

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.017

爆破切口高度对小高宽比框架结构 爆破拆除效果的影响*

高文乐¹,王燕萍¹,刘志成¹,李元振²,李传水³,吴超³

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院,青岛 266590;2. 山东房源实业集团有限公司,临沂 276004;
3. 枣庄市金星爆破有限公司,枣庄 277021)

摘要: 为进一步研究爆破切口高度对小高宽比框架结构倒塌效果的影响规律,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件,通过建立分离式共节点钢筋混凝土框架结构模型,根据倒塌角理论,依次取倒塌角为 20°、25°、30°、35°、35°(松动爆破)、40°。对 6 种不同爆破切口下结构的倒塌效果进行模拟,将数值模拟结果导入到后处理软件 LS-PrePost 中进行处理,将 1 s 作为时间间隔,以结构竖向塌落速度小于 200 mm/s 为倒塌完成时刻并与工程实际进行对比。研究结果表明:随着爆破切口高度的增加,积累能量也就越多,结构的后坐距离也不断增加,且增速呈上升趋势;而爆堆高度和爆破切口的高度成反比,且随切口高度的增加逐渐趋于稳定。对爆破拆除小高宽比框架结构的类似工程要尽量避免过大的爆破切口高度,合适的爆破切口高度为上仰夹角在 30°~35°。

关键词: 框架结构;分离式共节点;爆破切口;数值模拟;爆破拆除

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)02-0114-08

Influence of Blasting Cut Height on Demolition Blasting Effect of Frame Structure with Small height-width Ratio

GAO Wen-le¹, WANG Yan-ping¹, LIU Zhi-cheng¹, LI Yuan-zhen², LI Chuan-shui³, WU Chao³

(1. Department of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Shandong Fangyuan Industry Group Co., Ltd., Linyi 276004, China; 3. Zaozhuang Jinxing Blasting Co., Ltd., Zaozhuang 277021, China)

Abstract: In order to further study the influence of blasting cut height on the collapse effect of frame structure with small height-width ratio, ANSYS/LS-DYNA finite element software was used to establish the model of reinforced concrete frame structure with common joints. According to the collapse angle theory, the collapse angles were set as 20°, 25°, 30°, 35°, 35° (loose blasting) and 40° respectively. The collapse effect of the structure under six different blasting incisions was simulated, and the numerical simulation results were imported into the post-processing software LS-PREPOST for processing. The time interval was one second, and the vertical collapse speed of the structure was less than 200 mm/s as the completion time of the collapse, and the comparison was made with the actual engineering. The results show that with the increase of the blasting cut height, the accumulated energy is more, the recoil distance of the structure is also increased, and the growth rate is on the rise. The height of blasting pile is inversely proportional to the height of blasting cut and tends to be stable with the increase of cut height. For similar projects of blasting demolition of frame structures with small height-width ratio, excessive blasting cut height should be avoided as far as possible, and the appropriate elevation angle for blasting cut the should be between 30° and 35°.

Key words: frame structure; separated joints; blasting cut height; numerical simulation; blasting demolition

不同的爆破切口高度直接影响结构倒塌效果的好坏、爆破塌落振动的强弱以及飞石范围的大小。许多学者通过数值模拟对此进行了一系列的研究,王涛等采用分离式共节点钢筋混凝土模型对爆破拆除过程进行了数值模拟^[1],发现采用分离式共节点模型更能体现出钢筋和混凝土的力学性能差异,结构触地情况更接近于实际;张耀良等对复杂环境下框剪结构进行研究^[2],提出了减小建筑物后坐距离的方法;姜建武、张伟新等对小爆破切口与合理的延时时间进行研究^[3],框架结构建筑物利用小爆破切口加之合理的延时时间可以对楼房的倒塌后坐有很好的的控制作用;汪小艳采用预先切割改变楼房高宽比^[4],进而提高倾覆力的方法爆破拆除小高宽比楼房;杨帆、张新宇等发现在拆除爆破中^[5],结构倒塌时势能转换过快易引起后坐;王威、贾永胜等发现采用抬高爆破切口至2层^[6],切口后排立柱不钻孔爆破的方案,可以有效防止或减少框架结构楼体后坐现象;马建军等对框架结构定向爆破进行分析^[7],爆破切口高度选择在框架结构重心的1/2处,产生的后坐较小在拆除爆破中;近几年框架结构的拆除技术得到了更好的发展^[8-10]。选择合适的爆破切口高度能很大程度地提高爆破质量,获得更好的爆破效果。

爆破切口高度作为拆除爆破的一个重要参数,选取过小会出现爆而不倒的情况,选取过大则会引起严重的后坐。为寻找合适的爆破切口高度参数,本文利用 ANSYS/LS-DYNA 软件,改变爆破切口的高度,对不同切口高度的同一建筑物进行数值分析,然后通过对比不同爆破切口高度建筑物的倒塌过程,确定适用于小高宽比框架结构爆破拆除的切口高度,为以后类似工程提供指导建议。

