

# 某砌体结构房屋倒塌事故分析与倒塌全过程仿真模拟

周云<sup>1,2</sup> 陈嘉豪<sup>1</sup> 易伟建<sup>1,2</sup> 朱茂<sup>3</sup>

1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082
2. 湖南大学工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南长沙 410082
3. 北京东方至远科技股份有限公司, 北京 100081

**摘要:** 文章以某砌体结构房屋多次结构变动后发生倒塌事故为背景, 从结构静力计算、倒塌全过程仿真模拟以及 PS-InSAR 变形监测 3 个方面, 全面分析某砌体房屋倒塌的受力机理与倒塌成因。首先, 采用 PKPM 软件与人工手算方法验算砌体墙抗力与效应比、高厚比等静力学指标, 初步分析引起房屋倒塌的最不利位置; 采用 SAP2000 软件计算房屋改建、扩建前后 3 种工况下底层墙柱轴力值, 分析房屋改动对结构受力的影响。其次, 基于物理引擎的结构倒塌模拟方法模拟还原结构倒塌全过程, 对比分析倒塌后的残骸分布, 验证倒塌初始破坏位置及倒塌发展过程。最后, 利用 PS-InSAR 变形监测技术还原房屋过去 10 年整体沉降变形趋势。研究结果表明: 违建加层使总荷载比原结构增加 45.54%, 其中二层 7×E 轴柱增轴力增加 71.67%, 是引起事故的直接原因; 模拟结果证实自建房倒塌由二层 7×E 轴相邻外墙挤压变形退出工作后, 柱受压破坏引起的三层及以上向东侧“倾斜”式倒塌, 在与东侧相邻建筑物碰撞后呈现出“下坐”式趋势; PS-InSAR 监测结果证明, 房屋在加层以前相对稳定, 而在加层以后, 开始存在明显下沉趋势, 变形不断发展直到整体倒塌。

**关键词:** 连续倒塌; 静力分析; 物理引擎; 仿真模拟; PS-InSAR; 事故分析

中图分类号: TU362 TU312<sup>+</sup>.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-131X(2025)07-0014-14

DOI: 10.15951/j.tmgcxb.23121034

## Collapse mechanism analysis and simulation of the entire collapse process of a masonry structure house

Zhou Yun<sup>1,2</sup> Chen Jiahao<sup>1</sup> Yi Weijian<sup>1,2</sup> Zhu Mao<sup>3</sup>

1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China
2. Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China
3. Beijing Vastitude Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China

**Abstract:** Aiming at a masonry house that collapsed after multiple structural modifications, a comprehensive analysis of the force mechanics and collapse cause of such structure is undertaken from three perspectives: static structural calculation, simulation of the entire collapse process, and PS-InSAR deformation monitoring. Initially, for identifying the most vulnerable locations for potential house collapse, PKPM software and manual calculation is employed to verify the static indicators of masonry walls, including the resistance-to-effect ratio and height-to-thickness ratio. Furthermore, SAP2000 software is utilized to compute axial forces on ground floor walls and columns under three operational conditions, both before and after alterations and extensions of the house, thereby examining the mechanical impact of structural modifications. Subsequently, a simulation method based on physical

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278306)、湖南省重点研发计划项目(2022SK2096)和湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(201912)

作者简介: 周云, 博士, 教授 收稿日期: 2023-12-13

engine principle is employed to recreate the entire collapsing sequence. This simulation aid can validate the initial failure locations and elucidate the collapse progression through a comparative analysis of post-collapse debris distribution. Lastly, PS-InSAR deformation monitoring technology is applied to reconstruct the decade-long trend of settlements and deformations. The research results indicate that the unauthorized additional construction increased the total load by 45.54% compared to the original structure, resulting in a 71.67% increase in axial forces in the second-floor 7×E axis columns, which directly triggered the accident. The simulation results affirm that the collapse of the house commenced when the second-floor 7×E axis adjacent outer wall experienced extrusion deformation and column compression failure. This led to the “tilted” collapse of the third floor and above towards the east, followed by a “falling” trajectory after impacting the neighboring structure to the east. PS-InSAR monitoring results demonstrate that the building remained relatively stable in terms of deformation before the additional construction. However, noticeable sinking trends emerged post-addition, with continuous deformation development ultimately culminating in complete collapse.

