

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.013

框剪结构楼房爆破拆除倾倒过程摄影分析

侯云锋¹, 郑长青¹, 李庆²

(1. 珠海爆破新技术开发有限公司, 珠海 519000; 2. 中冶武勘工程技术有限公司, 武汉 430080)

摘要: 爆破拆除法因具有经济、高效、安全风险低的特点, 目前依然是拆除高大建筑物的首选方式。而城镇拆除爆破, 由于周边环境复杂, 楼房结构形式复杂多样, 对施工技术、安全、环保要求的提高, 给爆破拆除带来了新的挑战。为了优化爆破方案, 目前多从爆破理论和数值模型出发, 以正向数值模拟研究为主, 而对研究倒塌机理具有重要意义的倒塌过程的分析很少。为探究框剪结构楼房爆破拆除定向倾倒过程的运动和解体规律, 结合某一22层框剪结构楼房的爆破拆除, 搭建了一套经济适用的照片采集系统, 成功拍摄出一组适合于倾倒过程分析的高清连拍照片, 采用现有成熟的 AutoCAD 软件平台并结合二次开发, 建立影像分析框架, 提取了特定观测点的时空数据信息, 经计算分析, 绘制了观测点的位移、速度、加速度、瞬时速度、瞬时加速度时程曲线, 揭示了框剪结构楼房爆破倾倒振动向下的运动规律, 下坠过程中楼体内部结点在高达 20 g 以上的冲击载荷作用下导致结构破坏的解体机理, 拟合了类似框剪结构楼房倾倒过程中楼顶前沿观测点的运动轨迹公式, 根据倾倒过程中楼顶前沿点所在高度, 可预测倾倒过程中楼顶的水平位移情况, 并最终预测楼体的倒塌范围。相关的分析过程、数据成果及倒塌预测模型, 可为类似结构楼房爆破倾倒范围预测提供参考。

关键词: 框剪结构; 爆破拆除; 倾倒过程; 摄影分析; 数据分析

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)04-0100-08

Photographic Analysis of Dumping Process of Frame-shear Structure Building by Blasting

HOU Yun-feng¹, ZHENG Chang-qing¹, LI Qing²

(1. Zhuhai New Technology Development of Blasting Co., Ltd., Zhuhai 519000, China;

2. WSGRI Engineering & Surveying Incorporation Limited, Wuhan 430080, China)

Abstract: Demolition by blasting is still the first choice for tall buildings due to the characteristics of economy, efficiency and low safety risk. However, the improvement of construction technology, safety and environmental protection requirements has brought new challenges to the demolition of urban blasting because of the complex surrounding environment and complex building structure forms. In order to optimize the blasting scheme, at present, the forward numerical simulation research is mainly based on the blasting theory and numerical model, while the analysis of the collapse process which is of great significance to the study of collapse mechanism is rarely done. To explore the orientation of blasting demolition of frame shear structure building movement and the collapse of the law of the dumping process, combining with a 22 floors frame-shear structure for blasting demolition of buildings, building a set of economy applicable image acquisition system, successfully taken out a set of suitable for dumping process analysis of high-definition pictures in a row, using the existing mature AutoCAD software platform and combined with secondary development, An image analysis framework is established to extract the spatio-temporal data of a specific observation point. Through calculation and analysis, the time history curves of displacement, velocity, acceleration, instantaneous

收稿日期: 2022-09-23

作者简介: 侯云锋(1982-), 男, 双学士, 矿物资源工程, 从事爆破设计与施工及爆破安全技术应用研究, (E-mail) 93339777@qq.com。

通讯作者: 郑长青(1963-), 男, 教授级高级工程师、博士, 从事爆破理论及爆破技术应用研究, (E-mail) zh-bp@163.com。

velocity and instantaneous acceleration of the observation points are drawn, which reveal the downward motion law of the blasting dumping vibration of the frame-shear structure building, and the disintegration mechanism of the structure failure caused by the impact overload of more than 20 g at the internal joints of the building during the falling process. The motion trajectory formula of the observation point on the roof front during the toppling process of a similar frame-shear structure building is fitted. According to the height of the front point of the roof during the toppling process, the horizontal displacement of the roof during the toppling process can be predicted, and the collapse range of the building can be predicted finally. The related analysis process, data results and collapse prediction model can provide reference for the prediction of the collapse range of buildings with similar structures.

