

基于离心模型的高层建筑物爆破拆除倒塌过程及相似性研究

辛光明¹, 董昌盛²

¹烟台大地爆破工程有限公司, 山东 烟台

²山东省公安厅治安管理总队, 山东 济南

收稿日期: 2026年5月22日; 录用日期: 2026年6月14日; 发布日期: 2026年6月25日

摘要

本文通过 π 定理推导出适用于考虑重力效应的相似理论, 结合某市中心城区超高层大楼爆破拆除工程, 基于LS-DYNA数值模拟技术, 依据相似关系建立1/20和1/100的高层建筑物缩比模型, 对高层建筑物爆破拆除的倒塌过程的原型和尺寸缩比模型进行模拟, 验证了建筑物倒塌过程中的楼体速度和时间的相似关系, 为高层建筑物爆破拆除倒塌过程的离心模型研究提供了理论参考。

关键词

高层建筑物, 爆破拆除, 离心相似律, 倒塌过程

Study on Collapse Process and Similarity of Blasting Demolition of High-Rise Buildings Based on Centrifugal Model

Guangming Xin¹, Changsheng Dong²

¹Yantai Dadi Blasting Engineering Co., Ltd., Yantai Shandong

²Public Security Administration Corps of Shandong Provincial Public Security Department, Jinan Shandong

Received: May 22, 2026; accepted: June 14, 2026; published: June 25, 2026

Abstract

In this paper, the similarity theory considering gravitational effects is derived based on the Buckingham π theorem. Taking the blasting demolition project of a super high-rise building in the central urban area of a city as the engineering background, two scaled high-rise building models with geometric scale ratios of 1/20 and 1/100 are established following similarity laws with the aid

of LS-DYNA numerical simulation. Numerical simulations on the collapse process induced by blasting demolition are conducted for both the prototype structure and the two scaled models. The similarity criteria for structural velocity and collapse duration during building collapse are verified. This study offers theoretical references for centrifugal model investigations on the collapse behavior of high-rise buildings subjected to blasting demolition.

Keywords

High-Rise Buildings, Blasting Demolition, Centrifugal Similitude Law, Collapse Process

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市建设飞速发展, 基础设施更新越来越多, 部分城市建筑物由于不能满足对其使用功能的进一步扩大的需求而需要实施拆除也需要拆除重建。对高层建筑物采用爆破拆除法比传统的机械破碎法、切割拆卸法在工期、安全和环境影响等方面具有明显优势。然而, 面临城市内环境复杂的问题, 采用爆破手段拆除高层建筑的同时又要确保高层建筑物的倒塌方向、倒塌冲击不影响周边其它目标或建筑物, 需要对爆破拆除高层建筑的倒塌过程规律进行研究。叶振辉[1]、黄士辉等[2]、高主珊等[3]、郭进等[4]结合工程对高耸建筑物的爆破拆除方式和坍塌形式进行了研究; 谭雪刚等[5]对高层建筑物爆破拆除中的大孔径装药技术进行了研究探讨; 刘昌邦等[6]研究了框架结构楼房采取逐跨向内倾倒爆破拆除方式, 并依托 LS-DYNA 进行了仿真分析; 崔铁军等[7] [8]基于颗粒流的爆破算法对高层建筑物爆破拆除和飞机撞击后的坍塌过程进行了分析。

高层楼房的爆破拆除倒塌过程及冲击效应的研究除了结合工程实例, 通过经验公式和数值模拟手段进行研究, 还有需要进行相应的试验研究, 但是以大型建构物为研究对象的原型试验进行难度很大, 多以模型试验为主, 但 Murphy [9]指出在普通重力场中, 尺寸缩比试验不能合理地模拟重力荷载。考虑到重力场影响的缩比模型试验, 前提条件不仅需要满足尺寸相似, 而且需要满足重力相似; 因此, 考虑重力相似的模型试验需要借助离心机完成。Kutter 等[10]进行了地下隧道的爆炸离心模型试验研究, 进行了不同加速度条件下的试验, 验证了离心模型比尺的相似关系; 马上等[11], 宋歌等[12], 刘世聪等[13]均对不同离心机模型试验的相似关系开展了研究; Anirban 等[14]进行了地表爆破作用下管线、隧洞等地下结构物的离心模型试验研究, 研究了不同防护措施对爆炸冲击作用的削弱效果; Hu 等[15]-[17], 王思等[18]利用离心模型试验技术, 进行了水下爆炸载荷对重力坝动态响应研究。本文主要结合爆破拆除工程针对高层建筑物倒塌过程的离心相似模型进行了理论推导和数值模拟研究。首先, 依据 π 定理, 对影响高层建筑物倒塌过程的各个参量进行了量纲分析, 得出离心模型的相似关系; 其次, 结合工程实际, 建立等尺寸的高层建筑物数值模型, 依据爆破拆除方案进行计算并得到高层建筑物倒塌过程; 最后, 依据相似关系建立 1/20 和 1/100 的高层建筑物缩比模型, 对高层建筑物的倒塌过程, 验证相似关系, 为建筑物倒塌离心模型试验提供理论参考。

