

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.03.017

## 多体-离散体动力观及拆除楼房结构的切口匹配

魏晓林,李萍丰,刘翼

(宏大爆破工程集团有限责任公司,广州 510623)

**摘要:** 中国拆除钢筋混凝土结构的多体-离散体动力分析是建立在多体动力方程(符号、函数)和变质量塌落动力方程基础之上,并求得方程包括解析解的全面解。应用近景摄影测量和实例的动力方程反演,获得了破损钢筋混凝土材料的塑性动力参数和结构拆除参数。利用动力方程解及其导出量的相似准则,组建了各类结构不同倒塌方式的切口相似准则公式,即楼房翻倒的单切口相似准则曲线拟合式(5)和它的另一式(6)及切口经验式(7),跨间下塌框架切口相似准则实例修正线 $C_4$ ,单切口有后坐楼房翻倒的相似准则曲线拟合式(8),高楼原地层间连续冲击塌落相似准则式(9),高楼多切口原地冲击塌落切口经验式(10),和楼房双切口同向翻倒相似准则曲线,及其它切口-楼房结构倒塌的相似准则曲线族等。类比国内46个拆除实例,从其切口相似准则曲线和实例图中,提出了我国楼房结构-倒塌方式-切口特性的拆除匹配表的楼房倒塌的判断规则,和楼房结构和切口的 $[\lambda(\lambda_1, \lambda_p), \eta_h(\eta_r)]$ 坐标点在其相似准则曲线上方附近时,确定楼房倒塌的判断规则。可简便地确定各类楼房结构多种拆除方式的切口尺寸,继而以无量纲图表确定其他拆除效果。由此,使用多体动力学切口控拆技术(MBDC),可以实现对楼房爆破拆除的简便、准确地拆除控制。

**关键词:** 爆破拆除;楼房;多体-离散体动力分析;楼房结构-倒塌方式-切口特性的匹配

**中图分类号:** TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)03-0139-10

## Dynamic View of Multibody-discrete Body and Notch Matching for Demolishing Building Structures

WEI Xiao-lin, LI Ping-feng, LIU Yi

(Hongda Blasting Engineering Group LLC., Guangzhou 510623, China)

**Abstract:** The multi-body and discrete-body dynamic analysis of demolished reinforced concrete structures in China is based on the multi-body dynamic equation (symbol, function) and the variable mass collapse dynamic equation, and the comprehensive solution of the equation, including an analytical solution, is obtained. Using close-range photogrammetry and dynamic equation inversion, the plastic dynamic and structural dismantling parameters of damaged reinforced concrete materials are obtained. Based on the similarity criterion of dynamic equations solution, similarity criterion formulas of notch for different collapse modes of various structures are established. Namely, the similarity criterion curve fitting formula (5), its another formula (6), empirical formula (7) of single-notch for building toppling, the example modification curve  $C_4$  of similarity criterion of inter-span falling, and the forward. Toppling similarity criterion formula (8) of backward-seated buildings with the single notch, the similarity criterion formula (9) of continuous impact collapse between floors of high-rise buildings, the empirical formula (10) of multi-notch in-situ impact collapse of high-rise buildings, the overturning similarity criterion curve of double-notch buildings in the same

收稿日期 (Date of reception): 2023-04-19

网络首发日期 (Published online): 2023-12-28

作者简介: 魏晓林(1940-),男,四川成都,大学本科,教授级高级工程师,国务院特殊津贴专家,广东省突出贡献专家,博士生导师,从事爆破拆除和矿山安全技术研究, (E-mail) wxl\_40@163.com.

**About the author:** WEI Xiao-lin (1940-), Male, Chengdu, Sichuan, bachelor degree, professor-level senior engineer, special allowance expert of the State Council, outstanding contribution expert of Guangdong Province, doctoral assistant tutor, engaged in blasting demolition and mine safety technology research, (E-mail) wxl\_40@163.com.

direction, and other notch-similarity criterion curve families of building structure collapse, etc. Furthermore, the building collapse rules of the demolition matching table of building structure-collapse mode-notch characteristics are put forward by analogy with 46 demolition examples from its notch similarity criterion curve and example diagram in China. The judgment rules of building collapse are determined when the coordinate points  $[\lambda(\lambda_1, \lambda_p), \eta_h(\eta_r)]$  of the building structure and the incision are near the top of the similarity criterion curve. The cut size of various demolition methods of different building structures can be easily determined, and dimensionless charts can determine the demolition effects. Therefore, a simple and accurate demolition control of blasting demolition can be realized using the multi-body dynamic incision control demolition technology (MBDC).

**Key words:** demolition by blasting; building; multi-body-discrete-body dynamic analysis; matching of building structure-collapse pattern-notch characteristics

爆破拆除建筑物的倒塌是个动力过程,目前需要构建适合中国拆除钢筋混凝土结构的基础力学。从大量拆除建筑物翻塌实例中,特别是本公司2002年折叠拆除并获发明专利,2005年首创3折烟囱多体拆除,标志了单体静力学已不能概括并适应现今拆除的发展。2004年和2007年本公司及作者首创折叠动力方程数值解和率先提出爆破拆除建筑物的多体-离散体动力观<sup>[1]</sup>,相继构建了楼房、烟囱、冷却塔及统一的建筑物倒塌动力方程,于国内外领先获得了动力方程解析解、近似解和其相似准则<sup>[2-4]</sup>,完成了参数实测动力方程反演,组成了研究手段集合。并面向拆除设计需求,在2011年~2015年完成了多体动力学切口控拆技术(MBDC)<sup>[3,5]</sup>。同时,在1992年卢文波提出了小钢架失稳切口后,2003年金骥良和2013年陈寿如提出了楼房重心前移出支面静力倾倒切口,和杨人光以及2013年周凤仪提出了框架、砖混结构楼房冲击速度切口高,等。但是,还需继续探索结构与切口的关系,因此,本文应用多体-离散体动力观,研究了楼房结构(含其高宽比、支重比等)-倒塌方式(倾倒、塌落冲击等)-切口特性的拆除动力匹配,现述如下。

## 1 钢筋混凝土结构的建筑物倒塌方程

拆除建筑物倒塌的多体-离散体动力观认为,拆除钢筋混凝土结构的破坏,必然经历混凝土已经断裂但钢筋还牵拉脱粘形成塑性铰的过程,对倒塌运动的建筑机构<sup>[3]</sup>,是铰运动副连接的多体系统。因此,结构初始失稳后,必然经历多体系统运动<sup>[1]</sup>,而后可能多体离散为仅存钢筋牵拉的非完全离散体<sup>[3]</sup>,最终或初至离散为完全离散体<sup>[1]</sup>,并塌落撞地堆积为爆堆。

### 1.1 建筑多体动力方程

建筑物倒塌的多体机构的树系统中<sup>[3]</sup>,可简化为平面单开链系统<sup>[3]</sup>,其有根体的动力方程为自由度 $f$ 的体 $n$ 单开链系统<sup>[3]</sup>,其方程若代入不同的 $n$ 、

$f$ 值和含体速度、体角速度的具体矩阵系数 $[B]$ 、 $[C]$ ,计算机将以符号运算,自动建模<sup>[3]</sup>,衍生出十余个不同拓扑的具体动力方程<sup>[3]</sup>。