Key words: frame-shear structure; blasting demolition; dumping process; photographic analysis; data analysis

在各类施工机械大发展的今天,爆破拆除法因具有经济、高效、安全风险低的特点,目前依然是拆除高大建筑物的首选方式。而城镇拆除爆破,由于周边环境复杂,楼房结构形式复杂多样,对施工技术、安全、环保要求的提高,给爆破拆除带来了新的挑战^[1-3]。爆破拆除方案的设计又依赖于理论指导和工程经验,为了优化爆破方案,提高爆破的安全性和可靠性,当前多采用数值模拟方法进行优化或参考类似工程经验。

崔正荣等为了确定原地坍塌爆破方案的最小爆破高度^[4],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^[5],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^[6],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。

数值模拟,是从爆破理论和数值模型出发,对项目进行的正向模拟研究,尽管很多学者对爆破拆除的数值模拟做了很多工作,但是,由于高层楼房结构复杂多样,各种楼房在爆破拆除的倾倒运动规律及破坏解体机理极其复杂,对模拟参数的准确选取不易,且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。叶海旺等利用数值模拟对框架结构楼房爆破拆除倒塌过程进行了模拟^[7],应用于具体项目,并将模拟的倒塌过程与倒塌结果与实际结果进行了对比,实现了较好的效果。部分学者采用摄影技术来获取建筑物的运动参数,崔晓荣等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^[8-10],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^[11],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。

依托一成功的 22 层框剪结构楼房爆破拆除项目,采用摄影分析技术,建立了一种经济、实用、简便且可靠的图像采集系统,运用数字化分析方法,通过一组高级数码相机拍摄的连续高清数码图片,捕捉楼体倾倒运动过程中特定观测点的运动轨迹,根据运动学公式进行数值计算和可视化分析,绘制了楼顶前沿观测点水平、竖直方向上的位移、速度、加速度、瞬时速度、瞬时加速度时程曲线,揭示了框剪结构楼房爆破倾倒过程中振动塌落的运动规律和内部结点高达 20 g 过载引起结构破坏的解体机理。同时通过近景摄影,结合实际的运动轨迹、爆堆范围等总结了类似楼房的倾倒的爆堆范围、飞散距离计算公式,可供类似项目参考。

1 系统介绍

1.1 前端采集系统组成

本系统主要对象包括:具有连拍和毫秒级计时功能的高清数码相机、拍摄机架、拍摄对象、参照(示踪)对象、摄影无人机、图像标定与数据提取软件、数据分析软件。

分析机位选择在位于楼房倾倒的垂直方向,选好水平、竖直向尺寸参照,定点、定平、定焦后,自起爆前到爆破倾倒完毕的全过程进行高清连拍。楼房倾倒完毕、烟尘散尽后,在地面设置距离参照标识后,在爆堆中心竖直上方采用无人机进行空中摄影,获取典型的爆堆特征影像。本次拍摄选择佳能 1DX 高级数码相机,于楼房倾倒垂直方向上拍摄,拍摄速率为 9 帧/s。空中摄影采用大疆御 2 无人机。

1.2 图片影像后处理

图片后处理包括以下几方面:

(1)采用开源的 Python 图像处理模块 PIL 提取图像名称、拍摄时间(从文件 exif 信息中提取)。

(2)在计算机辅助设计软件 AutoCAD 文件中建立空间坐标网格,根据图片参照物按比例(1:1)拉伸

设置分析框架,编制 Autolisp 程序进行图像导入和切换^[12],逐帧标定观测点位置。CAD 图像分析空间坐标网格建立效果见图 1。

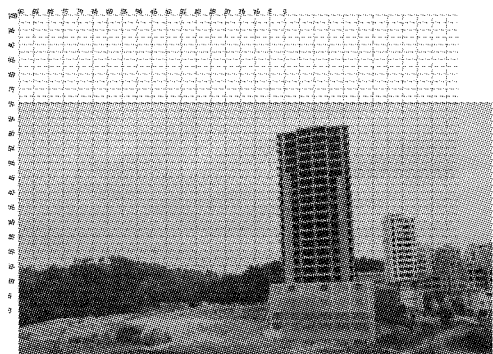


图 1 影像分析立面坐标网格

Fig. 1 Image analysis elevation coordinate grid

(3) 利用编制的 Autolisp 程序提取与各帧图片对应的标记点空间坐标。

(4) 利用开源的 Python 数据分析模块 Numpy、Pandas、Plotmatlib 等进行数据可视化分析。

1.3 数据分析

通过对摄影图像的后处理,以导爆管产生起爆火花时刻为起爆时刻,分别获取每一张图像的摄影时刻,记录观测点水平方向位移和竖直方向位移。由于楼体下坠过程中,持续受到不平衡力的影响,下坠运动过程极其复杂。在此,根据微分原理,假定在某一时间微区间内水平、垂直方向加速度保持不变,均为定加速运动。