2. 高层建筑物倒塌过程相似关系

研究高层建筑物爆破拆除工程中的倒塌过程时, 假设作为楼体材料的混凝土为连续均匀的固体介质, 且倒塌过程属于缓慢过程, 忽略应变率对材料强度的影响, 仅考虑以下参量对倒塌过程的影响, 密度 ρ ,

弹性模量 E , 泊松比 μ , 破坏强度 f , 特征尺寸 l , 重力加速度 g 。待测参量为楼体倒塌的速度 v 和时间 t 。于是有:

$$f(v, \rho, E, \mu, f, l, g) = 0 \quad (1)$$

$$f(t, \rho, E, \mu, f, l, g) = 0 \quad (2)$$

然后选取楼体密度 ρ , 弹性模量 E , 特征尺寸 l , 为基本量, 由 π 定理可得:

$$f\left(\frac{v\rho^{1/2}}{E^{1/2}}, \mu, \frac{f}{E}, \frac{\rho gl}{E}\right) = 0 \quad (3)$$

$$f\left(\frac{tE^{1/2}}{l\rho^{1/2}}, \mu, \frac{f}{E}, \frac{\rho gl}{E}\right) = 0 \quad (4)$$

在进行尺寸缩比模型研究时, 采用的材料通常是相同的, 即楼体的力学参数是确定的, 则 ρ, E, μ, f 均为常数, 于是上式可简化为:

$$v = f_1(gl) \quad (5)$$

$$t = lf_2(gl) \quad (6)$$

若模型和原型采用的楼体材料介质是相同的, 为使模型与原型各个待测参量符合相似关系, 则需满足下列相似条件:

$$g_m l_m = g_p l_p \quad (7)$$

则待测参量符合下列相似关系:

$$\frac{v_m}{v_p} = 1; \quad \frac{t_m}{t_p} = \frac{l_m}{l_p} \quad (8)$$

若模型与原型的特征尺寸比尺为 λ_l , 即:

$$\frac{l_m}{l_p} = \lambda_l \quad (9)$$

则重力加速度比尺应当为:

$$\lambda_g = \frac{g_m}{g_p} = \frac{1}{\lambda_l} \quad (10)$$

根据以上分析, 在研究高层建筑物爆破拆除中, 楼体的倒塌不但要满足简单的几何相似, 还要符合重力相似。此类的模型试验研究需要借助离心机技术进行研究。基于离心机技术和重力相似原则研究高层建筑物倒塌对地冲击问题, 模型和原型之间符合离心相似关系, 即若满足模型对应原型的长度缩比为 λ , 重力加速度的缩比为 $1/\lambda$, 则有相对应的相似关系, 如表 1。

Table 1. The similarity relation

表 1. 相似关系

参量分类	参数名称	原型参量	模型参量	参量缩比
长度参数	特征尺寸	l	λl	λ
重力参数	重力加速度	g	g/λ	$1/\lambda$
楼体倒塌参量	倒塌速度	v	v	1
	倒塌时间	t	λt	λ

3. 高层建筑爆破拆除工程及有限元模型

以某市中心城区四栋超高层大楼中 T1 楼的爆破拆除为例[19], 该楼为框架核心筒结构, 长 58.3 m, 7 跨 8 排柱, 宽 31.4 m, 4 跨 5 排柱, 总建筑高度 106.2 m。电梯及楼梯核心筒布置于正中间, 尺寸为 9.2 m × 3.74 m。建筑周边环境和平面布局如图 1 和如图 2。



Figure 1. High-rise buildings to be demolished and surrounding environment
图 1. 待拆高层建筑物及周边环境