剪力墙、框剪结构和部分框架(2跨内有完整砖墙)楼房等高耸建筑物,在单切口爆破少量下坐后,单向倾倒初期随切口闭合,质量重力减少约占其总量的10%以下,如图1所示,可从多体动力方程简化,得到 $n=1, f=1$ 且底端塑性铰轴的有根定质量体,其倾倒动力方程和爆破拆除时的初始条件为<sup>[2]</sup>

$$\left. \begin{aligned} J_b \frac{d^2 q}{dt^2} &= Pr_c \sin q - M_b \cos(q/2) \\ t = 0 \text{ 时}, q &= q_0, \dot{q} = \dot{q}_0 \approx 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $P$ 为单体的重力,kN; $P=mg$ , $m$ 为单体的质量, $10^3$  kg; $r_c$ 为质心到底支铰轴的距离,m; $J_b$ 为单体对底铰的惯性矩, $10^3$  kg·m<sup>2</sup>; $M_b$ 为底部塑性铰的抵抗弯矩,后柱爆破 $M_b \approx 0$ ,kN·m; $q$ 为质心到底铰连线与竖直线的夹角, $R^\circ$ ; $q_0$ 为 $q$ 的初始值, $R^\circ$ 。

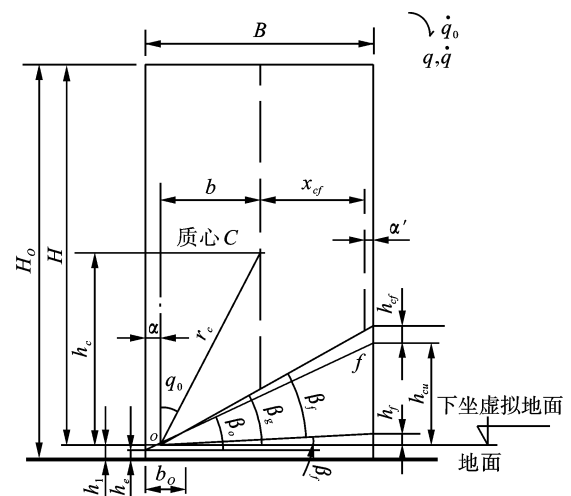


图1 框剪楼房倒塌姿态

Fig. 1 Toppling posture of frame-shear building

则可得数值解和式(1)的角速度 $\dot{q}$ (s<sup>-1</sup>)、时间 $t$ (s)的解析解<sup>[1,2]</sup>

$$\dot{q} = \sqrt{\frac{2Pr_c(\cos q_0 - \cos q)}{J_b} + \frac{4M_b[\sin(q_0/2) - \sin(q/2)]}{J_b} + \dot{q}_0^2} \quad (2)$$

3 跨以内框架及仓体等结构,切口所在层的墙体预拆除后,当切口爆破,后支撑柱将作为下体向后倾倒后坐,切口层上作为上体沿其后柱铰  $b$  向前倾倒,从而形成体  $n = 2$ , 自由度  $f = 2$  的折叠机构运动<sup>[3]</sup>,如图 2。

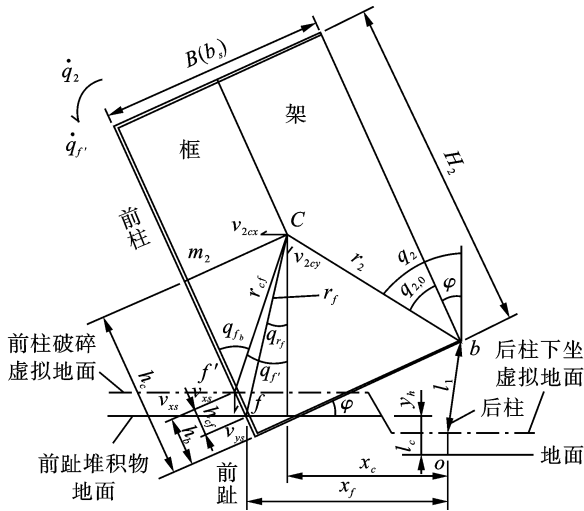


图 2 框架前柱撞地姿态

Fig. 2 Front column of the frame hitting the ground

上述 2 类建筑物的切口闭合撞地,见与图 1 同型的模型图 2,忽略撞地前柱  $f'$  的破坏,前柱撞地点  $f$  距后柱根  $O$  水平距为  $x_f$ ,建筑物质量  $m_2$ ,质心  $C$  以  $r_f$  绕  $f$  转动,其转动惯量  $J_f$ , $q_f$  为质心  $C$  至前趾  $f$  直线与竖直线的夹角。当质心水平距  $x_c$  小于前趾  $f$  距离  $x_f$ ,即  $x_c < x_f$  时,上体转动将提高质心及其势能。上体撞地翻倒动能  $T_f = J_f \dot{q}_f^2 / 2$ , $w_f$  为向前转动提高的质心势能,即翻倒阻势能  $w_f = r_f m_2 g (1 - \cos q_f)$ 。

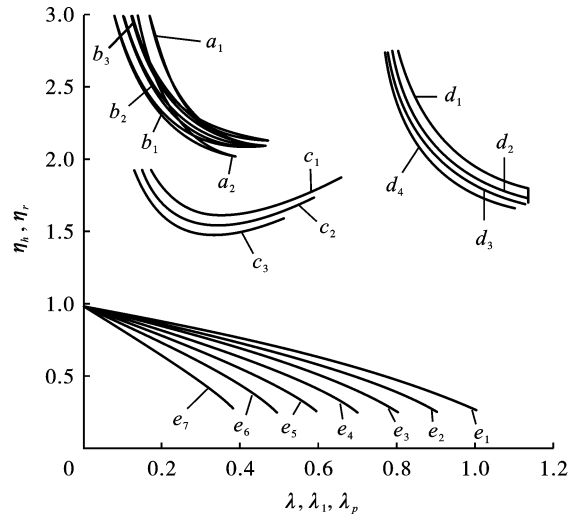
翻倒能阻势比<sup>[3]</sup>

$$K_{io} = T_f / w_f \quad (3)$$

经实例观测,动力方程反演并考虑楼房克服切口触地悬梁阻力、切口闭合碰撞阻力、滚动阻力、或后支撑钢筋拉断力,翻倒应留有的保证富余和工程计算误差等,取  $K_{io} \geq C_{io} = 1.5 \sim 1.9$ ,建筑机构将能翻倒<sup>[3]</sup>,楼高且重要程度大者可取大值。从式(3)可见, $K_{io}$ 与楼房高宽比和切口高宽比有关,而保证系数  $C_{io}$ 与其基本无关,见图 3。

高层建筑原地塌落可归结为有根变质量体连续下坐质量散失的动力方程<sup>[4]</sup>,如图 4 所示。质心  $C$ ,径向动力方程及其初始条件为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(\rho y_r v)}{dt} &= -\rho y_r g \cos q + F_{cs} + y_r^2 \rho \dot{q}^2 / 2 \\ t = 0, v &= v_0 = v_{y0}, q = q_0 = 0, \dot{q} = \dot{q}_0, r_r = h_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$



\* 注:

1. 结构及倾倒方式代号:(1) $p_1$ :全浇剪力墙、框剪楼:整体翻倒<sup>[2]</sup>;(2) $p_2$ :全浇 2 跨以内完整砖墙能相对稳定梁柱框架楼:整体翻倒;见表 1 序 2;(3) $p_3$ :框架楼:跨间下塌或层间侧移<sup>[3]</sup>,见表 1 序 4~序 8;(4) $p_4$ :全浇 3 跨以内框架楼:双向的上体翻倒下支后坐<sup>[5]</sup>;(5) $p_5$ :框架楼纵向倾倒;(6) $p_6$ :5 跨以上楼纵向断跨倾倒<sup>[2]</sup>;(7) $p_7$ :3 跨以内剪力墙、框剪楼:双切口双体同向倾倒<sup>[3]</sup>;(8) $p_8$ :单切口 3 跨以上框剪楼、框架楼:原地塌落或加小倾<sup>[4]</sup>;(9) $p_9$ :多切口 3 跨以上框剪楼、框架楼:原地塌落或加小倾。