1 结构倒塌过程理论分析

1.1 倒塌角理论

对于框架、框剪等整体性比较强的建筑物,一般倒塌解体较难满足。对于砖混结构在倒塌运动过程中就可能倾覆解体,为了能够使整体性较强的建筑物在与地面接触时能够解体,需要保证建筑物上体在切口闭合前有一定的动能^[11]。落地冲击变形速

度计算公式为

$$H \geq v^2/2g \quad (1)$$

式中: v 为切口闭合时的结构冲击地面的速度。

由于按照上式(1)各种结构的速度下限值计算出来的建筑物爆破切口高度一般只能使结构失稳倒塌,结构触地后解体不充分,特别是建筑物高宽比较小的结构,还有可能会出现爆而不倒的现象^[12]。如图1所示,利用上仰夹角 β 对高宽比较小的结构选取爆破切口高度,在实际工程中效果良好。根据大量统计,框架结构楼房爆破拆除时上仰角设置为 $25^\circ \sim 35^\circ$ 爆破效果较好,其计算公式为

$$H = B \tan \beta \quad (2)$$

式中: B 为底部结构宽度; H 为满足爆破切口的最大高度; β 为上仰夹角。

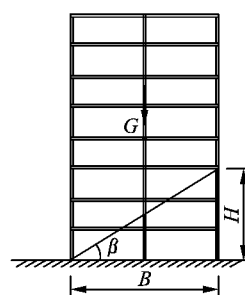


图1 框架结构倒塌角理论示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cut height for overturning and disintegration of frame structure

1.2 结构倒塌数学运动模型

在建筑物的爆破拆除中,其机构运动复杂,可以通过多体系统动力学方程来体现^[13,14]。

$$\left. \begin{aligned} J_{b_2} \ddot{\varphi}_2 + m_2 r_2 l_1 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \ddot{\varphi}_1 + \\ m_2 r_2 l_1 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \dot{\varphi}_1^2 = m_2 g r_2 \sin \varphi_2 + M_2 \\ m_2 r_2 l_1 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \ddot{\varphi}_2 + m_2 l_1^2 \ddot{\varphi}_1 - \\ m_2 r_2 l_1 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \dot{\varphi}_1^2 = m_2 g r_2 \sin \varphi_2 + \\ m_1 g r_1 \varphi_1 + M_1 - M_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\varphi_1, \dot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_1$ 为下体的欧拉角、角速度和角加速度; $\varphi_2, \dot{\varphi}_2, \ddot{\varphi}_2$ 为上体的欧拉角、角速度和角加速度; m_1, m_2 为下体和上体的质量; r_1 为质心与下铰的距离; J_{b_2} 为质心对下铰的转动惯量; l_1 为下体两端塑性铰的距离, $m; M_1, M_2$ 为上、下铰的抵抗弯矩,正、负与 φ_2 和 φ_1 相同。

建筑物在爆破切口形成后可以看成上体和下体两个部分,切口上面的部分称为上体,切口以下的支撑部分称为下体,如图2所示。

由于在实际工程中,下体部位的墙体全部拆除,只

收稿日期:2022-01-30

作者简介:高文乐(1966-),男,教授、硕士,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。

通讯作者:王燕萍(1997-),男,硕士生,主要从事岩土力学和爆破安全技术的研究工作,(E-mail) yanpingsean@163.com。

基金项目:国家自然科学基金(51874189)

保留梁、板、柱,对于整个建筑结构来说下体质量所占比重非常少,因此,上体的结构重力弯矩 $m_2gr_2 \sin \varphi_2$ 比下体支撑立柱两端的塑性铰弯矩 M_1 和 M_2 大,故可以忽略 m_1 、 M_1 和 M_2 。对式(3)进行简化如下

$$\left. \begin{aligned} J_b \ddot{\varphi}_2 + m_2 r_2 l_1 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \ddot{\varphi}_1 + \\ m_2 r_2 l_1 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \dot{\varphi}_1^2 = m_2 g r_2 \sin \varphi_2 \\ m_2 r_2 l_1 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \ddot{\varphi}_2 + m_2 l_1^2 \ddot{\varphi}_1 - \\ m_2 r_2 l_1 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \dot{\varphi}_1^2 = m_2 g r_2 \sin \varphi_1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

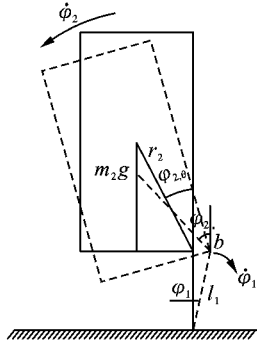


图2 多体系统结构倒塌示意图

Fig. 2 Schematic diagram of collapse of multi-body system

2 工程实例及方案选取

待拆除酒店位于烟台市开发区,该建筑物主楼8层(局部10层),主楼高36.4 m,长95.3 m,宽17.3 m。该建筑立柱截面尺寸大,且立柱有多个截面尺寸,建筑物高宽比1.77,为高宽比较小的框架结构,所以整体稳定性更强。为了探究不同爆破切口高度对结构倒塌效果的影响,只对爆破切口高度