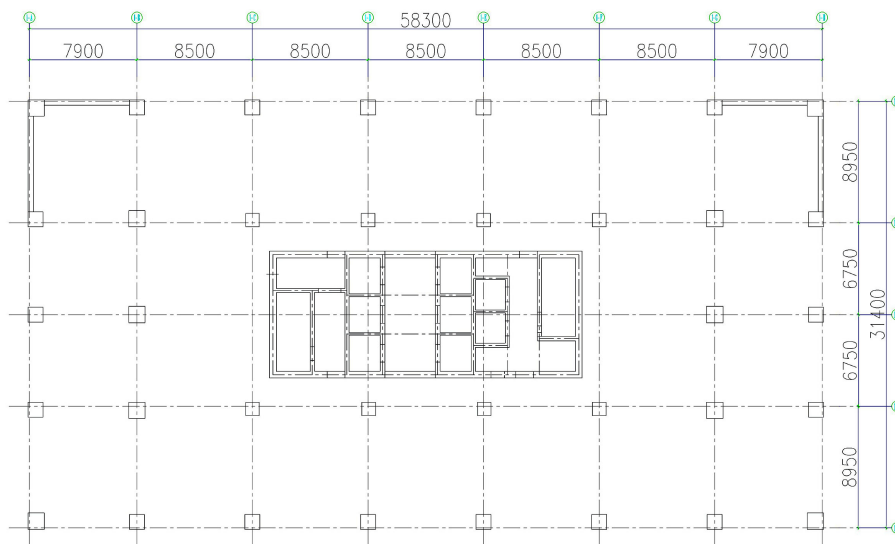


Figure 2. The layout plan of column and core tube of T1 building
图 2. T1 楼立柱和核心筒布置平面图

按照 T1 楼的框架核心筒结构及材料和尺寸参数, 建立楼体的柱、梁、楼板、剪力墙等主要结构。其中, 柱和梁采用 beam 单元, 楼板和剪力墙采用 shell 单元, 钢筋混凝土本构采用整体式材料模型, 地面考虑为刚体, 其中楼体的柱、板、梁等结构墩柱的材料均为钢筋混凝土。采用 LS-DYNA 程序中的 MAT124 号材料 PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION, 该材料模型可以综合考虑混凝土的受拉和受压力学性能, 可以自定义拉压状态的应力、应变曲线, 同时, 可以考虑应变率的影响。根据设计资料, 待拆建筑物的混凝土强度约为 55 MPa, 弹性模量约 36 GPa。

在实际的高层建筑物爆破拆除中, 采用同向双切口定向倒塌, 设计 2 个爆破切口, 大楼 1~5 层和 13~15 层各形成一道爆破切口使大楼定向倾倒, 利用炸药的爆炸作用破坏立柱和剪力墙, 使楼体失去支撑向下

坍塌, 在数值计算中, 如图 3。为简化数值模型和提高计算效率, 仅假设高层建筑物结构的关键部位在内部爆破的作用下被摧毁破坏, 即在计算中将被爆破破坏的结构整体删除, 忽略炸药爆炸的过程和作用。在本数值模型计算中, 5 组立柱和剪力墙采取延时起爆, 作为 5 个 part 依据起爆顺序与时间间隔, 在相应的时间点删除, 而后楼体在重力作用下向下坍塌, 如图 4。

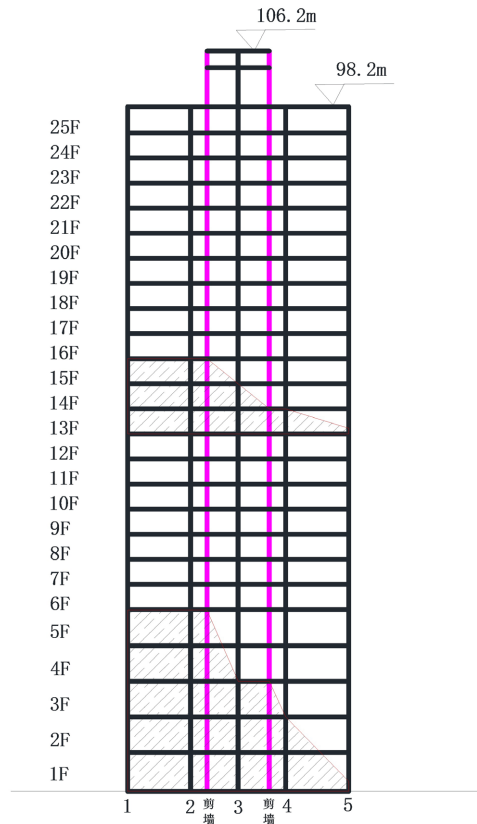


Figure 3. Elevation and blasting cut layout of T1 and T2 buildings
图 3. T1、T2 楼立面及爆破切口布置图