在上述假设下,根据速度(瞬时速度、平均速度)、加速度、位移关系,见式(1、2、3)

$$S = V_0 T + 1/2 a T^2 \quad (1)$$

$$V_i = V_0 + a T \quad (2)$$

$$V_a = S/T \quad (3)$$

从第 0 张开始进行迭代计算,分别计算每连续拍摄的两张图片之间的时间微区间 T ,楼体上特定观测点的运动位移 $S(\text{m})$ 、加速度 $a(\text{m/s}^2)$ 、瞬时速度 $V_i(\text{m/s})$ 、平均速度 $V_a(\text{m/s})$ 。

计算过程如下:

第 0 张处瞬时速度为 0 m/s,通过第 0 ~ 1 张之间的位移 S_1 ,计算出第 0 ~ 1 张时间段的加速度 $a_0 = 2S_1/t_1^2$,从而计算出第 1 张处瞬时速度 $v_1 = v_0 + a_0 t_1$,迭代计算第 1 ~ 2 张之间的位移 S_2 ,迭代计算加速度 $a_1 = 2(S_2 - v_1 t_2)/t_2^2$,从而计算出第 2 张处瞬时速度 $v_2 = v_1 + a_1 t_2$,

...

以此类推,迭代计算第 $n \sim (n+1)$ 张之间的位

移 S_{n+1} ,迭代计算加速度 $a_n = 2(S_{n+1} - v_n t_{n+1})/t_{n+1}^2$,从而计算出第 $n+1$ 张处瞬时速度 $v_{n+1} = v_n t_{n+1}$ 。

2 案例分析

以河源龙川县远东花园违建楼爆破拆除为案例,采用摄影分析技术对其倾倒过程进行了分析。

2.1 案例工程概况

2.1.1 待拆楼房概况

待拆除楼房为 22 层钢筋混凝土框剪结构,总建筑面积 16998 m^2 。主楼长 26.6 m,宽 25 m,高 71.2 m,地下室 2 层。其中 1 ~ 4 层为裙楼,长 32 m、宽 25 m、高 15.4 m。待拆除楼房东面 65 m 处为一层平顶铁皮房,南面 3 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,周围环境较复杂。待拆除楼房实景影像见图 2。

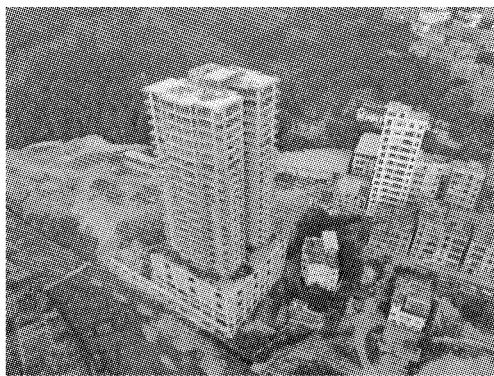


图 2 待爆破楼房实景影像图

Fig. 2 Live image of the building to be blasted

2.1.2 爆破拆除方案

楼房为钢筋混凝土框剪结构,南北方向为 5 排立柱,东西方向为 4 排立柱,电梯间和楼梯间为剪力墙核心筒。承重柱有 4 种规格,截面尺寸为 120 cm $\times$ 60 cm、100 cm $\times$ 60 cm、100 cm $\times$ 40 cm 和 60 cm $\times$ 60 cm,梁有 2 种规格,截面尺寸为 85 cm $\times$ 30 cm 和 70 cm $\times$ 24 cm。1 ~ 4 层保留西侧和南侧一跨裙楼,5 ~ 22 层为 H 型结构,待拆楼结构平面见图 3。

采用梯形爆破切口定向倾倒,设计炸高四层,爆破切口高 $H = 13.5 \text{ m}$,爆破缺口的倾倒角 36° 。采用导爆管雷管起爆网路,孔内分段,柱间逐排延时起爆。爆破切口及起爆网路延时见图 4。

2.2 倾倒过程分析

利用计算机辅助设计软件 AutoCAD 及二次开发程序,对连拍高清照片进行后处理,标记出特定点下落运动过程及最终轨迹见图 5。

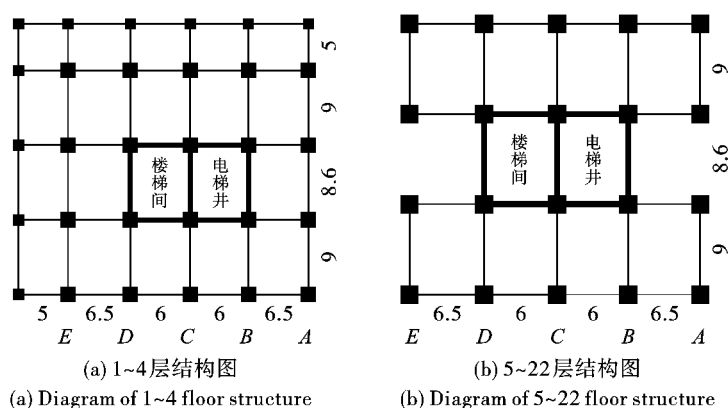


图3 待爆破楼结构平面图(单位:m)