**Keywords:** progressive collapse; static analysis; physics engine; simulation; PS-InSAR; failure analysis

**E-mail:** zhoyun05@hnu.edu.cn

## 引 言

随着改革开放的发展和人民生活水平的提高,我国住房总量累计达到约 6 亿栋,住房总面积超过 500 亿平方米,其中全国 50 多万行政村有超 2 亿户自建房<sup>[1]</sup>。居民自建房,指城乡居民自行组织建设的私有住房(包括附属建筑物、构筑物及其他设施),多以砖砌体结构存在于我国广大城市和农村地区。由于监管力度不足,自建房业主建筑结构知识和安全意识淡薄,大多未经过正规设计、施工,导致自建房存在安全隐患,事故频发,其中以经营性自建房最为严重。2022 年,在全国范围内已排查的 726 万栋经营性自建房中,有 26.1 万栋存在安全隐患<sup>[2]</sup>。近年来,全国范围内房屋倒塌事故屡屡发生,如 2020 年泉州欣佳酒店因加层整体坍塌;2020 年临汾聚仙饭店因多次加高加建导致局部坍塌;2021 年汝城县某居民自建房因地基承载力不足整体倒塌等。这些倒塌事故给人民生命财产造成了严重的损失,给国家住房安全带来严峻挑战。

结构在外部突变作用或者内部渐变累积损伤条件下,容易发生连续性倒塌。结构的连续性倒塌指,在正常使用条件下由于发生突发事件导致结构产生初始局部破坏,破坏沿构件传递引起结构整体性倒塌或造成与初始损伤不成比例的倒塌<sup>[3]</sup>。在现有国

内外规范体系中,抗连续倒塌设计方法主要为关键构件法、概念设计法、拉结强度法和拆除构件法等<sup>[4-6]</sup>。关键构件法从对关键构件加强保护,使其能够承担偶然荷载而不产生破坏层面考虑;概念设计法从对结构整体布置、冗余度、延性等概念层面对结构进行设计;而后两种方法是从设计层面考虑,发生初始破坏后,保证剩余构件能通过备用传力路径释放能量,从而保证破坏控制在局部的范围内。

结构连续性倒塌目前受到了研究者的广泛关注,基于实际结构倒塌事故,国内外已有学者结合实际工程对结构连续倒塌机理进行了大量研究工作。Pearson 等<sup>[7]</sup>开展了由于燃气爆炸引起的伦敦罗南角公寓连续性坍塌分析,研究发现该装配式结构缺乏整体现浇结构的节点连接,仅在齿槽部位注浆连接,缺乏可替代路径,导致该结构墙板被爆炸损坏后引起连锁反应。Li 等<sup>[8]</sup>利用 MSC.MARC 软件开发的火灾纤维梁程序 THUFIBER-T,分析模拟了衡阳衡州大厦因火灾引发倒塌事故的倒塌机理,研究表明初始破坏点为底层火灾核心区的两根钢筋混凝土柱,并推导出了结构底层倒塌演变过程。Reins<sup>[9]</sup>分析了美国拉斐特市一栋三层砌体结构房屋倒塌事故,倒塌的原因是一层砖砌体柱的局部压应力超过了极限承载力。陆新征等<sup>[10]</sup>通过动力有限元程序 LS-DYNA 模拟了纽约世界贸易中心飞机撞击后的倒塌过程,研究发现火灾导致的钢材软化和楼板塌落是结构在飞

机撞击后产生连续性倒塌的主要原因。Lu 等<sup>[11]</sup>分析了尚普兰公寓(Champlain Towers)倒塌原因,并结合有限元和物理引擎的混合模拟方法对倒塌过程进行了仿真模拟。研究表明,大楼中部关键节点的冲切强度和底层柱轴压强度较低等原因造成底层发生局部冲切破坏,进而导致大楼东侧主体结构倒塌。Lu 等<sup>[12]</sup>基于 LS-DYNA 软件模拟了 Murrah 联邦大楼因受到爆炸冲击作用引起的倒塌过程,研究发现大楼倒塌的原因为 3 根底层柱失效后转换梁的抗弯承载力不足引起。Díaz 等<sup>[13]</sup>利用数值模拟分析了某工业建筑混凝土砌块砌体墙风荷载作用下倒塌事故原因,研究表明墙体坍塌的原因是其设计时没有考虑规定最大允许长细比要求。