进行适当的改变,在实际爆破切口高度的基础上,增加一系列方案对比。

根据倒塌角理论,分别取上仰夹角 β 为 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 以及实际爆破拆除时所采用的切口高度,根据实际爆破拆除方案建立的模型为方案4。将建筑物1~3层分别设置成三角形切口,最后一排立柱第1层底部0.4 m范围内和第一排立柱第4层下部1.5 m范围内进行松动爆破,第一排立柱1~3层、连接梁、4层松动爆破区域,延期时间50 ms;中间立柱1~2层,延期时间460 ms;第三排立柱,底部进行松动爆破,延期时间880 ms。各个方案的爆破切口高度如表1所示。

表1 不同方案爆破切口高度

Table 1 Blasting cut height of different schemes

爆破切口高度方案	上仰夹角 $\beta/^\circ$	爆破切口高度/m
方案1	20	6.3
方案2	25	8.1
方案3	30	10.1
方案4	30+1.5 m (松动爆破)	10.1+1.5 m (松动爆破)
方案5	35	12.2
方案6	40	14.5

建筑物后排立柱均在距地面0.4 m范围内进行松动爆破,在松动爆破范围内只对混凝土单元删除而保留钢筋单元,其6个爆破切口方案示意图如图3所示。通过研究不同切口高度对框架结构倒塌过程、后坐距离和爆堆高度的影响,寻找合理的爆破切口参数。

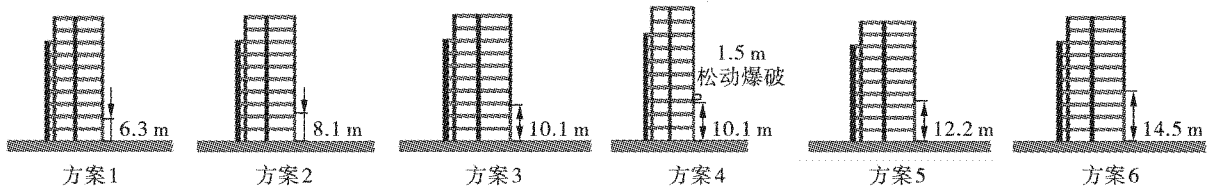


图3 不同爆破切口高度方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of different blasting cut height schemes

3 计算模型

利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对待拆除酒店进行等比例建模,为了更好地模拟实际的倒塌效果,本文采用分离式共节点进行建模。柱、梁等构件采用 SOLID164,板构件采用 SHELL163,钢筋选择 BEAM161,地面选择刚性材料,采用 SOLID164 单元采用规则六面体映射网格进行网格划分^[15],网格尺寸为0.2 m。在建模过程中,考虑到墙体的存在,将

墙体的密度增加到板之上,因此模型中板的密度会略大于实际板的密度。

钢筋和混凝土采用塑性随动材料模型,各材料的力学性能参数如表1所示。地面采用 LS-DYNA 提供的刚性材料模型 * MAT-RIGID 定义,并约束其所有自由度。对于爆破切口部分通过关键字 * MAT_ADD_EROSION 进行控制,由于结构在倒塌过程中的接触非常复杂,选用 * CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE 定义混凝土与地面的接触,为了防

止钢筋穿透地面,采用 * CONTACT_NODES_TO_SURFACE 控制钢筋与地面的接触^[16,17]。模拟时设定材料的动摩擦系数和静摩擦系数为 0.6。

表 2 材料的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of materials

名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	拉伸极限/ MPa
钢筋	7850	210	0.3	320
梁、柱	2400	30	0.2	5.2
板	3400	30	0.2	5.2

4 数值模拟及分析

对爆破过程进行了模拟,模拟结果与实际爆破结果高度一致,具体模拟结果如图 4 所示,由此可见该模拟具有较强的可靠性与合理性,在此基础上对其进行进一步研究。

4.1 不同爆破切口高度倒塌过程对比

对表 1 中的方案分别计算,然后将数值计算结果导入到后处理软件 LS-PrePost 中进行处理,以 1 s 为间隔分别对 6 种方案数值计算结果进行处理,最后以结构竖向塌落速度小于 200 mm/s 为倒塌完成时刻,不同切口高度爆破倒塌过程如图 5 所示。