Fig. 3 Structural plan of the building to be blasted(unit:m)

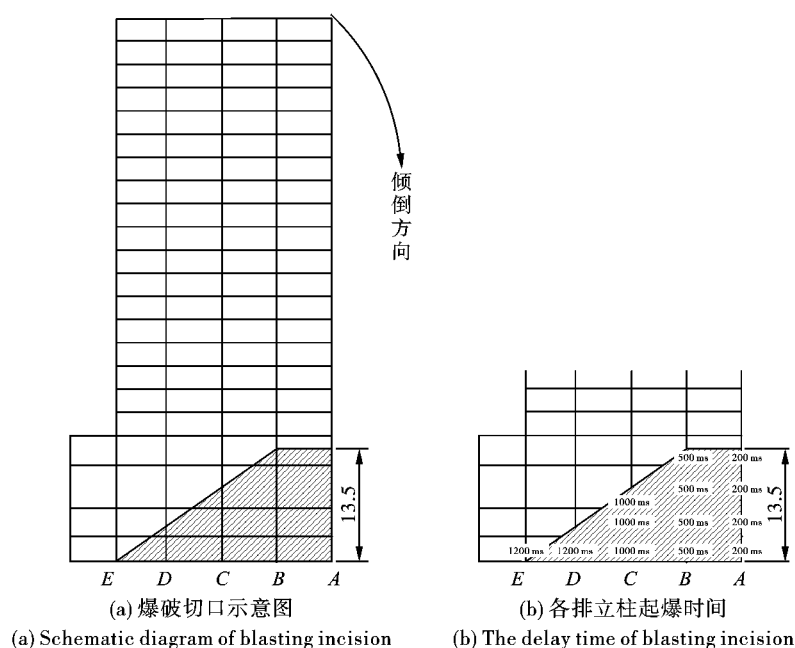


图4 爆破切口与起爆网路延时布置图(单位:m)

Fig. 4 Schematic diagram and delay time of blasting incision(unit:m)

根据标记轨迹图,计算机自动提取各轨迹点时刻及坐标数据。从楼顶前沿点的运动轨迹图,结合现场爆堆分布情况,楼体在触地前后楼顶明显发生了前冲和爆渣飞射。本文取最能反映爆破倾倒特征的楼顶前沿点运动轨迹进行分析。以楼体爆破前前沿点位置为原点,分别计算不同时刻水平和竖直方向位移、速度、加速度值,为了让结果更直观,同时计算各时间区间的平均速度,即能直观观察到的速度。楼体前沿点运动轨迹计算成果见表1。

为了进行更为直观的分析,我们将计算成果中各观测点水平、竖直向的位移、加速度、瞬时速度、平均速度进行可视化处理,可视化结果见图6。

分析楼体前沿点运动轨迹水平、竖直向位移、加速度、瞬时速度、平均速度时程曲线,可直观得出以下结论:

(1)楼体倾倒过程中各观测点水平、垂直向的速度、加速度随时间推移,均不断发生变化,呈非线性运动状态。

(2)观测点水平、垂直向加速度随时间不断交替换向,说明楼体在倒塌过程中是不断振动向前、向下,其瞬时加速度可达20倍重力加速度以上,瞬时加速度的急剧变化,内部结点处冲击载荷对楼体结构形成巨大破坏。前沿点在起爆后约2.7s时(切口闭合时),下落平均速度达10 m/s左右时,逐渐趋于稳定,此时加速度变化加剧,逐步达成动态平衡。

(3)楼体向前下坠过程中,除受重力影响外,还不断受到地面及下部不断破坏的支撑结构的反作用力影响,导致受力发生不规则的周期性变化,表明楼体下坠过程内部不断受到剧烈的拉伸、压缩,导致楼体内部在空中即发生结构破坏。