2.  $p_1 \sim p_9$  及其标注的坐标点为表 1 实例。

3. 实例查询: $\eta_h = 3.64 \sim 3.15$ ,见文献[6-13];  
 [\*], $\eta_h = 3.0$ <sup>[14]</sup>, [\*], $2.89$ <sup>[15]</sup> [\* \*], $2.74$ <sup>[16]</sup>, $2.74$ <sup>[17]</sup>, [\* \* \*], $2.44$ <sup>[18]</sup>, [\*], $2.38$ <sup>[19]</sup>, [\*], $2.28$ <sup>[20]</sup>, $2.28$ <sup>[21]</sup>, $2.27$ <sup>[22]</sup>, (+); $2.14$ <sup>[23]</sup>, $2.12$ <sup>[24]</sup>, [\*], $2.07$ <sup>[25]</sup>, [\*], $2.01$ <sup>[19]</sup>, [\* \* \* \* \*], $1.22$ <sup>[26]</sup>; [\*], $0.68$ <sup>[27]</sup>, [\*], $\eta_r = 0, F_{dc} [28-30] = 0.95 \sim 1.79, 3.9$  为阿布 C 塔实例录像, $4.2$ <sup>[31]</sup>。\*(+) 为宏大、和利、珠海高新、惠州中特、西南交大等爆破公司的共 20 个爆破实例,+ 为其中楼宽边到边距,其余楼宽为前后柱中距。参考文献[6-32]为 2003~2021 年“工程爆破”期刊和 2017 年“爆破”期刊拆除论文,并欢迎咨询。

图 3 实例 $[\lambda(\lambda_1, \lambda_p), \eta_h(\eta_r)]$ 的坐标点和相应相似准则曲线

Fig. 3 Examples  $[\lambda(\lambda_1, \lambda_p), \eta_h(\eta_r)]$  of coordinate points and corresponding criterion curves

式中: $\rho$  为楼房沿高度的线质量, $10^3 \text{ kg/m}$ ;  $F_{cs}$

为变质量下坐楼的楼底径向平均抵抗力, kN;  $y_r$  为以  $d$  为原点的径向坐标的楼房顶径向值, m;  $q$  为楼房纵中轴与竖直  $y$  轴的夹角,  $R^\circ$ ;  $q_0$  为  $q$  的初始值,  $R^\circ$ ;  $v$  为楼房下坐径向速度, m/s;  $h_0$  为切口闭合时切口上楼房初始高, m;  $v_{y,0}$  为切口高  $h_p$  闭合时, 楼房撞地时的速度。

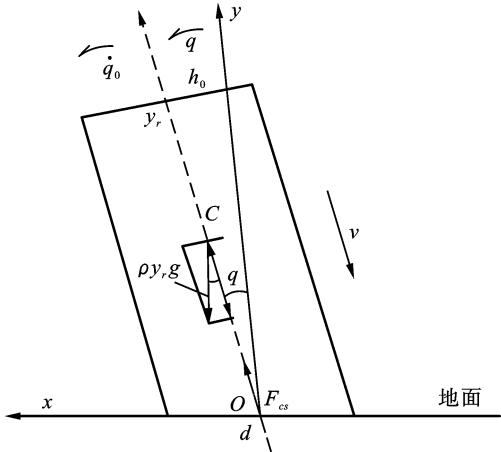


图4 楼房塌落质量散失倾倒

Fig. 4 Building collapse with mass dispersion

## 1.2 动力方程的解及其相似性

上述动力方程可得到解析解<sup>[2]</sup>, 如式(2), 数值解或从其中归纳出近似解, 从而已能求解和模拟拆除各类建筑构体在关键时刻的运动姿态<sup>[3]</sup>。将各拓扑按时间顺序编程, 前拓扑的运动结果为相邻后拓扑的初始条件, 即可解算和模拟建筑物倒塌的全过程<sup>[3]</sup>, 已实现了倒塌过程的全局仿真。倒塌建筑物多有破坏残余应变, 只能借助近景摄影数字技术和动力方程反演钢筋混凝土破损材料的塑性参数, 也可逆向求解获得结构的拆除参数<sup>[5]</sup>。

此外, 还可依据动力方程获得拆除倾倒运动的相似准则, 即, 无量纲规整化后, 建立相似准则公式或算图<sup>[5]</sup>, 以便在实用中推广。设  $B$ 、 $H$  分别为拆除建筑的倒向宽和下坐后高, 见图1, 体端  $[M_b] \approx 0$ ,  $[\ddot{q}] = [\dot{q}dq/dq]$  代入方程(1), 积分得  $[\dot{q}]$  的隐式表示, 当主惯量比  $k_j = J_c/J_{cs}$  在各系统间常值或  $k_j = 1$  时, 可见  $[\dot{q}]$  与楼房质量  $m$  数学无关,  $[\dot{q}B^{0.5}]$  与  $B$  无关, 式中  $J_c$  为主构体(楼房)的主惯量,  $J_{cs}$  为主构体质量均布的实心图形计算的主惯量,  $J_{cs} = (H^2 + B^2)m/12$ 。由此, 式(3)的翻倒能阻势比  $K_{io}$  也与  $m$ 、 $m_2$  和可能与  $B$  计算无关, 而仅主要与  $\eta_h = H/B$ ,  $\eta_c = h_c/B$ ,  $\lambda = h_{cu}/B$  相似准数有关,  $h_c$ ,  $h_{cu}$  分别为楼房主构体的下坐后质心高和切口高。推论到多体情况<sup>[5]</sup>,  $K_{io}$  在多数拆除楼房翻倒类型与  $m$  数学无关, 与  $k_j$  关系较少。由此可去除无关变量, 突出主要变量, 以保证系数  $C_{io}$  (含容许误差) 简化有关变量, 减

少方程自变量数, 应用动力方程的解及其导出量, 可以建立坐标  $\lambda - \eta_c$  和  $\lambda - \eta_h$  的相似准则曲线和其公式, 从而比拟判断楼房的翻倒姿态, 见2.1节和图4。8层以上同类结构差异楼房的  $k_j$  多在0.75~1.28间, 整体翻倒楼房可应用  $k_j = 1$  的同一相似准则曲线, 切口高度误差仅在2%以内(当  $\lambda$  在0.3~0.4内时), 从而拆除工程的误差及其切口闭合时质量力变化的误差均可以容许<sup>[6]</sup>。同理, 楼房其他倒塌方式, 爆堆、后坐、下坐等的无量纲参数, 均可按相应的相似准则曲线及算图确定<sup>[5,6]</sup>。由此, 应用动力方程, 可以建立坐标  $\lambda - \eta_h$  的相似准则曲线及其公式, 经少数实例验证、修正和补充后, 可推广到同类结构拆除, 并从结构和倒塌分类以及切口特征中, 获得各类结构-切口类比的匹配, 见后述。

## 2 多体动力学切口控制拆除技术 (MBDC)

### 2.1 建筑物结构、拆除方法和切口

在建筑物结构、强度和周围环境的许可下, 可确定爆破拆除方法和切口参数。当切口爆破后, 必以多体-离散体动力方程, 如倾倒方程(1)或变质量塌落方程(4)倒塌。其与中国建筑《混凝土结构设计规范(TJ10—74, ~, GB50010—2010)》(以下简称《中国规范》)的结构, 共同支配了倒塌规律。利用动力方程解建立的相似准则、总结实例和结构类比, 可获得我国长方楼房常见结构-可倾倒方式和拆除方法-切口特征三者的匹配关系, 见实例大数据图3, 匹配关系见表1。