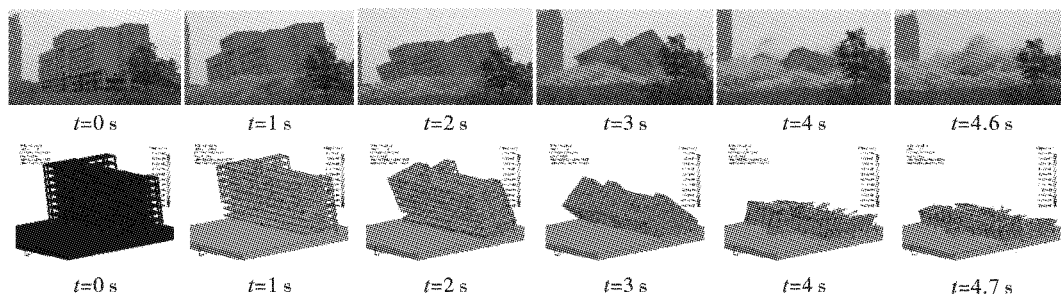


图 4 实际工程爆破及数值模拟倒塌过程

Fig. 4 Collapse process of practical engineering blasting and numerical simulation

从图 5 可知,6 种不同爆破切口高度的设计方案都能按照预先设定的方向完成定向倒塌,并且都经历切口形成、失稳倾覆、切口闭合和触地解体四个阶段^[18]。切口高度较小的模型首先会达到切口闭合状态,进入触地解体阶段,由于切口闭合阶段积累能量较少,且中间排立柱截面尺寸较大,切口闭合后无法使构件的碰撞发生大规模的破坏,使得建筑物会以中间排立柱爆破后剩余部分以及第一排立柱与地面接触部分为轴,作定向倒塌运动,方案 1、2 属于此类。而对于切口高度较大的模型达到切口闭合状态要更久一点,所以自身就可以积累更多的能量,在达到切口闭合状态后由于自身积累的能量足够多,上部结构与地面冲击接触后会出现解体,而建筑物将在后排立柱连接处形成的“塑性铰”和切口闭合后与大地接触部位为轴^[19],中间截面立柱将与未触地部分作为一个整体作倾覆倒塌运动,方案 3、4、5、6 属于此类型。

从上面 6 个有限元模型的数值分析可以看出,无论有限元模型切口高度的大小,其在支撑立柱切口部分单元删除后,横向支撑构件(楼板和梁)近似处于悬挑状态^[20]。在梁、板与柱结合的地方,梁、板受到很大的拉力,而且在抵抗破坏方面的能力,柱要远远大于梁、板,所以梁、板等横向支撑构件会先发生破坏^[21]。当采用的爆破切口高度较大时,例如方案 6,结构横向支撑的破坏程度要远比方案 1 破坏严重,横向支撑过早破坏会影响结构的整体性,导致结构触地解体后出现较大的后滑,随着结构倒塌运动,爆破切口较高的方案其后排支撑立柱的断裂部位也较高,对后坐距离会产生较大的影响。

4.2 倒塌过程速度对比

为了更加直观地对上述 6 种方案爆破倒塌过程进行比较,选取各个模型中建筑物顶部同一部位的点,作出竖向速度曲线图,如图 6 所示,并根据图 6 作出 6 个方案的竖向速度最大值,如表 3 所示。

表 3 不同爆破切口高度竖向速度最大值

Table 3 Aximum vertical velocity of different blasting cut heights

爆破切口高度/m	6.3	8.1	10.1	10.1 + 1.5 (松动爆破)	12.2	14.5
竖向速度最大值/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.43×10^4	1.48×10^4	1.51×10^4	1.52×10^4	1.55×10^4	1.57×10^4