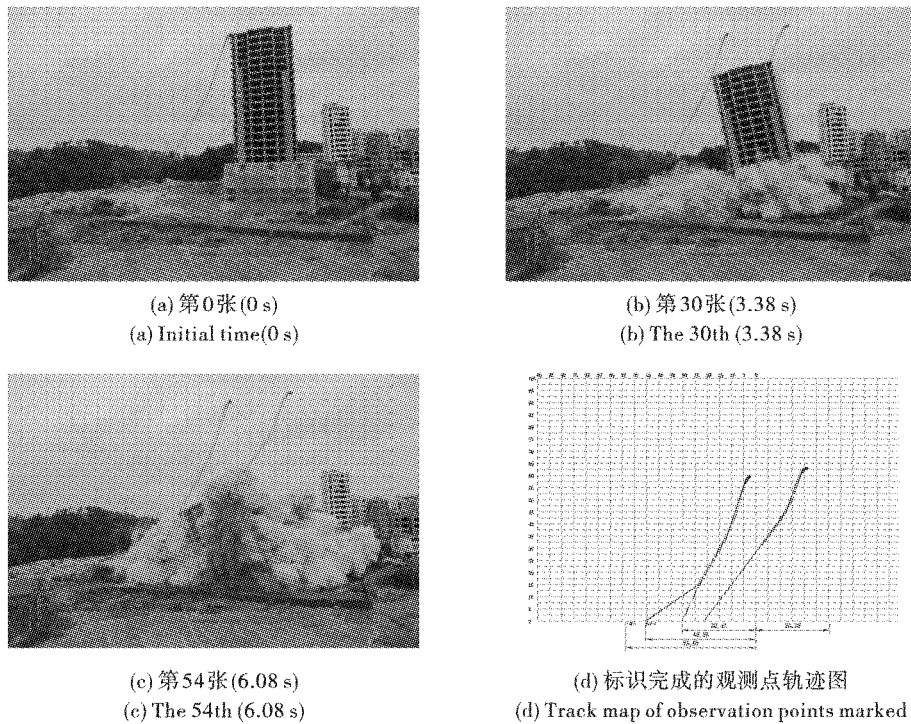


图 5 观测点运动轨迹提取过程

Fig. 5 Extraction process of observation point trajectory

表 1 特定裂纹长度所需压力

Table 1 Pressure to rupture the given flaw length

编号	X 坐标	Y 坐标	时程/s	水平向				竖直向			
				位移/m	加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	瞬时速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	位移/m	加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	瞬时速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
0	87.4299	59.5447	0.00	0.0000	-11.3182	0.0000	0.0000	0.0000	-1.3740	0.0000	0.0000
1	87.3485	59.5348	0.12	-0.0815	22.6365	-1.3582	-0.6791	-0.0099	0.2057	-0.1649	-0.0824
2	87.3485	59.5165	0.23	-0.0815	-20.5786	1.1318	0.0000	-0.0282	-4.9776	-0.1423	-0.1664
3	87.3485	59.4708	0.34	-0.0815	11.4959	-1.1318	0.0000	-0.0740	9.5161	-0.6898	-0.4160
4	87.2935	59.4525	0.45	-0.1364	-12.8030	0.1327	-0.4995	-0.0923	-1.3992	0.3570	-0.1664
5	87.2306	59.4833	0.57	-0.1993	20.8991	-1.4036	-0.5238	-0.0615	-2.6525	0.1891	0.2567
6	87.2127	59.4869	0.68	-0.2173	-11.7149	0.8953	-0.1633	-0.0579	-14.1505	-0.1027	0.0326
7	87.2403	59.3900	0.79	-0.1897	-0.2855	-0.3934	0.2510	-0.1548	11.5858	-1.6593	-0.8810
8	87.1953	59.2775	0.90	-0.2347	-14.2179	-0.4248	-0.4091	-0.2672	-14.9306	-0.3848	-1.0220
9	87.0625	59.1449	1.02	-0.3674	17.7038	-2.1309	-1.1062	-0.3999	15.0392	-2.1765	-1.1055
10	86.9343	58.9920	1.13	-0.4956	-27.5297	-0.1835	-1.1658	-0.5528	-18.0080	-0.5222	-1.3900
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
45	73.1680	26.4703	5.07	-14.2619	271.3098	-21.4448	-5.8120	-33.0745	279.8097	-26.1466	-8.0673
46	72.5481	25.3473	5.18	-14.8818	-248.7801	8.3993	-5.6359	-34.1974	-282.6412	4.6325	-10.2088
47	71.9669	24.1469	5.29	-15.4630	218.2896	-18.9666	-5.2836	-35.3979	277.1999	-26.4581	-10.9128
48	71.2012	22.9136	5.40	-16.2287	-212.5303	5.0453	-6.9606	-36.6312	-266.5008	4.0339	-11.2121
49	70.4704	21.7450	5.51	-16.9595	212.5303	-18.3330	-6.6439	-37.7998	250.4043	-25.2812	-10.6236
50	69.7396	20.4790	5.63	-17.6904	-224.3969	7.1706	-6.0902	-39.0658	-262.0494	4.7673	-10.5499
51	68.9844	19.1643	5.74	-18.4455	181.5153	-17.5131	-6.8653	-40.3804	208.0459	-24.0581	-11.9516
52	68.1561	17.7766	5.85	-19.2738	-157.3559	2.4536	-7.5297	-41.7682	-199.9976	-1.1730	-12.6156
53	67.4740	16.4376	5.96	-19.9559	177.4889	-14.8555	-6.2009	-43.1072	228.1664	-23.1728	-12.1729
54	66.9137	15.2690	6.08	-20.5162		6.4432	-4.6692	-44.2758		4.2072	-9.7383