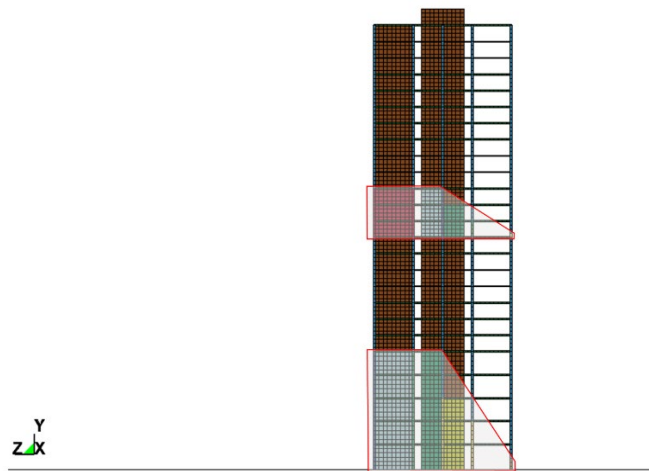
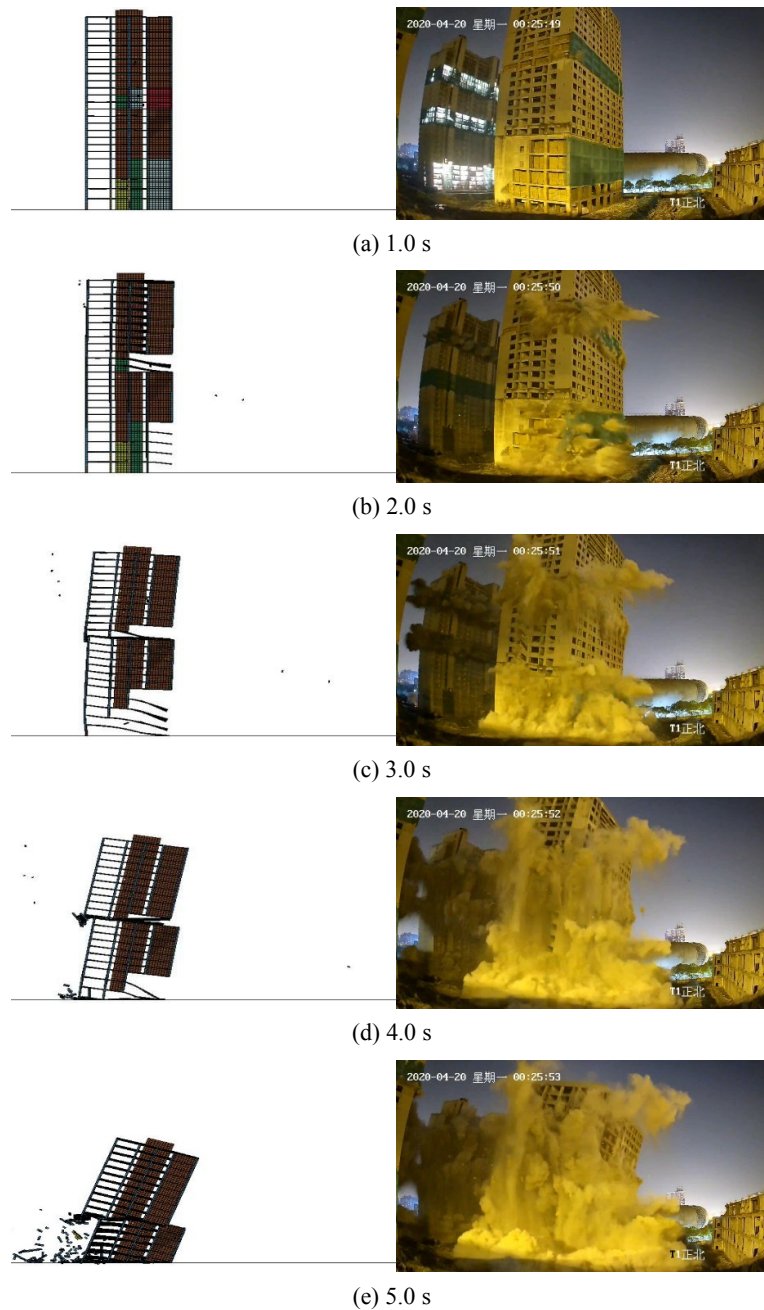