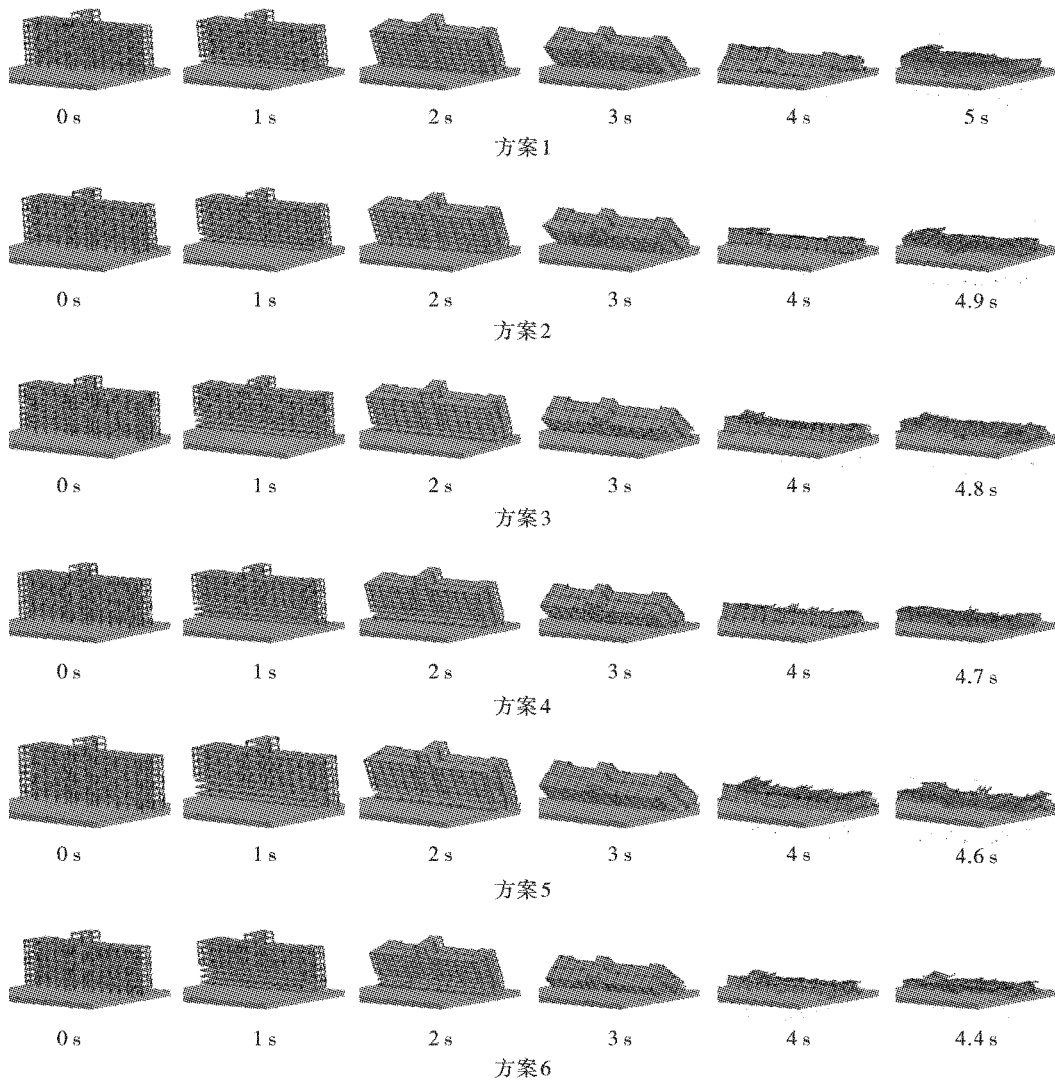


图5 不同爆破切口高度数值模拟倒塌示意图

Fig. 5 Numerical simulation collapse diagram of different blasting cut height

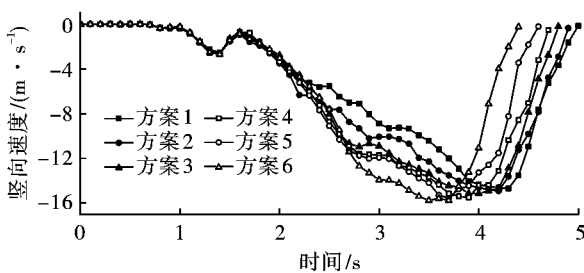


图6 不同爆破切口高度的竖向速度曲线

Fig. 6 Vertical velocity corresponding to different blasting cut heights

从图6可以看出,在0~2.1 s之间,6个方案的竖向速度基本相同。在2.1 s后,不同方案的竖向速度发生了显著变化,由于爆破切口高度不同,导致每个方案的切口闭合时间不一致,切口闭合后上部结构与地面接触阻止了上部结构向下运动。随着爆破切口高度的增加切口闭合时间也在增加,方案1

是最早出现切口闭合的大约在2.1 s左右,方案6是最晚出现切口闭合的大约在2.9 s左右,切口闭合越晚相对来说积累的能量也就越多。方案1到方案3以及方案5在切口闭合后出现了明显的竖向速度不增长或逆增长的状态,而方案6没有出现这样的现象,这是由于其在空中积累能量过多,切口闭合后上部结构在与地面接触时没有消耗过多能量就达到解体状态。方案4由于第4层立柱下部1.5 m进行松动爆破,切口闭合后竖向速度出现先增加到稳定的变化。

切口闭合后进入触地解体阶段,由于切口高度不同,导致结构在空中积累能量不同,克服上部结构阻力也不同。积累能量多的反而受到上部阻力小,随着爆破切口的增大各个方案上部结构触地解体的时间在减小,达到最大速度的时间也在减小,但达到的最大速度在增大。不同切口高度使得建筑物在切

口闭合阶段和触地解体阶段的时间不同,随着切口高度的增大,积累能量也就越多,在触地解体时会产生大量的爆破碎石飞溅,对后坐距离的影响也非常大,所以要避免爆破切口过大。

4.3 不同爆破切口高度对后坐距离的影响

为了更加直观研究不同爆破切口对后坐的影响,对6种有限元模型的爆堆状态进行处理,然后对6种方案的后坐距离计算分析,计算结果见表4。为了体现后坐距离随不同爆破切口高度的变化,将表4做成折线图,如图7所示。