倾倒中稳定的结构, 即全浇整截面剪力墙、全浇小开口剪力墙和倒向剖面的框剪结构, 横向承载2跨以内框架且其剖面由完整砖墙(表1注\*2)加固等结构, 在倾倒时能抗弯剪结构稳定的楼房, 模型如图1。这类楼房当初始失稳并切口闭合后, 实例和多体动力方程显示<sup>[3]</sup>, 即按表1序1和序2等单切口匹配可实现楼房整体翻倒。若需精准时, 也可按多体动力方程解的图3中  $\lambda - \eta_h$  相似准则曲线  $a$  族(粗实线  $a$  左右支, 不是线  $d$ ) 判定<sup>[5,6]</sup>。其中爆破下坐后切口高宽比  $\lambda = h_{cu}/B$ , 简称切口高宽比,  $B$  为倒向楼宽, 见图1(后壁至后支距离  $a=0$ , 另见  $a/b$  在表序3)。 $\eta_h = H/B$ , 简称楼房高宽比,  $H$  为爆破下坐后楼高(不计超过楼顶的结构, 如电梯房和楼梯间顶),  $H \approx H_o - h_1$ ,  $H_o$  为原楼高,  $h_1$  为后柱爆高和下坐高,  $H \approx 2h_c$ ,  $K_{io} = C_{io} = 1.5$  时, 线  $a$  为能翻倒线, 即, 动力方程计算的相似准则曲线  $a$  的拟合式<sup>[5]</sup>。

表 1 拆除长方楼房结构及倒塌方式与楼高宽比  $\eta_h$ /高高比  $\eta_r$  及切口高宽比  $\lambda(\lambda_1)$ /高高比  $\lambda_p$  匹配关系  
 Table 1 Matching relationship between structure and collapse mode of demolished rectangular building and height/width ratio  $\eta_h$ , height/height ratio  $\eta_r$ , and cut height/width ratio  $\lambda(\lambda_1)$  and height/height ratio  $\lambda_p$

序号	结构	拆除倾倒方式	切口形状	$\eta_h/\eta_r$	$\lambda(\lambda_1)/\lambda_p$	$C_{to}$ ( $\leq K_{to}$ )	图 3 线名	备注
1	横向承载全浇整截面剪力墙、全浇小开口剪力墙、全浇框剪结构 <sup>[2]</sup>	横向整体翻倒 <sup>[2]</sup>	单小梯或单三角	$3.50 > \eta_h > 2.10$ $5.50 > \eta_h \geq 3.50$	* 3 $\lambda > 0.20$	1.50 ~ 1.90	a	框剪后柱炸高 0.6 m 以下割纵筋,有 1 例 v 型楼
2	横向承载全浇大开口剪力墙(壁式框架)和框架且 2 跨以内完整砖墙无走廊能稳定梁柱	横向整体翻倒 <sup>[3]</sup>	单小梯(2 跨以内)或单三角	$3.50 > \eta_h > 2.10$ $5.50 > \eta_h \geq 3.50$	* 3 $\lambda > 0.20$	1.50 ~ 1.90	a	有 1 例为 3 跨框架完整砖墙,有 1 例 v 型楼
3	横向承载剪力墙、框剪和 3 跨以内框架(完整砖墙)	横向双切口同向倾倒的上体翻倒或上下体组合翻倒 <sup>[3]</sup>	小梯或三角	$> 2.10/$	$> 0.50/$	1.50 ~ 1.90	$b_1, b_2, b_3$	a 和 b 满足上体和组合翻倒要求,切口下行起爆 <sup>[32]</sup>
4	4 跨纵向(非承载向)并不完整砖墙框架	跨间下塌	单三角 ~ 单大梯	$< 2.80$ $> 1.45/$	$> 0.50/$	1.70 ~ 1.90	$c_4$	前或后或有电梯间
5	3 ~ 4 跨有垂直倒向走廊或纵向倾倒不完整砖墙框架	跨间下塌 <sup>[3]</sup>	单三角 ~ 单大梯	$< 2.80$ $> 1.45/$	$> 0.50/$	1.70 ~ 1.90	$c_4$	难倾框架切弱前跨柱后侧下的钢筋
6	无墙工业框架(不含排架联体)	层间侧移或跨间下塌 <sup>[3]</sup>	单三角或单小梯	$< 2.80,$ $> 1.45$ 或 $> 1.86$ (实例)/	$> 0.50$ $> 0.53$ (实例)/	1.70 ~ 1.90	$c_4$	2 个相似的实例 $p_3$
7	非全浇(装配为主)剪力墙	层间侧移或跨间下塌	单三角或单小梯	$< 2.80$ $> 1.45/$	$> 0.50/$	1.70	$c_4$	
8	2 跨以内砖混(全砖柱)楼	层间侧移	单三角	$> 1.45/$	$> 0.45/$	1.70	$c_4$	
9	3 跨以内的框架次后柱切口高至 2 ~ 3 层并 2 ~ 3 层内护后柱墙以外墙预拆除或框架上仓体 <sup>[3]</sup>	单后支后坐并上体翻倒(3 跨少墙,多为跨间下塌)	单三角 ~ 单大梯	$> 2.10$ (或线 d 右上方) ( $\eta_h$ 用 B 垂直倒向前走廊净宽计)/	$> 0.50,$ (或线 d 右方), ( $M_{2b} \approx 0$ ), 少墙,或切口层上完整砖墙 ( $\lambda$ 可增至 0.85)/	1.60	d	仓体裸框架为等效 $\lambda$ ; 条件见文中相应部分
10	5 ~ 6 跨纵向且框剪为承载非倒向或有中跨走廊或框架完整砖墙	前肢下塌中第 3 ~ 4 跨断且后肢前倾覆盖	单大梯	$2.05 \sim 1.20,$ /前肢 $F_{dc} \leq 3.60$	$0.80 \sim 0.40/$			实例,双后柱支撑
11	3 ~ 4 跨框剪、框架、全浇剪力墙 <sup>[32]</sup>	原地双向折叠 <sup>[3,6]</sup>	双三角或双小梯切口	$> 3.00$ ( $\eta_2 > 1.60$ )/	$> 0.50$ ( $\lambda_2 > 0.60$ )/			
12	3 ~ 6 跨框剪、框架、全浇剪力墙	原地塌落 <sup>[4]</sup> 、逐跨塌落且小倾	单三角或小梯	$/0.68 \sim 0.73$ ( $\eta_r$ )	$/0.12 \sim 0.13$ ( $\eta_p$ , 式(9))	$F_{sp} = 1.32 \sim 1.44$ (小倾 1.44) $h_p = 8.26 \sim 9.55$ m	$e_1 \sim e_4$	实例,倾倒需双后柱支撑, $\lambda$ 满足序 1, 切口高差宽比大于 0.55
13	3 ~ 7 跨框剪、框架、全浇剪力墙	原地塌落、层内逐跨塌落且小倾	多切口或多平切口	/上切口顶 $h_o$ 不超 7 层		$F_{dc} \leq 3.6$ $0 \sim 3.90$ (1.05 ~ 4.03, 实例), 式(10)		

表1中:

(1)  $\eta_h$ 、 $\eta_r$  与  $\lambda$  ( $\lambda_1$ )、 $\lambda_p$  对应关系的实例见图4,关系见表1,表内容见文中。 $l_j$ 、 $\lambda_2$ 、 $\eta_2$ 、 $F_{dc}$  和  $h_p$  等见文。

(2) 本表框架是指除楼梯和电梯间外没有混凝土剪力墙的框架结构;完整砖墙指套房(含走廊)间隔墙在倒向剖面无窗无门并接顶靠柱的砖墙。

(3) 当  $3.5 > \eta_h > 2.1$ ,  $\lambda < 0.5$  时,  $\eta_h \geq$  式(7);当  $1.1 > \lambda \geq 0.5$  时,  $\eta_h \geq$  式(6)。