结构的动力倒塌过程是一种非连续介质的、大变形的高度非线性问题,分为倒塌前变形损伤阶段和倒塌接触碰撞阶段,涉及材料非线性、几何非线性以及结构动力响应等领域。其数值模拟的难点在于非连续位移场的描述、接触碰撞分析以及结构倒塌过程中大位移、大转动的描述<sup>[14]</sup>。传统的有限元方法在模拟小变形问题时其结果较准确可靠,在模拟大规模结构倒塌过程时仍存在困难,如计算成本高、难以处理非连续位移场、无法考虑碎块间的接触碰撞等。快速分析和判断结构破坏演变过程中,对于大型复杂结构,采用传统的有限元方法计算效率明显不足。

随着计算机图像、虚拟现实技术的兴起,基于物理引擎的模拟方法得到广泛应用。物理引擎模拟是当结构单元判定失效后,由物理引擎实时计算倒塌过程中所需的运动数据,来模拟碎片之间的运动与碰撞情况。数值分析给出倒塌前变形损伤阶段在失效时刻的动力学参数,作为物理引擎计算的初始参数,来模拟倒塌接触碰撞阶段过程<sup>[15]</sup>。物理引擎的计算基于动力学原理,具有计算效率高、可模拟实时场景的特点,受到众多学者广泛研究。Zheng 等<sup>[16]</sup>搭建了联合有限元法和物理引擎的混合模拟框架,并成功运用到尚普兰大厦<sup>[11]</sup>倒塌模拟。王希等<sup>[17]</sup>进行了基于离散单元法和物理引擎的结构连续倒塌模拟研究,研究表明所用方法适用于结构大变形模拟,可实现结构从弹性、弹塑性直至倒塌破坏的全过程可视化模拟。Li 等<sup>[18]</sup>在 Zheng 基础上进一步发展了混合模拟框架,研究了从 FE 模型到 PE 模型映射过程中的元素合并技术以及 PE 模型中连接约束的确定。Wang 等<sup>[19]</sup>开发了基于机器学习与物理引擎的建筑倒塌模拟方法并模拟了 Murrah 联邦大楼的倒塌。

目前,城市房屋数字化档案留存尚未普及,面对既有的房屋建筑,如何进行快速高效的大规模风险排查和运维值得人们关注。近年来,永久散射体合成孔径雷达干涉测量(PS-InSAR)技术在变形监测领域得到广泛应用和关注,PS-InSAR 技术利用 SAR 卫星沿重复轨道对同一区域进行两次或多次成像,基于斜距相位干涉处理技术获得建筑物的变形<sup>[20]</sup>,该方法具有范围广、精度高、成本低等优势。众多学者利用 InSAR 技术对城市建筑群进行了变形监测与倒塌风险排查等方面研究。Mohamadi 等<sup>[21]</sup>利用 PS-InSAR 技术监测的竖向变形数据建立了建筑物倒塌预测模型,并运用到埃及亚历山大市建筑群倒塌预测中。莫莉等<sup>[22]</sup>采用 PS-InSAR 技术对深圳前海片区部分地面和建(构)筑物进行了大范围、长时间形变监测,助力于此区域的地质灾害的排查、防治工作。Drougkas 等<sup>[23]</sup>利用 InSAR 数据提出了一种评估不同沉降和隆起条件下建筑结构损伤发展的方法,致力于实现大范围不同结构损伤评估的普适性。Tzima 等<sup>[24]</sup>结合 SAR 数据协同机器学习算法,应用于塞浦路斯城市历史集群监测与保护中。

基于以上的研究背景,本文以某砌体结构房屋倒塌事故为案例,试图通过现有的先进分析手段,从纯技术的角度出发,全面复盘事故的成因,从而研究和总结经验教训,避免此类事故的发生。首先结合事故现场调查结果,对结构进行静力学验算,分析结构潜在的倒塌位置。其次,通过基于物理引擎的倒塌模拟方法,对此次倒塌事故进行全过程虚拟仿真分析,通过对比计算和现场倒塌残骸结果,结合事前发生的征兆验证倒塌机理,推断自建房发生连续性倒塌的初始破坏位置。最后,利用 PS-InSAR 监测技术对房屋在过去 10 年的结构整体变形进行了分析,探索对结构的变形历史演化进行识别和提前预警的有效方法。