Figure 4. Finite element model and blasting cut of T1 building
图 4. T1 楼有限元模型及切口示意图

4. 实际爆破效果和数值计算结果分析

4.1. 倒塌过程分析

在数值计算中, 设置 13~15 层最外侧立柱为第 1 组立柱, 起爆时刻为 1 s, 第 1 层最后一层立柱为第 5 组立柱, 爆破高度为立柱高度的 1/3, 起爆时刻为 3.5 s。随着各组立柱柱按着起爆序列依次爆破破坏, 各组爆破间隔 0.5 s, 其余墩柱按照相应的延时依次删除。失去墩柱支持的部分楼体在重力作用下开始依次加速下落。图 5 为数值计算得到的高层建筑物模拟倒塌过程与通过高速摄影拍摄的高层建筑物实际倒塌过程。通过图 5 可以观察到, 在高层建筑物的墩柱按照一定的起爆序列和延时依次爆破的基础上, 高层建筑物的楼体部分也随着墩柱的破坏发生弯曲, 呈曲线形状依次向下倒塌, 并依次触地。



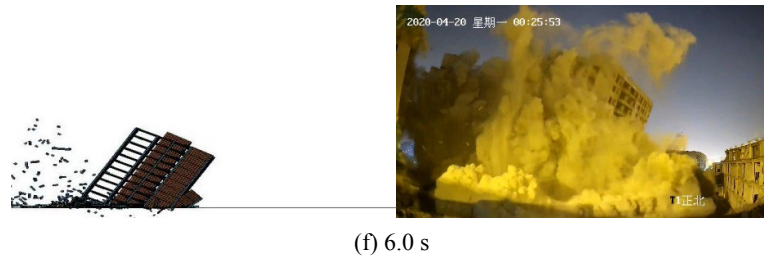


Figure 5. Numerical calculation and practical comparison of collapse process of high-rise building blasting demolition
图 5. 高层建筑物爆破拆除倒塌过程的数值计算和实际效果对比

楼体失去墩柱支持后朝切口方向倒塌, 根据图 5 中数值计算和实际的倒塌过程, 两个爆破切口将楼体分为上下两个部分, 其在向下倒塌过程中能够基本保持原有结构, 在切口上部楼体与下部楼体撞击、下部楼体与地面撞击时会发生较大断裂和破碎, 并扬起大部分粉尘, 如图 6。

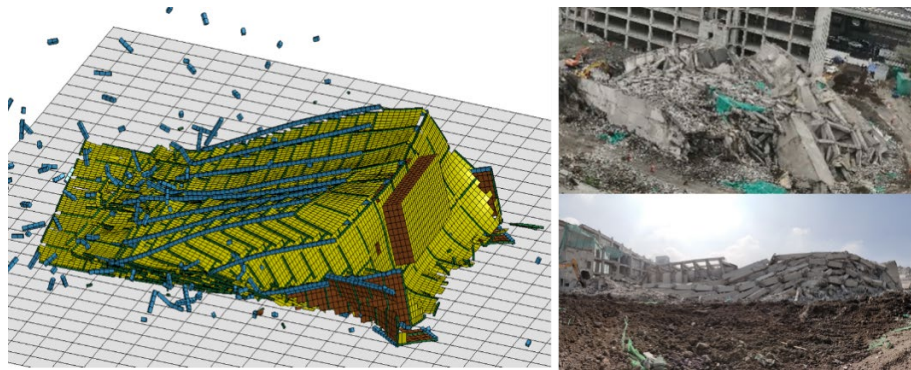


Figure 6. Numerical calculation and actual blasting of high-rise building fragmentation
图 6. 数值计算和实际爆破中高层建筑物楼体破碎情况

4.2. 相似性分析

上一节的数值模型是以工程实例中高层建筑的原型尺寸为基础建立的, 以楼体高度为特征长度, 高度为 106.2 m。另以该楼体为原型, 尺寸等比缩小, 重力加速度等比增大, 网格尺寸不变, 建立 1/20 和 1/100 的模型, 模型参量依据表 1 所述相似关系确定, 尺寸缩比为 λ , 时间缩比为 λ , 加速度缩比为 $1/\lambda$ 。工况设置和模型参量如表 2, 工况 1 为楼体原型, 工况 2 和工况 3 是尺寸缩比分别为 1/20 和 1/100 的模型。