当  $0.2 \leq \lambda \leq 0.4$  时

$$\eta_h = 15.5\lambda^2 - 12.5\lambda + 4.64 \quad (5)$$

当  $1.1 > \lambda \geq 0.5$  时

$$\eta_h = 0.95\lambda^2 - 0.5\lambda + 2.08 \quad (6)$$

以上计算过程及公式见文献[6]中论文。实例的翻倒经验线为

当  $3.5 > \eta_h > 2.1$ ,  $\lambda < 0.5$  时

$$\lambda = \eta_h/4 - [(\eta_h/4)^2 - 0.26]^{0.6} \quad (7)$$

线  $a$  较倾倒重心前移出支面静力倾倒切口低矮。式(7)的  $\lambda < 0.5$  曲线的  $K_{io}$  随  $\eta_h$  增大而渐大,即翻倒能阻势比也增加;多数15层以上楼房  $k_j \approx 1$ ,其翻倒特性只与  $\eta_h$ 、 $\lambda$  有关而与质量关系较小,见1.2节。由此,上述结构坐标( $\lambda$ ,  $\eta_h$ )的点在相似准则曲线  $a$  的上方,可判定楼房整体翻倒。而实例也证实了判定的正确,图3的  $p_1$  和  $p_2$  类的整体翻倒拆除  $18(11p_1 + 7p_2)$  个实例,是国内近15年,仅  $\eta_h < 4$  的该类拆除楼房的总数(3例疑  $p_4$ ),无一例外地证明,图1模型和主惯量比  $k_j = 0.75 \sim 1.25$  的结构<sup>[6]</sup>,都整体翻倒;而表序1与表序2内的  $\eta_h < 5.5$  的拆除楼房的大量实例,也都翻倒。与此相反,图3中表序1和表序2类结构,不满足上述条件,即楼房坐标( $\lambda$ ,  $\eta_h$ )的点在线  $a$  下方,也被其楼房不倒实例证明,切口闭合后将可判定楼房停止翻倒。由此可见,其结构、拆除方法和切口的表序1和表序2匹配正确,且动力方程和判断楼房整体翻倒的相似准则曲线方法也是正确和可靠的。

同理,上述结构楼房要实现双切口双体同向翻倒,以切口匹配的表序3实现;准确判断时,按多体动力方程解的图4中相似准则细实曲线  $b$  族判定。当下行起爆时,其上切口先闭合,形成组合单体翻倒<sup>[33]</sup>,它的下切口相似准则曲线  $b$  族的  $\lambda_1 = h_{cut1}/B$ ,为层内有限下坐后下切口高宽比<sup>[33]</sup>;当  $K_{io} = C_{io} = 1.5$ ,线族  $b$  的线  $b_1$ 、线  $b_2$  和线  $b_3$  分别

为下体高宽比  $l_j = l_1/B = 0.92 \sim 1.36$ (上切口高宽比  $\lambda_2 = h_{cut2}/B = 0.22$ )。因此,表序3结构楼房( $\lambda_1$ ,  $\eta_h$ )的坐标点,在图3对应的相似准则曲线  $b$  族右上方时,该楼房上切口闭合的组合单体将可以翻倒<sup>[33]</sup>,而在线  $b$  左下方时,拆除楼房可失稳倾斜切口闭合,但组合单体最终停止翻倒。事实上,多体动力方程、相似准则曲线和表序3匹配判定翻倒,已为图3中3个实例  $p_7$  所证明正确<sup>[33]</sup>。从以上可见,线  $b$  族可近似由线  $a$  或式(5)稍微下移变来,因此可按线  $b$  和式(5)、式(7)的右上方坐标点( $\lambda_1$ ,  $\eta_h$ )判定翻倒。

同样,点线  $c$  族为4跨以内,  $\eta_h < 2.80$  的框架,且倒向剖面砖墙不靠柱、或不接顶、不完整,有走廊跨或纵向倾倒楼房的相似准则曲线。当楼房初始失稳切口闭合后,梁和柱端及砖墙弯矩,不满足表序2条件,而无法保持梁柱间直角稳定,并分别自间相互平行机构移动,形成同跨前后柱间相对下塌,简称跨间下塌<sup>[33]</sup>。以此类框架、倾倒方式和切口的表序4和表序5匹配,可实现跨间下塌。而图3中  $p_3$ 、 $p_5$  跨间下塌实例( $\lambda$ ,  $\eta_h$ )的点分布在  $\lambda - \eta_h$  相似准则曲线  $c$ (线  $c_1$ 、线  $c_2$ 、线  $c_3$ )族上方<sup>[7]</sup>,与多体动力方程基本一致。图中线  $c$  实例模型为较少砖墙的6层楼房<sup>[7]</sup>,倒向跨数  $n_c = 4$ (含后悬臂跨)相应3跨<sup>[7]</sup>,非倒向跨楼宽11.5m,楼盖内有梁3~4条,其线  $c_1$ 、线  $c_2$ 、线  $c_3$ ( $\lambda$  正向)分别为平均跨长3.8~3.2m的无量纲倾倒阻矩重矩比  $K_{dm} = M/(mgl_o)$ ,式中  $M$ ( $M_{dh}$ )分别为各跨梁前端和后端机构残余弯矩和墙抗剪残余弯矩  $M_f$ 、 $M_r$ 、 $M_q$  之和<sup>[6,7]</sup>,  $l_o$  为结构平均跨长; $K_{dm}$ 是结构反映跨间下塌姿态乃至翻倒的参数,上例  $l_o$  分别对应  $K_{dm}$  在1.25~1.48,引起  $\eta_h$  变化在0.11内,与图3中4个实例基本一致,是可用提高保证系数  $C_{io}$  和容许误差调整的。上例计算过程及公式见文献[6]中论文。当逐跨延迟0.5s起爆,和增大切口  $\lambda$ ,切口闭合前初倾时钢筋已塑性残余拉长,  $M_{dh}$  减小,引起线  $c$  沿  $\lambda > 0.5$  以后,维持  $\eta_h$  最小值,应将曲线  $c$  修正,如图3线  $c_4$  所示。此外,因各楼房楼板结构及其  $M_{dh}$  均相近,其4个实例维持  $\eta_h$  最小值,分布在1.45~1.3之间,与  $K_{dm}$  对应计算  $\eta_h$  变化基本一致。因此,类似上述线  $c$  模型,  $k_j = 0.75 \sim 1.25$  的表1这类少砖墙3~4跨框架<sup>[6]</sup>,倾倒保证系数  $C_{io} = 1.7$ ,实例倾倒能阻功比  $K_{io} \geq C_{io}$  时,式中  $K_{io}$  文献[7]中为倾倒保证率,即上述  $\eta_h >$

1.45 及线  $c_4$  上方楼房是可以跨间下塌而匹配倾倒的。综上所述,多体动力方程、相似准则曲线  $c$  族和表序 4 和表序 5 匹配判定倾倒塌地,已为图 4 中 6 个实例证明正确<sup>[33]</sup>。但是当  $M_{dh}$  难算准,不便判断跨间下塌姿态,应用时参考实例,并可采取下述保证措施,即增高切口加大  $\lambda$ ,随之线  $c_4$  右延,许可爆堆增高。当  $\lambda > 0.85$ ,  $\eta_h < 1.6$  时,切口闭合后,已形成许可高爆堆;当  $\eta_h \leq 1.6$  后,可如后述线  $d$  楼房后坐而倒塌。

此外,3 跨以内的无墙、无楼梯间墙或倒向剖面砖墙不靠柱或砖墙不完整的框架和砖混结构等楼房,切口爆破后,更易层间侧移倾倒<sup>[3]</sup>。图 3 中无墙 1 例,其切口  $\lambda$  可按略低于跨间下塌的相似准则曲线  $c$  族右上方 ( $\lambda, \eta_h$ ) 点确定楼房倒塌,其匹配见表序 6 ~ 表序 8,含有局部层间侧移 2 个实例。