## 1 事故概述

某砌体结构房屋始建于 2003 年,初始为地上 3 层结构,2012 年 7 月将原结构推倒拆除后重建 5 层结构(局部 6 层),2018 年 6 月在房屋内开洞加装电梯,同年 7 月进行违建加层,即补齐原局部 6 层,加建至 8 层(局部 9 层),并于顶部加装 1 个储水箱(约 3 吨重)。2019 年 7 月二层东侧 7×D 轴与 7×E 轴混凝土柱内侧产生多条竖向裂缝,采用两根槽钢分别对其进行支顶加固。房屋倒塌前状态示意如图 1 所示。

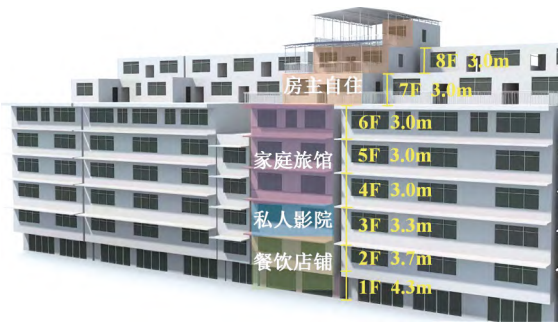


图1 房屋倒塌前状态

Fig. 1 State of the structure before collapse

根据踏勘调查,典型的结构2层与6层结构平面布局以及构件信息如图2所示,原结构楼板除少数现浇外均采用预制空心板,屋面为现浇屋面,后加建结构楼板和屋面均采用现浇。值得注意的是,一、二层1×D-I轴、7×D-I轴中间设置有8根240mm×400mm(柱长边沿墙体方向)钢筋混凝土柱,三至五层改为240mm×240mm的构造柱,加建的六~八层又改为240mm×400mm的钢筋混凝土柱。其中三~九层1×I轴、7×I轴处的2根柱轴线向北偏移600mm,存在柱的布置上下错位情况。

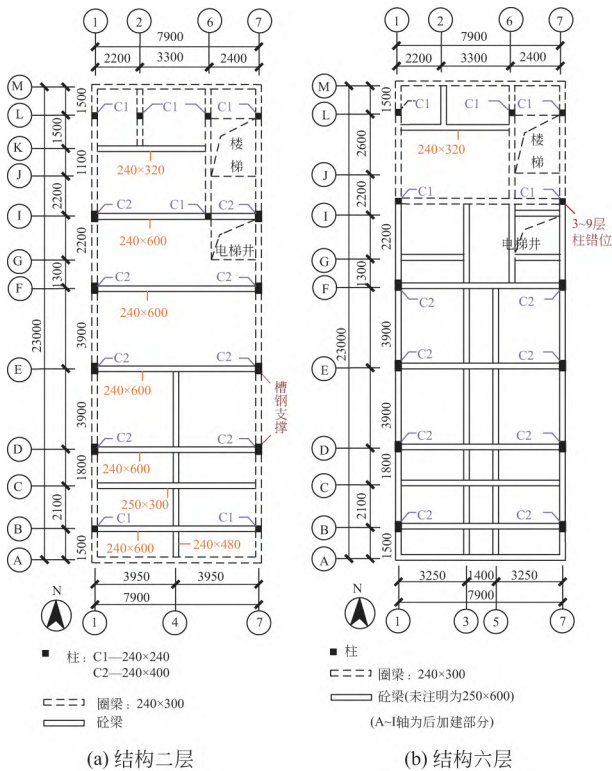


图2 关键楼层结构布局及构件信息(单位: mm)  
Fig. 2 Key floor structural layout and component information (unit: mm)

该自建房未取得规划许可证, 未经过专业设计院设计, 由业主私自采购建筑材料组织施工, 未经过竣工验收, 加建过程中未经过检测单位专业鉴定, 结构体系具有以下特征。

(1) 结构体系“头重脚轻”: 原一~五层结构属于砌体结构, 底部两层采用单跨、大空间的纵墙承重结构布置形式, 而三~五层为三跨纵墙承重结构布置形式, 采用东西横墙隔成多个小房间; 后加建的六~八层属于框架结构, 同样内隔墙多。