注:由于数据较多,表中仅列前十组和后十组数据。

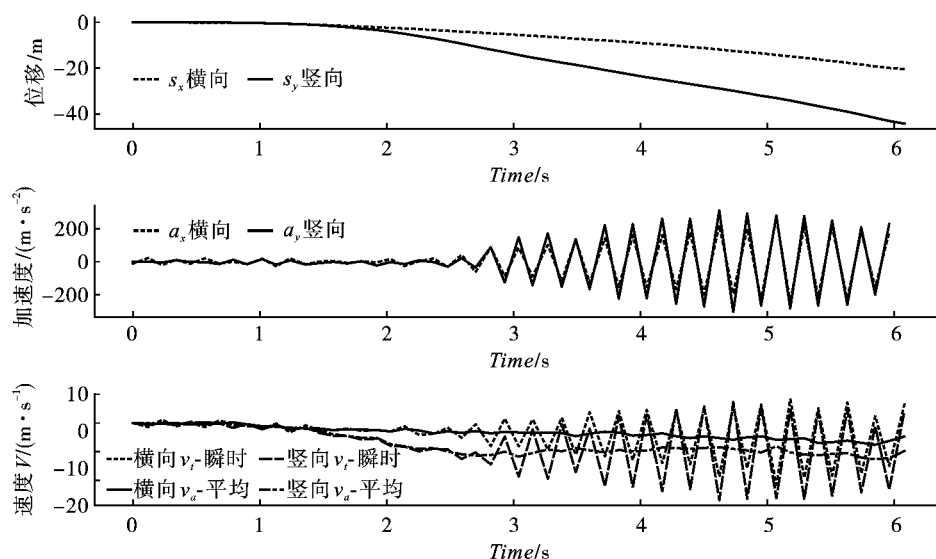


图6 各向位移、加速度、瞬时速度、平均速度时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of displacement, acceleration, instantaneous speed and average speed

(4)通过对比观察楼顶前、后沿点不断变化的相对位置关系,表明楼体在向前下坠运动过程中,不同部位的速度、加速度方向、大小均发生着动态变化,说明下坠过程中楼体内部不断发生着振动变形,内应力形成的内部结点冲击过载导致楼体在空中即开始发生解体。

2.3 爆堆分析

爆破完成后,结合现场无人机空中摄影,对爆堆进行了对比分析。通过爆破倾倒过程轨迹趋势观察

及爆破后爆堆特征点对比分析,前沿点倒塌趋势指向位置与前沿点实际倒塌位置具有一定差异,说明前沿点在触地阶段发生了前冲。根据倒塌前前沿点投影位置、趋势指向位置、最终落点位置、爆堆最远散落点位置,将爆堆范围分为三段,暂且将前沿点投影位置到指向落点称为倾倒距离,将指向落点到实测落点距离称为前冲距离,将实测落点距离至爆堆最大散落点称为飞散距离。倾倒范围与实测爆堆对比如图7。

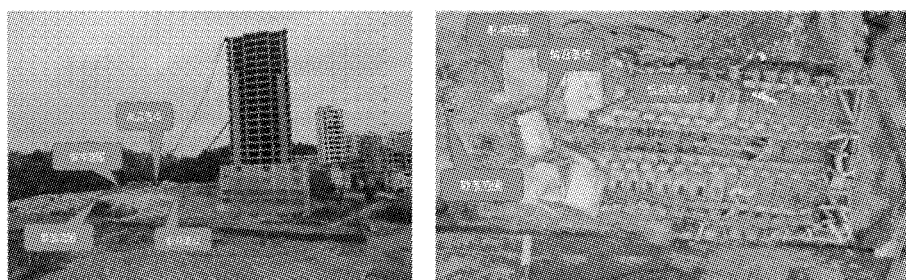


图7 倾倒范围(左)与爆堆实测(右)对比图

Fig. 7 Comparison diagram of dumping range(left) and measured explosion pile(right)

爆堆图像通过距离参照按1:1的比例拉伸,根据楼房倾倒过程中前沿点运动轨迹趋势和爆堆特征点,在图上测量相关距离:

图上实测前沿落点距倾倒前前沿点投影位置距离43.1 m;图上实测爆堆前沿最大散落点距前沿落点16.12 m。

为进一步探究其运动轨迹与倒塌距离、前冲距离的关系,通过动态摄影图采样前沿观测点运动轨迹的位移坐标,并将相关轨迹点坐标进行高幂次多项式拟合分析。工程实际中为已知楼高,为了便于

计算楼顶前沿倒塌落点,现选择起始点为坐标原点,竖直向位移作为自变量,水平向位移作为自变量,对运动轨迹进行多项式拟合,导出前沿点水平位移与高度关系的计算公式。

从大量实际工程实例分析,楼体倾倒过程中,前沿点水平位移总是随着楼高的增加呈增加趋势,因此实际拟合时选择以非轴对称的奇次幂进行高次多项式拟合。为了预测前沿点最终塌落位置,将自变量取值扩大至覆盖楼高的范围。分别采用1、3、5、7次幂多项式拟合,拟合结果见图8。

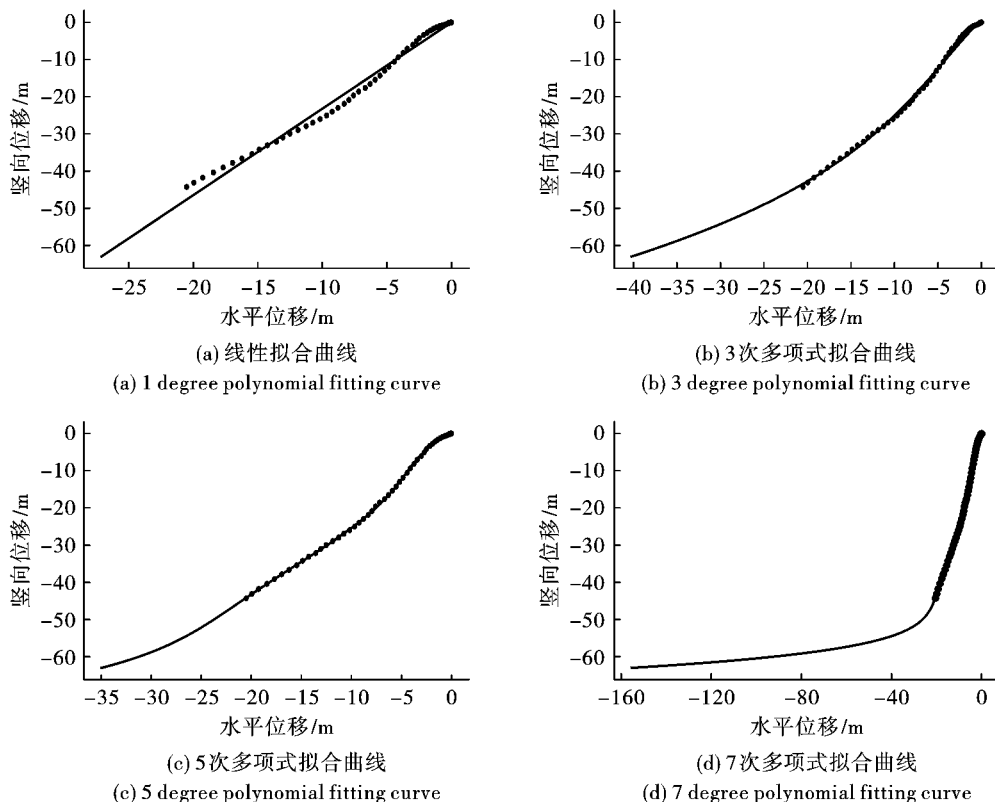


图 8 前沿点运动轨迹拟合效果图

Fig. 8 Different fitting curves of the motion trajectory of the front point

通过对拟合结果的直观分析,5 次幂多项式拟合结果及延伸趋势,与现场实际情形最为近似,拟合多项式见式(4)

$$x = 2.872 \times 10^{-7}y^5 + 4.388 \times 10^{-5}y^4 + 0.002375y^3 + 0.04999y^2 + 0.7252y - 0.1276 \quad (4)$$

根据水平位移的拟合公式,将本项目中北侧地面以上楼高 63 m 代入拟合公式,计算出前沿点触地时趋势指向位置水平位移为 $x = -34.96$ m(负号表示向左)。摄影图上实测前沿落点距楼体倾倒前前沿垂直投影位置 43.1 m,说明楼体前沿触地时发生了前冲,前沿点前冲距离 $43.1 - 34.96 = 8.14$ m,为楼体高度的 12.89%。爆渣最远散落点距爆堆前沿落点 16.12 m,为楼体高度的 25.59%。