3 跨以内  $\eta_h < 2.80$  的框架完整砖墙楼房,当跨间下塌等上述倒塌缺少保证时,还可采取后坐实现楼房翻倒。即提高次后柱至切口次(下)顶层(2~3 层),保留仅护后柱墙体,预拆除切口层砖墙,当切口爆破后,使切口的次顶层后柱顶形成塑性铰  $b$ ,当铰  $b$  弯矩  $M_{2b} \approx 0$ ,后支撑会后坐并形成上体楼房向前倾倒的 2 体双向运动<sup>[1,3]</sup>,如图 2 所示。即按其结构、倾倒及切口匹配的表序 9,可实现后坐并向前翻倒。将多体动力方程解的角速度  $[q]$ ,计算入式(3),得图 4 中主惯量比  $k_j = 1$ ,楼房翻倒的  $\lambda - \eta_h$  相似准则细实曲线  $d$ (线  $d$  的  $\eta_h$  沿伸至 2 以下),切口顶比较  $b$  高宽比  $h_{bb} = b_i/B = 0.17$ ,式中  $h_b$  为切口顶比较  $b$  高差,是受层高内限的小变量,取其经验在 0.10 ~ 0.25,可提高  $C_{to} = 1.6$ ,简化其次要影响。其计算过程及公式见文献[6]中论文。线  $d$  的拟合式

当  $0.62 \leq \lambda \leq 0.88$  时

$$\eta_h = 13.68\lambda^2 - 23.82\lambda + 11.97 \quad (8)$$

图 3 中以粗实曲线  $d$  表示。因此,在上述条件下,多体动力方程、结构倒塌的切口匹配,和相似准则曲线  $d$  基本一致,楼房的 ( $\lambda, \eta_h$ ) 坐标点在线  $d$  右上方。当翻倒能阻势比  $K_{to} > C_{to}$  而实现后坐翻倒,均为 6 个实例证明正确。而在线  $d$  和线  $a$  下方,同时又在线  $c$  族上方,可  $B$  减去前走廊净宽,当此算  $\eta_h > 2.1$  时,可判定楼房翻倒;无前走廊的,可增大切口  $\lambda > 0.85$ ,若后柱不断,当  $\eta_h \geq 1.6$  时,可按线  $d$  判断楼房倒塌,而当  $\eta_h < 1.6$  时,切口闭合则已成为了许可高爆堆。

拆除楼房要缩小爆堆,前后方及两侧又有适当场地,可双切口双向多折叠倾倒拆除,以多体动力方程解算<sup>[32]</sup>,结果见表序 11。按其要求,楼房可以倒塌<sup>[32]</sup>,并应校验符合爆堆许可下体高宽比  $l_j$  和上体高宽比  $\eta_2$ ,见表序 11。

2 层内楼房下坐,可用切口上结构定质量冲击功计算<sup>[6]</sup>;15~25 层高楼超过 2 层原地下坐,用层间连续塌落质量散失模型计算<sup>[3]</sup>,见图 4<sup>[4]</sup>,如表序 12 和表序 13。图 3 中点划线  $e$  族为变质量塌落方程(4)的解<sup>[5]</sup>,图中相似准数  $\lambda_p = h_p/h_o$ ,  $\eta_r = y_r/h_o$ ,式中  $h_p$  为除梁高外切口平均高(3 跨以上大梯形切口或平切口),  $y_r$  为层间下坐坍塌后爆堆上的楼房高,  $h_o$  为平均切口上方(从上楼盖面的底板面算起)楼层高。从方程(4)和  $v_0^2 = 2gh_p$ ,由方程解可导出相似准则公式<sup>[5,6]</sup>

$$\lambda_p = F_p(1 - \eta_r^2)/2 - (1 - \eta_r^3)/3 \quad (9)$$

式中:  $F_p = K_{to}F_{sp}$ ,  $F_{sp} = S_l\sigma_{cg}/(gh_o\rho)$ ;  $S_l$  为楼房切口上的下层支撑体平均截面积;  $\sigma_{cg}$  为支撑体的等效动强度<sup>[3]</sup>;  $F_{sp}$  为无量纲支重比,并只能现场实测。图 3 中点划线  $e_1 \sim e_8$  分别为  $F_{sp}$  的 1.2 ~ 2.6 的等差 0.2 的式(9)的相似准则曲线  $e$  族(图示  $K_{to} = C_{to}$  为 1.1 的  $F_p$ ,式中  $C_{to}$  为保证率)。当  $K_{to} \geq C_{to}$  时,楼房可按  $y_r$  而层间连续塌落。

当楼房前有倾倒塌地时,经济拆除 20 层以上高楼,可用表序 12 单切口塌落兼倾倒的方法实现,爆后塌落前的切口高差宽比大于 0.55,双后柱支撑,如图 3 中  $p_8$  的 2 个实例。倾倒下爆堆前宽近似  $y_r$ ,当用  $F_{sp}$  计算时,参考从图 3 中  $p_8$  的 2 个实例选取参数。单切口逐跨延迟 0.5 s 起爆,符合“中国规范”的 20~27 层楼房的  $F_{sp}$ ,经方程反演为 1.32 ~ 1.44,当算  $\lambda_p$  可取其偏大值 1.44 和  $C_{to}$  取 1.1;当算  $y_r$  前倒时,要多留安全场地距离。

当楼房前倒塌地受限,可采用多切口同时(或短延时上行)起爆,层内逐跨延迟 0.5 s 起爆的塌落拆除方法(多为纵向),见表序 13。切口的塌(塌陷层高)与切(切口除梁高)比为  $F_{dc}$  也只能现场实测,方程反演为 3.9 ~ 1.0(对应图 3 的  $\lambda_p$  轴从左至右),见图 3 中  $p_9$  的 5 个实例。25 层以下高楼多切口层间连续塌落,  $F_{dc}$  可取 3.6 以下,其中底层可小,中高层取大值,上切口顶  $h_o$  不超 7 层。由于楼房塌落爆堆上的  $y_r \approx 0$ ,可从下式  $\lambda_p$  依  $F_{dc}$  定义逆算出  $\eta_r$

$$F_{dc} = (1 - \eta_r)/\lambda_p \quad (10)$$

由于同时起爆(或短延时上行),可逐切口上

行累加各切口增塌闭合高度,从而提高冲击速度<sup>[2]</sup>,降低应力峰值衰减,见图3中实例 $p_9$ ,其中实例 $F_{dc}$ 可高达3.9。

纵向倾倒的5~6跨楼房框架,倒向楼宽近20 m以上,若单大梯形切口,层内逐跨延迟0.5 s起爆,双后柱支撑,在倾倒切口闭合前,中跨连接梁(或走廊跨)因不能承受前体重力导致的弯矩和剪力而断开,前体下塌,后体跟随翻倒覆盖,见表序10的实例,本文定义为倾倒下塌拆除<sup>[3,6]</sup>。从图3中3个 $p_6$ 实例,可见前体塌坍 $F_{dc}$ 可从小逐大接近3.6,后体覆盖翻倒,实例全楼 $\eta_h$ 可低至1.2。若 $F_{dc} < 1$ 可采取表序13多切口原地塌落拆除楼房。

综上所述,若拆除楼房 $[\lambda(\lambda_1, \lambda_p), \eta_h(\eta_r)]$ 的坐标点在图3相应相似准则曲线上方附近(含跨间下塌 $\lambda \geq 0.5$ ,多切口塌落 $F_{dc} \leq 3.6$ ),楼房切口闭合后可以倒塌;当按照经多体动力方程解算并为大多数实例验证的表1,选择拆除参数时,楼房将可靠倒塌。

以上图3中的部分相似准则曲线分别发表于2012~2015年<sup>[5]</sup>,已表明正确。本文在图3中标注46个表1实例,证明多体动力方程及其切口控拆技术理论正确;而表1中我国长方楼房常见结构-切口的匹配关系也是正确的,因此可以简便地确定我国楼房结构的多种拆除方式和切口尺寸,为各类楼房结构选择合理倒塌方式和切口参数提供了新理论和新方法。