(2) 墙体承载力不足: 一层承重墙为240mm厚烧结砖实心砌体墙, 二~五层采用240mm厚无眠空斗墙, 空斗墙墙体承载力较低。

(3) 结构布置混乱: 墙、构造柱和圈梁连接处不符合相关规范要求, 如部分楼层圈梁和墙体被水管竖向穿过、上下构造柱竖向不连续等; 原结构楼面板为预制空心板, 部分隔墙直接砌筑于楼板上。

资料显示<sup>[25]</sup>, 事故发生前该房屋依次出现不同程度的破损征兆, 如表1所示。图4展示了倒塌后现场残骸状态。倒塌过程中, 东西两侧相邻房屋均受到不同程度影响, 西侧房屋二层以上墙面仅被轻微刮擦, 一、二层外墙东南侧受到严重挤压变形, 随时具有倒塌的危险; 东侧房屋三层以上西北角受到严重撞击, 残留有倒塌房屋九层残骸, 一层西北侧外墙被残骸挤压出洞口。两侧相邻房屋受损情况如图5所示。

表1 事故发生前房屋的倒塌预兆<sup>[25]</sup>

Table 1 Signs of building damage before the accident<sup>[25]</sup>

发生时间	破损征兆
4月25日17时许	事故区域出现暴雨天气, 二层东侧外墙体内水管漏水, 一楼正门口处屋顶灯漏水
4月28日20时许	二层7×E轴柱及附近墙面瓷砖脱落、抹灰开裂, 柱根部混凝土被压碎, 钢筋暴露并弯曲(图3)
4月29日10时15分	二层7×E轴柱的支顶槽钢严重变形, 与墙面间隙约50mm(图3)
4月29日12时19分	一层与二层圈梁的东南角外墙面掉灰, 砖头裸露并往外挤, 外墙开始变形
4月29日12时21分	东侧墙壁发出异响, 天花板及东侧外墙物体掉落
4月29日12时24分	房屋整体发生“下坐”式倒塌, 历时4秒

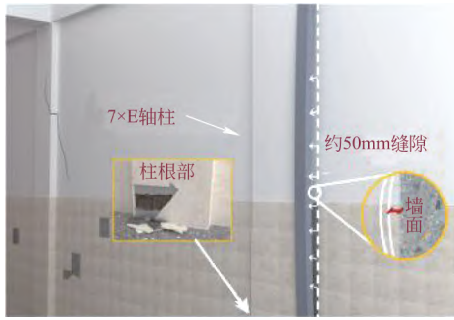


图3 倒塌前二层东侧墙柱破损征兆示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of signs of damage to walls and columns on the east side of the second floor prior to collapse



图4 房屋倒塌后状态  
Fig. 4 State of the structure after collapse

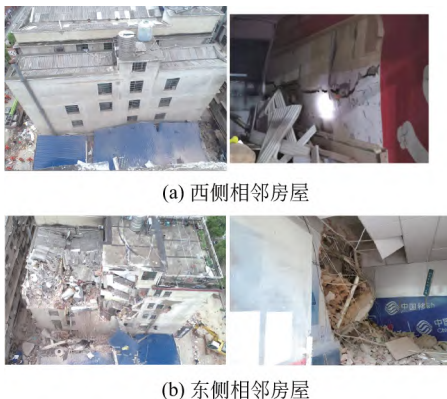


图5 两侧相邻房屋整体及一层墙受损情况  
Fig. 5 Overall and first floor wall damage to adjacent houses on both sides

## 2 事故概述

### 2.1 混凝土和钢筋强度

混凝土构件采用自拌混凝土材料，通过对现场残骸采样 17 个混凝土钻芯样品，采用 TYE-600B 压力试验机进行实验室抗压试验，得到实际的梁、柱混凝土抗压强度。其中二层 7×E 轴柱的 2 个芯样试

件抗压强度值分别为 4.8MPa 和 4.3MPa，二层 7×D 轴柱的 1 个芯样试件抗压强度值为 10.3MPa，远低于建造时《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定的混凝土材料最低强度(C20)的要求。