Table 2. Working parameters of the numerical model

表 2. 数值模型各工况参数

工况	尺寸缩比	特征长度 - 楼体高度(m)	重力加速度(m/s ²)	最小网格尺寸(cm)	单元总数	计算时长(s)
1	1	106.2	9.8	100	74,020	8
2	1/20	5.31	196	5	74,020	0.4
3	1/100	1.06	980	1	74,020	0.08

以顶层和 15 层高度点为特征点, 原型顶层高度 106.2 m、15 层高度 62.1 m。图 7(a)和图 7(b)表示 1/20 模型和 1/100 模型工况中楼体顶层、15 层在倒塌过程中的垂直方向位移曲线。两个缩比模型按照相似关系, 位移和时间数值上分别除以尺寸缩比 1/20 和 1/100, 将模型数据换算到原型, 并与原型数据做对比,

得到如图 8 所示特征点垂直方向位移曲线, 根据结果可知, 原型数据与模型转换到原型的数据基本一致, 符合相似关系。

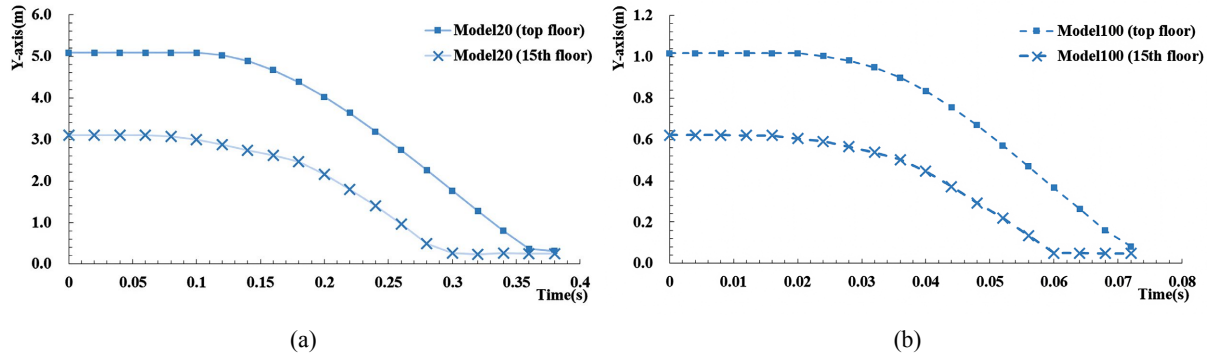


Figure 7. Vertical displacement curves of feature points at the top and 15th floors: (a) 1/20 model; (b) 1/100 model
图 7. 顶层和 15 层特征点垂直方向位移曲线: (a) 1/20 模型; (b) 1/100 模型

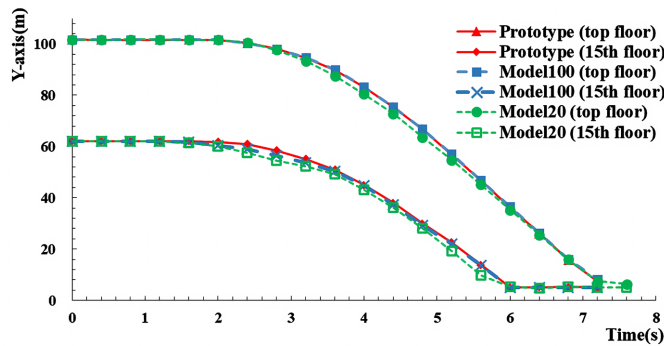


Figure 8. The vertical displacement curves of feature points on the top and 15th floors of the prototype converted to the model
图 8. 原型工况及模型换算到原型的顶层和 15 层特征点垂直方向位移曲线

上述研究表明: 在考虑重力、材料密度、弹性模量等参数影响的条件下, 通过量纲分析可知, 以模型试验手段研究高层建筑物倒塌过程, 若尺寸缩比为 $1/n$, 则相应的重力加速度应当扩大 n 倍, 才能满足一定的相似关系。