从图7可以看出切口高度在6.3~12.2 m时,后坐距离随爆破切口高度的增大上升缓慢,后坐距离增幅不大;切口高度在12.2~14.5 m时,后坐距离随爆破切口高度的增大上升较快,后坐距离增幅

变大。上仰角 β 从 25° (切口高度8.1 m)增加到 30° (切口高度10.1 m),其后坐距离增大了10.6%,而 β 从 35° (切口高度12.2 m)增加到 40° (切口高度14.5 m),其后坐距离却增加了49.4%,说明随爆破切口高度增大后坐距离增大速度明显加快。当爆破切口高度较大时,建筑物在空中运动时间就会增加,导致切口闭合时其倾斜角度增大,从而增大了上部结构的向后水平推力 F 。根据公式(5)可以看出,后水平推力 F 增大导致结构的后滑严重,使后坐距离变大。随着切口高度增加,塑性铰产生的部位将不断升高,在塑性铰位置下侧的支撑立柱向设计倾倒的反方向运动,而发生机构后坐现象。随着爆破切口高度增大,机构后坐和后滑现象都会加重,从而使建筑物产生较大的后坐距离。

表4 不同爆破切口高度对应的后坐距离

Table 4 Recoil distances corresponding to different blasting cut heights

爆破切口高度/m	6.3	8.1	10.1	10.1+1.5 (松动爆破)	12.2	14.5
后坐距离/m	4.82	5.37	5.94	6.72	7.15	10.68

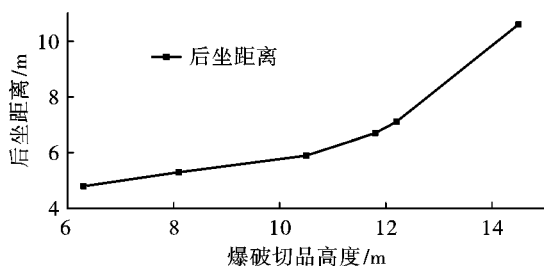


图7 爆破切口高度与后坐的关系

Fig. 7 Relationship between blasting cut height and backseat

通过对上述6种方案对比可以看出爆破切口高度较高时容易出现较大的后坐距离,为了减小后坐距离且要保证结构能够定向倒塌,对于高宽比小的框架结构楼房要使得爆破切口角度在 $20^\circ \sim 35^\circ$ 范围内。

4.4 不同爆破切口高度对爆堆高度的影响

同样为了研究不同爆破切口对爆堆高度的影响,对6种方案的爆堆高度进行分析计算,不同方案的爆堆高度见表5。为了体现爆堆高度随不同爆破切口高度的变化,将表5作成折线图,如图8所示。

表5 不同爆破切口高度对应的爆堆高度

Table 5 Pile height corresponding to different blasting cut height

爆破切口高度/m	6.3	8.1	10.1	10.1+1.5 (松动爆破)	12.2	14.5
爆堆高度/m	10.52	9.63	8.26	7.83	7.72	7.34

由图8可知,切口高度在6.3~10.1 m时,爆堆高度随切口高度的增加明显减小;而切口高度在10.1~14.5 m时,爆堆高度随切口高度的增加趋于平缓。上仰角 β 从 25° 增加到 30° ,其爆堆高度减小14.2%,而 β 从 35° 增加到 40° ,其爆堆高度只减小了4.9%。对6种方案倒塌过程的分析可知,当切口高度较小时,结构在切口闭合阶段积累能量较少,切口闭合后无法使构件的碰撞发生大规模的破坏,使得上部结构会以中间排立柱爆破后剩余部分以及

第一排立柱与地面接触部分为轴,作定向倾倒运动,这样仅仅使前排立柱的动能较高,结构触地后会迅速前倾倒塌,使得结构受力不均故而其爆堆较高。随着爆破切口的增大,在爆破切口闭合阶段积累能量较多,中间排立柱被爆后剩余立柱上部与其他构件接触后上部结构被折断。因此其切口较大的方案将以最后排立柱连接处形成的塑性铰和切口闭合后与大地接触部位为轴,做倾覆倒塌运动。此时,整个结构的动能分布均匀,上部结构触地后会使得构件发

生大规模碰撞而破坏,故其爆堆高度较小。当爆破切口高度继续增加后,虽然爆破切口闭合阶段能量继续积累,但是此时,整个结构的动能分布均匀加上解体后结构的堆积,使得随爆破高度增加爆堆高度趋于平缓。通过对上述6种方案对比可以看出爆破切口高度较低时容易出现较高的爆堆高度,为了使结构解体充分且要保证结构能够定向倒塌,对于高宽比小的框架结构楼房要使得上仰夹角 β 在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 范围内。