在倒塌残骸截取不同公称直径的梁、柱内钢筋样品，采用试验机进行力学性能试验，试验结果如表 2 所示。钢筋采用热轧带肋钢筋，通过实验室拉伸试验表明，公称直径为 12mm 和 25mm 的钢筋平均屈服强度和抗拉强度分别为 404MPa 和 522MPa；公称直径为 8mm、16mm 和 20mm 的钢筋平均屈服强度和抗拉强度分别为 542MPa 和 616MPa，分别满足该房屋建造时的《钢筋混凝土用钢 第二部分：热轧带肋钢筋》(GB1499.2—2007)对 HRB335 级和 HRB400 级钢筋的要求。

表 2 钢筋力学试验结果

Table 2 Mechanical test results of reinforcement

公称直径(mm)	伸长率(%)	下屈服强度(MPa)	抗拉强度(MPa)
25	36	365	513
	36	405	514
20	25	487	598
	25	492	554
16	22	565	665
	20	584	675
12	24	401	533
	20	446	527
8	16	536	596
	18	587	608

### 2.2 砌块和砌筑砂浆强度

砌体墙由烧结黏土砖砌筑而成，一层为实心眠墙，二~五层违规采用当时《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)已废除的空斗墙，砌筑砂浆采用自拌砂浆，部分砂浆含泥量高。对倒塌现场的承重墙砖砌块抽取 10 块完整砖试样，采用试验机进行力学性能试验，结果显示砖试块抗压强度在 7.5~10.8MPa，抗压强度推定等级为 MU7.5，低于房屋建造时《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)规定的承重结构烧结普通砖材料最低强度(MU10)的要求。同时抽取 2 批次砌筑砂浆样品，采用筒压法进行力学性能试验，结果显示得到砂浆抗压强度为 1.8MPa 和 0.4MPa，远低于建造时《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)规定的承重结构烧结普通砖使用的普通砂浆材料最低强度(M2.5)的要求。

在进行计算时，取用烧结黏土砖抗压强度取实测强度平均值 8.6MPa，砂浆抗压强度取 0.4MPa，依据《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)规定的砌体眠墙强度 $f_{m1}$ 计算公式为：

$$f_{m_1} = 0.78f_1^{0.5}(1+0.07f_2) \quad (1)$$

式中:  $f_1$ 为烧结砖抗压强度;  $f_2$ 为砂浆抗压强度。

由于当时的砌体规范已经废除了对空斗墙体的设计,依据《砌体结构设计规范》(GBJ 3—88)提供的空斗墙强度 $f_{m_2}$ 计算公式为:

$$f_{m_2} = 0.13f_1(1+0.07f_2) \quad (2)$$

式中:  $f_1$ 为烧结砖抗压强度;  $f_2$ 为砂浆抗压强度。

通过计算,得到砌体眠墙强度为2.35MPa,砌体空斗墙强度为1.15MPa。

### 3 结构静力计算分析

为了分析结构违建加层对构件受力的影响,探究结构的初始破坏位置和受力机理,对房屋开展了静力荷载作用计算,验算自建房加建前后砌体墙抗力与荷载效应比、外墙高厚比和墙柱轴向压力等指标。

表3总结了计算模型中的荷载标准值。由于场景无法复原,部分取值来源于规范取值,部分取值根据经验估算假设。经过现场实际情况综合考虑,每层活荷载按照标准值的0.5倍选取,取 $1.0 \times$ 恒载标准值+ $0.5 \times$ 活荷载标准值的组合值作为施加荷载,不考虑风荷载及地震作用参与组合。分析过程中并未考虑基础不均匀沉降、钢筋腐蚀和混凝土开裂等其他因素影响。

表3 计算模型中荷载取值

Table 3 Load values in the calculation model

荷载类型	荷载种类	抗拉强度(MPa)	
永久荷载	钢筋砼容重(kN/m <sup>3</sup> )	26.0	
	黏土砖空斗砌体容重(kN/m <sup>3</sup> )	18.0	
	混凝土板	预制空心板(kN/m <sup>2</sup> )	1.5
		现浇板(kN/m <sup>2</sup> )	3.0
	电梯荷载	机房自重(kN/m <sup>2</sup> )	1.5
		吊点荷载(kN)	20.0
	可变荷载	钢屋盖(kN/m <sup>2</sup> )	0.3
		屋顶水箱荷载(kN)	30.0
		楼梯间(kN/m <sup>2</sup> )	2.0
		电梯机房(kN/m <sup>2</sup> )	7.0
厨房(kN/m <sup>2</sup> )		4.0	
卫生间(kN/m <sup>2</sup> )		2.5	
餐馆(kN/m <sup>2</sup> )		2.5	
其他楼板(kN/m <sup>2</sup> )	2.0		