数值计算中, 钢筋混凝土材料采用整体式模型, 并以删除立柱、剪力墙等结构的方式模拟爆破手段破坏墩柱的简化过程, 能够得与实际相近的计算结果。

通过对原型和两个不同缩比的模型进行数值计算得到的结果分析, 楼体倒塌属于缓慢过程, 材料动态响应在弹塑性范围和低应变率条件下进行, 速度、位移、应力等参量基本符合离心相似关系, 在原型试验实施困难的情况下, 可通过借助离心机技术通过离心模型试验进行研究。

5. 结论

(1) 本研究验证的是高层建筑物倒塌过程数值模拟在离心相似律下的相似性, 因此, 在常规重力场下进行传统的模型试验, 不能得到相似的结果, 具有一定的应用局限性。

(2) 在拆除爆破工程实践中, 可通过提前模拟倒塌过程, 优化调整切口位置、起爆顺序和延时时间等参数, 预判不同爆破效果, 为复杂城区环境下的高层结构爆破拆除提供多方案的对比分析。

(3) 未来研究中, 可从考虑更加精细爆破载荷的相似性模拟和考虑材料断裂的尺度效应提升倒塌破碎过程的相似性精度等方面深入开展研究, 推动高层建筑物拆除爆破向更精细的方向发展。

参考文献

- [1] 叶振辉. 高耸(高层)建筑物定向爆破拆除倒塌过程研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [2] 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.
- [3] 高主珊, 孙跃光, 张春玉, 等. 20 层剪力墙结构大楼定向与双向折叠爆破拆除[J]. 工程爆破, 2010, 16(4): 51-54.
- [4] 郭进, 公文新. 高层框架楼房单向折叠爆破拆除[J]. 工程爆破, 2016, 22(6): 58-61.
- [5] 谭雪刚, 年鑫哲, 贺五一, 等. 大孔径装药技术在高层建筑物爆破中的应用探讨[J]. 爆破, 2010, 27(3): 51-53.
- [6] 刘昌邦, 贾永胜, 黄小武, 等. 框架结构楼房逐跨向内倾倒爆破拆除[J]. 爆破, 2020, 37(4): 81-88.
- [7] 崔铁军, 李莎莎, 王来贵. 多核心筒中空高层建筑爆破效果模拟与分析[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(5): 1700-1706.
- [8] 崔铁军, 马云东. 超高层建筑受飞机撞击后坍塌过程模拟分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(1): 48-55.
- [9] Murphy, G. (1950) *Similitude in Engineering*. Ronald Press Co.
- [10] Kutter, B.L., O'Leary, L.M. and Thompson, P.Y. (1985) *Centrifugal Modeling of the Effect of Blast Loading on Tunnels. Addendum to Proceedings of Second Symposium on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures*, Florida, 15-18 April 1985.
- [11] 马上, 陈叶青, 王振清, 等. 水下爆炸离心机试验中爆炸荷载的缩比关系研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 20-29.
- [12] 宋歌, 龙源, 钟明寿, 等. 离心机和密闭加压容器中水下爆炸相似关系[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(2): 92-100.
- [13] 刘世聪, 王秋生, 姜浩然. 水下爆炸问题的数值模拟及离心机试验验证[J]. 中国测试, 2019, 45(12): 138-145.
- [14] Anirban, D., Zimmie, T.F., *et al.* (2007) Centrifuge Modeling of Surface Blast Effects on Underground Structures. *Geotechnical Testing Journal*, **30**, 1534-1543.
- [15] Hu, J., Chen, Z., Zhang, X., Wei, Y., Liang, X., Liang, J., *et al.* (2017) Underwater Explosion in Centrifuge Part I: Validation and Calibration of Scaling Laws. *Science China Technological Sciences*, **60**, 1638-1657. <https://doi.org/10.1007/s11431-017-9083-0>
- [16] 胡晶, 陈祖煜, 魏迎奇, 等. 挡水结构水下爆炸作用的离心模型试验[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1073-1081.
- [17] Hu, J., Chen, Z., Zhang, X., Zhang, Z. and Liang, J. (2020) Modeling Bubble Motions by Underwater Explosion in a Centrifuge. *Journal of Fluids Engineering*, **142**, Article 041401. <https://doi.org/10.1115/1.4045435>
- [18] 王思, 胡晶, 张雪东, 等. 不同水深水下爆炸数值及离心试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(6): 78-84.
- [19] 刘文广. 中心城区超高层楼群多切口折叠爆破拆除[J]. 爆破器材, 2021, 50(5): 58-64.