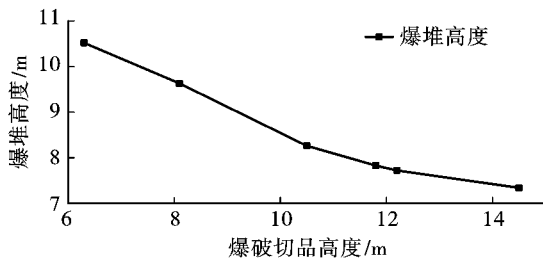


图8 爆破切口高度与爆堆高度的关系

Fig. 8 Relationship between blasting cut height and blasting pile height

5 结论

通过对6种方案的倒塌过程、后坐距离以及爆堆高度的比较,分析出比较合适的爆破切口高度。主要得出的结论有:

(1)不同切口高度不会影响建筑物倒塌的具体过程,只是不同切口高度使得建筑物在切口闭合阶段和触地解体阶段的时间不同。随着切口高度的增大,积累能量也就越多,结构达到的最大速度也在增加,但达到最大速度的时间在减小,爆破拆除触地振动来源于结构动能,对地面振动影响最大的就是结构的竖向速度,在触地解体时会产生大量的爆破碎石飞溅,对后坐距离也有较大的影响,所以要避免爆破切口过大。

(2)爆破切口高度在 $6.3 \sim 12.2$ m时,后坐距离随爆破切口高度的增大上升缓慢,后坐距离增幅不大;切口高度在 $12.2 \sim 14.5$ m时,后坐距离随爆破切口高度的增大上升较快,后坐距离增幅变大。为了确保楼体结构定向倒塌,且产生的后坐距离又较小,对于高宽比小的框架结构楼房要使得上仰夹角 β 在 $20^\circ \sim 35^\circ$ 范围内。

(3)爆破切口高度在 $6.3 \sim 10.1$ m时,爆堆高度随爆破切口的增加明显减小;而爆破高度在 $10.1 \sim 14.5$ m时,爆堆高度随爆破切口的增大趋于平缓。为了确保结构能够定向倒塌、解体充分,对于高宽比小的框架结构楼房要使得上仰夹角 β 在 30°

$\sim 40^\circ$ 范围内。

(4)通过对6种方案的倒塌过程对比、后坐距离以及爆堆高度等比较和分析可以得出,对于高宽比小的框架结构,其合适的爆破切口高度为上仰夹角 β 在 $30^\circ \sim 35^\circ$ 。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [1] WANG Tao, SONG Qing-gang, XIE Chun-ming, et al. Numerical simulation of blasting demolition of a six-story frame structure under explosive load[J]. Blasting, 2014, 31(2):104-107,110. (in Chinese)
- [2] 张耀良,梁晓国,单宝来,等. 复杂环境下框剪高楼拆除爆破技术研究[J]. 工程爆破,2021,27(4):86-93.
- [2] ZHANG Yao-liang, LIANG Xiao-guo, SHAN Bao-lai, et al. Research on demolition blasting technology of frame-shear high-rise buildings in complex environment[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(4):86-93. (in Chinese)
- [3] 娄建武,张伟新,方向. 小爆破切口在框架结构楼房定向爆破拆除中的应用[J]. 工程爆破,2002(3):21-24.
- [3] LOU Jian-wu, ZHANG Wei-xin, FANG Xiang. The application of small blasting cuts in the directional blasting demolition of a frame structure building[J]. Engineering Blasting, 2002(3):21-24. (in Chinese)
- [4] 汪小艳. 复杂环境中小高宽比楼房的爆破拆除研究[J]. 重庆建筑,2021,20(8):53-55.
- [4] WANG Xiao-yan. Research on blasting demolition of buildings with small aspect ratio in complex environment[J]. Chongqing Architecture, 2021, 20(8):53-55. (in Chinese)
- [5] 王威,贾永胜,韩传伟,等. 框架结构楼房定向爆破拆除后坐控制措施及应用[J]. 爆破,2021,38(2):105-110,117.
- [5] WANG Wei, JIA Yong-sheng, HAN Chuan-wei, et al. Control measures and application of recoil in directional blasting demolition of a frame structure building[J]. Blasting, 2021, 38(2):105-110,117. (in Chinese)
- [6] 杨帆,张新雨,胡坤伦,等. 大跨距高楼房爆破拆除控制技术与倒塌形态分析[J]. 爆破,2021,38(1):87-92.
- [6] YANG Fan, ZHANG Xin-yu, HU Kun-lun, et al. Blasting control technology and collapse morphology analysis of large-span high-rise buildings[J]. Blasting, 2021, 38(1):87-92. (in Chinese)
- [7] 马建军,田水龙,钟冬望,等. 爆破切口高度对框架结