## 2.2 其他拆除效果

同理,其他拆除效果,包括爆堆前沿宽和高<sup>[3,5,6]</sup>、楼房的后坐<sup>[5,6]</sup>、楼房的下坐<sup>[3,5,6]</sup>、起爆次序和时差等<sup>[5,6]</sup>,都已通过无量纲图表而确定<sup>[5,6]</sup>。

## 3 结语

拆除建筑物倒塌的多体-离散体动力观,描述建筑物的爆破拆除,机理清晰、正确,符合实际。建立的变拓扑多体动力方程组和变质量塌落动力方程,可由计算机符号运算自动建模<sup>[3]</sup>,衍生出十余个拆除方程,如其中的方程(1)和方程(4)等,并获得了解析解,如式(2)等,以及近似解和数值解等,由此既可单独模拟拆除倒塌的关键过程,又可组合后变拓扑全局仿真。

应用近景摄影测量数值和实例的动力方程反演<sup>[3]</sup>,可求得破损钢筋混凝土材料的塑性动力参

数和结构拆除参数,如参数 $C_{to}$ 、 $F_{sp}$ 、 $F_p$ 、 $F_{dc}$ 、 $\eta_r$ 、 $\lambda_p$ 、 $\eta_2$ 和 $\lambda_2$ 等。

应用这些参数、动力方程解及其导出的相似准则,组建了各类结构不同倒塌方式的楼房倒塌切口公式,即楼房整体翻倒的单切口相似准则曲线拟合式(5)和它的另域式(6)及切口经验式(7),跨间下塌(含层间侧移)框架楼房切口相似准则实例修正线 $c_4$ ,单切口有后坐楼房翻倒的相似准则曲线拟合式(8),高楼原地层间连续冲击塌落相似准则式(9)和高楼多切口原地冲击塌落切口经验式(10)等,以及动力方程模拟的楼房双切口同向翻倒相似准则曲线 $b$ 族,以及图3中楼房其他倒塌相似准则曲线 $a$ 族、线 $c_4$ 、线 $d$ 和线 $e$ 族等,且为实例验证正确。

并且,从实例数据图3中,类比主要结构与其匹配切口的相似准则曲线,获得了判断这些结构切口楼房倒塌的规则,即:拆除楼房 $[\lambda(\lambda_1, \lambda_p), \eta_h(\eta_r)]$ 的坐标点在图3相应结构相似准则曲线上方附近(含跨间下塌 $\lambda \geq 0.5$ ,多切口塌落 $F_{dc} \leq 3.6$ ),楼房切口闭合后可以倒塌;并为拆除楼房46个实例验证正确。

由此,提出了我国楼房常见结构-倒塌方式-切口特性的匹配关系表,涵盖了从容许爆堆高以上的 $\eta_h > 1.45 \sim 1.6$ 至 $\eta_h$ 超5.5的楼房倾倒的切口。并按此表,在类似条件下选择拆除参数时,楼房将可靠倒塌。继而用无量纲图表确定其他拆除效果等<sup>[5,6]</sup>。

由此,为楼房拆除选择合理的倒塌方式、拆除措施和切口参数提供了新理论和分类简便的新算法。虽然有些计算参数还需继续实测,但是多体动力学切口控拆技术(MBDC),经现场观测和工程实例证明,基本上是正确的、简便而准确的。

## 参考文献 (References)

- [1] 魏晓林,傅建秋,李战军. 多体—离散体动力学分析及其在建筑爆破拆除中的应用[C]//庆祝中国力学学会成立50周年大会暨中国力学学术大会'2007:论文摘要集(下).北京:中国力学学会办公室,2007:690.
- [1] WEI Xiao-lin, FU Jian-qu, LI Zhan-jun. Analysis of multi-body-discretebody dynamics and its applying to building demolition by blasting[C]//Collectanea of Discourse Abstract of CCTAM2007(Down). Beijing:China Mechanics Academy Office,2007:690. (in Chinese)

- [2] 魏晓林,郑炳旭,魏挺峰. 爆破拆除高丛建筑定轴倾倒地动力方程解析[C]//合肥工业大学学报(自然科学版). 合肥:岩石力学学会,2009:1466-1468.
- [2] WEI Xiao-lin, ZHENG Bing-xu, FU Jian-qiu. Analytical solution to dynamic equation buildings demolished by blasting[C]//Journal of HFEI university of technology (natural science). HFEI; Society of Rock Mechanics, 2009:1466-1468. (in Chinese)
- [3] 魏晓林. 建筑物倒塌动力学(多体-离散体动力学)及其爆破拆除控制技术[M]. 广州:中山大学出版社,2011.
- [4] 魏晓林,魏挺峰. 爆破拆除高丛建筑下坐动力方程[C]//合肥工业大学学报(自然科学版). 合肥:岩石力学学会,2009:1457-1461,1472.
- [4] WEI Xiao-lin, WEI Ting-feng. Dynamic equation for stiiing down of high buildings demolished by blasting[C]//Journal of HFEIuniversity of technology (natural science). HFEI; Society of Rock Mechanics, 2009: 1457-1461,1472. (in Chinese)
- [5] 魏晓林. 爆破拆除科技发展及多体-离散体动力学[J]. 爆破,2015,32(1):93-100,125.
- [5] WEI Xiao-lin. Scientific development of buldingdemolishedby blasting and multibody-discretebodydynamics [J]. Blasting,2015,32(1):93-100,125. (in Chinese)
- [6] 魏晓林. 爆破拆除建筑物及多体-离散体动力分析[M]. 广州:中山大学出版社,2018.
- [7] 魏晓林. 爆破拆除框架跨间下塌的切口参数[J]. 工程爆破,2013,19(5):1-4,13.
- [7] WEI Xiao-lin. Cutting parameters of toppling frame building demolished with collapse in beam span by blasting [J]. Engineering Blasting, 2013, 19 (5): 1-4, 13. (in Chinese)
- [8] 马宏昊,沈兆武,徐斌,等. 15层大楼爆破拆除技术探讨[J]. 工程爆破,2009,15(2):5-9.
- [8] MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu, XU Bin, et al. Blasting demolition of 15-story building[J]. Engineering Blasting, 2009,15(2):5-9. (in Chinese)
- [9] 程涛,孟繁树,田园,等. 闹市区框剪结构楼房爆破拆除与有害效应控制[J]. 工程爆破,2018,24(6):65-69.
- [9] CHENG Tao, MENG Fan-shu, TIAN Yuan, et al. Blasting demolition and harmful effect control of frame shear wall structure in downtown area [J]. Engineering Blasting, 2018,24(6):65-69. (in Chinese)
- [10] 谢钱斌. 内部结构复杂的高层楼房拆除爆破[J]. 工程爆破,2019,25(5):52-56.
- [10] XIE Qian-bin. Demolition blasting of high-storey buildings with complex internal structure [J]. Engineering Blasting,2019,25(5):52-56. (in Chinese)
- [11] 史家培,程贵海,郑长青. 建筑物爆破拆除理论与实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [12] 高主珊,孙跃光,张春玉,等. 20层剪力墙结构定向与双向折叠爆破拆除[J]. 工程爆破,2010,16(4):51-54,25.
- [12] GAO Z S, SUN Y G, ZHANG C Y, et al. Demolition of 20-story shear wall structure by directional and bidirectional folding blasting [J]. Engineering Blasting, 2010, 16(4):51-54,25. (in Chinese)
- [13] 张建平,费鸿禄,屈光健,等. 异型截面楼房定向爆破的关键技术和应用[J]. 爆破,2017,34(1):117-123.
- [13] ZHANG Jian-ping, FEI Hong-lu, QU Guang-jian, et al. Key technology and application of directional blasting for special-shaped buildings [J]. Blasting, 2017, 34 (1): 117-123. (in Chinese)
- [14] 罗福友,周浩仓,陶明,等. 高配筋力柱楼房定向爆破拆除技术[J]. 工程爆破,2018,24(1):43-49,62.
- [14] LUO Fu-you, ZHOO Hao-cang, TAO Ming, et al. Directional demolition blasting technology for a building with high reinforced ratio of in column[J]. Engineering Blasting,2018,24(1):43-49,62. (in Chinese)
- [15] 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.
- [15] MA Shi-ming, YU Xing-chun, REN Shao-hua, et al. Folding demolition blasting of 14-story frame shear building in complex environment [J]. Engineering Blasting,2021,27(1):69-73,78. (in Chinese)
- [16] 陶明,罗福友,程三建. 复杂环境下多排立柱框架楼房爆破拆除技术[J]. 工程爆破,2018,24(3):39-43.
- [16] TAO Ming, LUO Fu-you, CHENG San-jian. Demolition blasting technology of multi row column frame building in complex Environment [J]. Engineering Blasting, 2018,24(3):39-43. (in Chinese)
- [17] 徐天柱,张计璨,赵彭,等. 复杂环境下40米高楼房定向爆破拆除[J]. 工程爆破,2013,19(6):28-30.
- [17] XU Tian-zhu, ZHANG Ji-can, ZHAO Peng, et al. Demolition of 40m high building by directional blasting in complex Environment [J]. Engineering Blasting, 2013, 19(6):28-30. (in Chinese)
- [18] 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.
- [18] GAO Wen-le, ZHANG Ze-hua, SU Kai-kai, et al. Directional blasting demolition of multi-section bearing column [J]. Engineering Blasting, 2018, 24 (2): 59-65. (in Chinese)