大量案例直观分析前冲距离和飞散半径均与坠落高度相关,假定均为线性相关,则可得楼房倒塌距离(倾倒距离)的计算公式,见式(5)

$$S_1 = x + 0.129H \quad (5)$$

爆渣散落半径估算公式,见式(6)

$$S_2 = 0.256H \quad (6)$$

式中

$$x = 2.872 \times 10^{-7}y^5 + 4.388 \times 10^{-5}y^4 + 0.002375y^3 + 0.04999y^2 + 0.7252y - 0.1276$$

S_1 为楼房倾倒距离,m; S_2 为爆渣散落半径,m; x 为不含前冲的水平位移,m; y 为竖向位移,完全倾倒时为爆破前前沿点距地面高度,m; H 为爆破前前沿点距地面高度,m。

以上计算公式,可根据不同类型案例进行针对性验证修正各系数,从而可应用于其他类型建筑物的倾倒运动预测分析。

3 结论与展望

结合某 22 层框剪结构楼房爆破拆除的成功案例,采用摄影分析技术和通用的计算机辅助设计平台软件 AutoCAD 及开源工具,结合二次开发实现了框剪结构楼房爆破拆除倾倒过程的详细分析,获取了一批运动学参数,得出以下结论:

(1) 利用常规设备即可建立一套经济、实用、简便且可靠的图像采集系统,采集到满足楼房倾倒运动过程分析的且具有运动时程信息的高清图片。结合通用的计算机辅助设计平台软件 AutoCAD 和开源工具,进行二次开发,较准确地提取了高清数码图片的时空数据信息,实现了除特征点标记外的所有数据自动处理,可为大量类似工程信息采集、分析、积累数据提供参考。

(2)通过对特定观测点的轨迹时空数据进行计算分析,探究了框剪结构楼房爆破拆除倾倒运动过程,揭示了楼体倾倒过程中的结构破坏机理,在高达20 g(g 为重力加速度)的瞬时冲击载荷作用下迅速发生结构性破坏的机理。进一步计算并拟合出的空间位移、速度、加速度、瞬时速度、瞬时加速度时程曲线,结合爆破振动波形时程曲线,可判断不同时刻所引起的振动情况,可推测切口触地闭合时楼体过载及破坏情况,为类似工程减振措施的精准设计提供支撑,亦可为不同结构类型楼房爆破拆除切口类型及高度设计提供借鉴。

(3)对楼体前沿点运动轨迹的幂次多项式拟合,并根据前冲距离、飞散半径,给出了类似楼房拆除的倾倒范围和飞散半径的预测模型,结合不同类型案例进一步优化,成果可用于其他类型的倾倒运动分析,为类似工程实施提供计算参考。

(4)本次摄影观测主要采用可视化观测,受倒塌后的烟尘影响,仅提取了倒塌触地前的大半段运动过程数据,后续可在楼体表面增加示踪标识(红外或GPS电子定位装置),以完成观测点全过程运动轨迹的追踪,获得更为完整的运动过程数据。

参考文献(References)

- [1] 中国工程爆破协会. 汪旭光, 主编. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
- [2] 谢先启, 卢文波. 精细爆破[J]. 工程爆破, 2008(3): 1-7.
- [2] XIE Xian-qi, LU Wen-bo. 3P(PRECISE, PUNCTILIOUS AND PERFECT) blasting[J]. Engineering Blasting, 2008(3): 1-7. (in Chinese)
- [3] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. 爆破, 2019, 36(2): 1-12.
- [3] XIE Xian-qi. Development situation and trend of demolition blasting technology[J]. Blasting, 2019, 36(2): 1-12. (in Chinese)
- [4] 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.
- [4] 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)
- [5] 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.
- [5] 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)
- [6] 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.
- [6] 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)
- [7] 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.
- [7] YE Hai-wang, LI Qing, ZHENG Chang-qing, et al. Analysis on collapse process of 22 storey frame building demolished by directional blasting[J]. Blasting, 2021, 38(2): 111-117. (in Chinese)
- [8] 崔晓荣, 郑炳旭, 沈兆武. 建筑爆破倒塌过程的摄影测量分析系统[J]. 测绘科学, 2011, 36(5): 109-111.
- [8] CUI Xiao-rong, ZHENG Bing-xu, SHEN Zhao-wu. Close-range photogrammetry analysis system of building blasting demolition[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(5): 109-111. (in Chinese)
- [9] 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.
- [9] 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)
- [10] 崔晓荣, 郑炳旭, 沈兆武. 建(构)筑物爆破倒塌过程摄影测量分析系统的优化设计[C]//中国工程爆破协会、中国力学学会. 中国爆破新技术Ⅲ, 2012: 8.
- [11] 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.
- [11] 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)
- [12] 吴永进, 林美樱, 编著. AutoCAD 完全应用指南. AutoLISP + DCL + Visual LISP 程序设计篇[M]. 北京: 科学出版社, 2009.