邦, 贾永胜, 黄小武, 等. 异形结构楼房纵向逐跨空中解体爆破拆除[J]. *爆破*, 2019, 36(3):84-89.
- [15] LIU Chang-bang, JIA Yong-sheng, HUANG Xiao-wu, et al. Blasting demolition technology of longitudinal collapse and aerial disintegration for special-shaped building [J]. *Blasting*, 2019, 36(3):84-89. (in Chinese)
- [16] 杨 军, 杨国梁, 张光雄, 等. 建筑结构爆破拆除数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

英文编辑: 赵 亮

(上接第 47 页)

参考文献 (References)

- [1] 朱 晟, 宁志远, 钟春欣, 等. 考虑级配效应的堆石料颗粒破碎与变形特性研究 [J]. *水利学报*, 2018, 49(7):849-857.
- [1] ZHU Sheng, NING Zhi-yuan, ZHONG Chun-xin, et al. Study on particle crush and deformation characteristics considering rockfill gradation effect [J]. *Shuili Xuebao*, 2018, 49(7):849-857. (in Chinese)
- [2] ABBASPOUR H, DREBENSTEDT C, BADRODDIN M, et al. Optimized design of drilling and blasting operations in open pit mines under technical and economic uncertainties by system dynamic modelling [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 28(6):839-848.
- [3] 王 军. 乌龙泉矿降低粉矿率研究与块度图像处理 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2003.
- [3] WANG Jun. The study of reducing power ratio and image-processing Wulongquan open pit mine [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2003. (in Chinese)
- [4] 章征成, 韩新平, 李世丰, 等. 油母页岩爆破粉矿率的控制技术 [J]. *爆破*, 2015, 32(4):84-88.
- [4] ZHANG Zheng-cheng, HAN Xin-ping, LI Shi-feng, et al. Controlling technique of powder ratio in oil shale blasting [J]. *Blasting*, 2015, 32(4):84-88. (in Chinese)
- [5] 刘玲平, 唐 涛, 李萍丰, 等. 装药结构对台阶爆破粉矿率的影响研究 [J]. *采矿技术*, 2010, 10(1):67-70.
- [5] LIU Ling-ping, TANG Tao, LI Ping-feng, et al. Study on the influence of charge structure on the rate of powder blasting in step blasting [J]. *Mining Technology*, 2010, 10(1):67-70. (in Chinese)
- [6] 邢光武, 郑炳旭. 特大型采石场粉矿率控制研究 [J]. *矿业研究与开发*, 2009, 29(3):77-79.
- [6] XING Guang-wu, ZHENG Bing-xu. Study on the control of fine ore rate in extra large quarry [J]. *Mining Research and Development*, 2009, 29(3):77-79. (in Chinese)
- [7] 蔡建德, 郑炳旭, 汪旭光, 等. 多种规格石料开采块度预测与爆破控制技术研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(7):1462-1468.
- [7] CAI Jian-de, ZHENG Bing-xu, WANG Xu-guang, et al. Research on blasting control technique and block size prediction of different dimensions stones [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(7):1462-1468. (in Chinese)
- [8] 汪旭光. 爆破设计与施工 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [9] 于亚伦. 工程爆破理论与技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [10] 郭连军, 董丰德, 张大宁, 等. 大连石灰石新矿爆破优化试验研究 [J]. *爆破*, 2012, 29(3):45-49.
- [10] GUO Lian-jun, DONG Feng-de, ZHANG Da-ning, et al. Experimental research on blasting optimization in Dalian new limestone mine [J]. *Blasting*, 2012, 29(3):45-49. (in Chinese)
- [11] 刘 庆, 康 强, 赵明生. 采石场空气间隔装药数值模拟及应用 [J]. *爆破*, 2013, 30(3):65-69.
- [11] LIU Qing, KANG Qiang, ZHAO Ming-sheng. Numerical-simulation and application of air deck charging in quarry [J]. *Blasting*, 2013, 30(3):65-69. (in Chinese)
- [12] 叶海旺, 康 强, 赵明生, 等. 节理裂隙岩体空气间隔装药爆破试验研究 [J]. *爆破*, 2012, 29(2):26-30, 37.
- [12] YE Hai-wang, KANG Qiang, ZHAO Ming-sheng, et al. Experimental study on air-decking charging explosion in jointed and fractured rock mass [J]. *Blasting*, 2012, 29(2):26-30, 37. (in Chinese)

英文编辑: 柯 波