- 构后坐影响的数值分析[J]. 爆破, 2018, 35(1): 116-122.
- [7] MA Jian-jun, TIAN Shui-long, ZHONG Dong-wang, et al. Numerical analysis of the influence of blasting cut height on the recoil of frame structure [J]. *Blasting*, 2018, 35(1): 116-122. (in Chinese)
- [8] 罗伟, 王明明, 刘治兵. 11层框架结构楼房爆破拆除[J]. *煤矿爆破*, 2020, 38(4): 34-38.
- [8] LUO Wei, WANG Ming-ming, LIU Zhi-bing. Demolition of an 11-story frame structure building by blasting [J]. *Coal Mine Blasting*, 2020, 38(4): 34-38. (in Chinese)
- [9] 刘伟, 叶家明, 胡彬, 等. 高强度钢筋混凝土结构楼房拆除爆破及数值模拟[J]. *安徽理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(2): 19-27.
- [9] LIU Wei, YE Jia-ming, HU Bin, et al. Demolition and numerical simulation of high-strength reinforced concrete buildings [J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 40(2): 19-27. (in Chinese)
- [10] 泮红星. 52 m高喷煤车间定向爆破拆除[J]. *工程爆破*, 2019, 25(1): 45-50.
- [10] PAN Hong-xing. 52 m high coal injection workshop directed blasting demolition [J]. *Engineering Blasting*, 2019, 25(1): 45-50. (in Chinese)
- [11] 蒋耀港, 沈兆武, 龚志刚. 构筑物爆破拆除振动规律的研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(5): 36-41.
- [11] JIANG Yao-gang, SHEN Zhao-wu, GONG Zhi-gang. Research on the vibration law of demolition of structures by blasting [J]. *Vibration and Shock*, 2012, 31(5): 36-41. (in Chinese)
- [12] 周凤仪, 吴克刚, 邹亮. 楼房定向爆破切口高度设计实践[C]//中国工程爆破协会、中国力学学会. 中国爆破新技术II, 2008: 3.
- [12] ZHOU Feng-yi, WU Ke-gang, ZOU Liang. Design practice of cut height in directional blasting of buildings [C] // China Engineering Blasting Association, Chinese Society of Mechanics. *New Technology of China Blasting II*, 2008: 3. (in Chinese)
- [13] 傅建秋, 魏晓林, 汪旭光. 建筑爆破拆除动力方程近似解研究(1)[J]. *爆破*, 2007, 24(3): 1-6.
- [13] FU Jian-qiu, WEI Xiao-lin, WANG Xu-guang. Research on the approximate solution of the dynamic equation of building blasting demolition (1) [J]. *Blasting*, 2007, 24(3): 1-6. (in Chinese)
- [14] 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [14] HONG Jia-zhen. *Computational multibody system dynamics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. (in Chinese)
- [15] 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.
- [15] LI Qing, YANG Yang, YANG Ren-shu, et al. Numerical simulation of blasting demolition of reinforced concrete structures based on MAT96 constitutive model [J]. *Blasting Equipment*, 2015, 44(1): 41-45. (in Chinese)
- [16] 杨军, 杨国梁, 张光雄. 建筑结构爆破拆除数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [16] YANG Jun, YANG Guo-liang, ZHANG Guang-xiong. *Numerical simulation of building structure demolition by blasting* [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [17] 白金泽. LS-DYNA3D理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [17] BAI Jin-ze. *LS-DYNA3D theoretical basis and case analysis* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [18] 叶海旺, 李庆, 郑长青, 等. 22层框架楼房定向爆破拆除倒塌过程分析[J]. *爆破*, 2021, 38(2): 111-117.
- [18] YE Hai-wang, LI Qing, ZHENG Chang-qing, et al. Analysis of collapse process of 22-story frame building by directional blasting [J]. *Blasting*, 2021, 38(2): 111-117. (in Chinese)
- [19] 费鸿禄, 高建军, 张超逸, 等. 冷却塔爆破拆除塔壁触地解体规律研究[J]. *爆破*, 2019, 36(4): 86-95.
- [19] FEI Hong-lu, GAO Jian-jun, ZHANG Chao-yi, et al. Research on the disintegration law of the tower wall contacting the ground when the cooling tower is demolished by blasting [J]. *Blasting*, 2019, 36(4): 86-95. (in Chinese)
- [20] 何晓成. 多层建筑物爆破拆除倒塌过程模拟研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2016.
- [20] HE Xiao-cheng. *Simulation study on collapse process of multi-storey building demolition by blasting* [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016. (in Chinese)
- [21] 马世明, 余兴春, 任少华, 等. 复杂环境下14层框剪楼房折叠拆除爆破[J]. *工程爆破*, 2021, 27(1): 69-73, 78.
- [21] MA Shi-ming, YU Xing-chun, REN Shao-hua, et al. Folding and demolition of a 14-story frame-shear building in a complex environment [J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(1): 69-73, 78. (in Chinese)