- [19] 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.
- [19] PAN Hong-xing. The directional blasting of 52 m high coal workshop [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(1): 45-50. (Chinese)
- [20] 董保立, 张纪云, 王 晓, 等. 复杂环境下 12 层框剪楼房爆破拆除[J]. 工程爆破, 2017, 23(2): 58-61.
- [20] DONG Bao-li, ZHANG Ji-yun, WANG Xiao, et al. Blasting demolition of 12-story frame shear structure building under complicated environment [J]. Engineering Blasting, 23(2): 58-61. (in Chinese)
- [21] 王洪刚, 韩传伟, 王 威, 等. 复杂环境下“H”型 8 层框架结构楼房同向爆破拆除[J]. 爆破, 2017, 34(4): 120-124.
- [21] WANG Hong-gang, HAN Chuan-wei, WANG Wei, et al. Demolition explosive demolition of "H" type 8-layer frame-structure reinforced concrete building [J]. Blasting, 2017, 34(4): 120-124. (in Chinese)
- [22] 李 瑜, 周仓浩. 高大凹型结构楼房爆破后坐分析[J]. 工程爆破, 2018, 24(2): 53-58.
- [22] LI Yu, ZHOU Cang-hao. Analysis of backward of tall and concave = structure [J]. Engineering Blasting, 2018, 24(2): 53-58. (in Chinese)
- [23] 张建平, 张龙飞, 王俊生, 等. V 型截面楼房定向爆破技术参数与应用[J]. 工程爆破, 2017, 23(3): 68-72.
- [23] ZHANG Jian-ping, ZHANG Long-fei, WANG Jun-sheng, et al. Directional blasting parameters design and application of v-cross-section building [J]. Engineering Blasting, 2017, 23(3): 68-72. (in Chinese)
- [24] 蒋跃飞, 张正忠, 郭达胜, 等. 13 层框剪结构楼房爆破拆除[J]. 工程爆破, 2007, 13(4): 63-65.
- [24] JIANG Yue-fei, ZHANG Zheng-zhong, GUO Da-sheng, et al. Blasting demolition of 13-story building of shear wall in reinforced concrete frame [J]. Engineering Blasting, 2007, 13(4): 63-65. (in Chinese)
- [25] 齐世福, 胡良孝, 李尚海. 17 层综合办公大楼定向爆破拆除[J]. 工程爆破, 2003, 9: 29-33.
- [25] QI Shi-fu, HU Liang-xiao, LI Shang-hai. Demolition of 17 storeyed complex office building directional blasting [J]. Engineering Blasting, 2003, 9: 29-33. (in Chinese)
- [26] 李卫群, 钟 云, 周浩仓. 质量不均衡大高宽比框架结构楼房控制爆破实践[J]. 工程爆破, 2021, 27(4): 75-85.
- [26] LI Wei-qun, ZHONG-yun, ZHOU Hao-cang. Control blasting practice of unbalanced frame wall structure with a high height-to-width ratio [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(4): 75-85. (in Chinese)
- [27] 叶海旺, 李 庆, 郑长青, 等. 22 层框架楼房爆破拆除倒塌过程分析 [C] // 2020 年广东省力学学会学术年会报告摘要目录. 佛山: 广东省力学学会, 2020: 24.
- [27] YE Hai-wang, LI Qing, ZHENG Chang-qing, et al. Analysis of collapse process of 22-story frame building demolished by blasting [C] // Summary of Report of Guangdong Mechanics Society Annual Conference in 2020. Foshan: Guangdong Mechanics Society, 2020: 24. (in Chinese)
- [28] 杨 阳, 杨仁树, 李 清, 等. 复杂环境下加固型抗震大楼爆破拆除及数值模拟预测 [J]. 工程爆破, 2015, 21(4): 24-28, 68.
- [28] YANG Yang, YANG Ren-shu, LI Qing, et al. Rugged seismic building demolition blasting under complication environment and its numerical simulation prediction [J]. Engineering Blasting, 2015, 21(4): 24-28, 68. (in Chinese)
- [29] 黄土辉, 朱 军, 朱立昌, 等. 内爆法 (Implosion) 拆除 68m 框剪结构大楼 [J]. 工程爆破, 2007, 13(2): 47-50, 24.
- [29] HUANG Shi-hui, ZHU Jun, ZHU Li-chang, et al. Blasting demolition of a 68m frame and shear wall high-rise by implosion [J]. Engineering Blasting, 2007, 13(2): 47-50, 24. (in Chinese)
- [30] 张北龙, 邢光武, 贵鸿禄, 等. 复杂环境下高层建筑拆除爆破的振动危害控制 [J]. 工程爆破, 2016, 22(2): 70-73.
- [30] ZHANG Bei-long, XING Guang-wu, GUI Hong-lu, et al. Controlling of vibration damage in demolition blasting of high-rise buildings under complex environment [J]. Engineering Blasting, 2016, 22(2): 70-73. (in Chinese)
- [31] 李友军, 张北龙, 郑 耿, 等. 高层建筑物多切口大角度定向爆破技术与应用 [J]. 工程爆破, 2019, 25(2): 45-50, 56.
- [31] LI You-jun, ZHANG Bei-long, ZHENG Geng, et al. Technology and paactic of multiple incision and large angle directional blasting in high-rise buildings [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(2): 45-50, 56. (in Chinese)
- [32] 魏晓林. 反向双切口爆破拆除楼房切口参数 [J]. 爆破, 2013, 30(4): 99-103.
- [32] WEI Xiao-lin. Cut parameter in explosive demolition of building with two reverse cutting [J]. Blasting, 2013, 30(4): 99-103. (in Chinese)
- [33] 魏晓林. 双切口爆破拆除楼房切口参数 [C] // 中国爆破新技术 III. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 576-580.
- [33] WEI Xiao-lin. Cutting parameter of building demolished by blasting with two cutting [C] // New Techniques in China III. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 2012: 576-580. (Chinese)