#### 3.1 砌体墙抗力与荷载效应比验算

采用PKPM软件建立结构分析模型(图6),进行静力荷载作用计算分析。计算模型中,砌体空斗墙按实心墙体建模,对砌体容重进行折减,抗压强度设计值为

1.15MPa;混凝土强度按C30取值,钢筋取HRB400级。

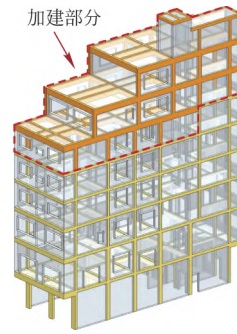


图6 结构静力计算分析模型

Fig. 6 Structural static calculation analysis model

根据《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011),砌体墙抗力与效应值比按式(3)计算:

$$\zeta = \varphi f A / N \quad (3)$$

式中:  $\zeta$ 为砌体墙抗力与效应值比;  $\varphi$ 为砌体墙轴压承载力影响系数;  $f$ 为砌体墙抗压强度;  $A$ 为砌体墙横截面面积;  $N$ 为墙体轴压力。

计算结果表明,底部3层属于结构相对薄弱楼层,三层以上砌体墙承载能力均存在富余,倒塌结构底部三层砌体墙抗力与效应值比如图7所示。可以发现一层砌体墙抗力与效应值比均满足要求;二层存在12面砌体空斗墙抗力与效应值比不能满足规范的设计要求(图中红色数字),存在严重安全隐患;三层总体相对安全,存在2面墙不满足要求。据调查,二层作为餐厅区域,A轴至F轴纵横向仅外围有砌体墙,整体稳定性能差,可以初步推断二层为整栋房屋的薄弱层,结构整体倒塌由二层某一个或多个墙体构件失效引起。

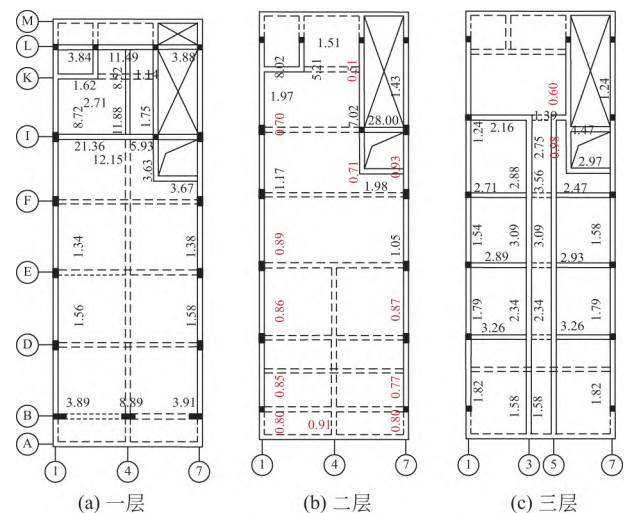


图7 底部三层砌体墙抗力与效应值比

Fig. 7 The ratio of resistance and effect values of the three-story masonry wall at the bottom of the structure

### 3.2 二层外墙高厚比验算

为了进一步分析二层外墙的稳定性，验算了二层 A-F 轴砌体外墙的高厚比指标。由于房屋建造时《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011) 已取消对空斗墙的设计，所以根据《砌体结构设计规范》(GBJ 3—88)，高厚比  $\beta$  按式(4) 验算：

$$\beta = \frac{H_0}{h} \leq \mu_1 \mu_2 [\beta] \quad (4)$$

式中： $H_0$  为墙计算高度； $h$  为墙厚； $\mu_1$  为非承重墙允许高厚比的修正系数，对于承重墙取 1.0； $\mu_2$  为有门窗洞口墙允许高厚比的修正系数，取值按式(5) 计算； $[\beta]$  为允许高厚比，对于砂浆强度为 0.4MPa 时，取 16.00。

$$\mu_2 = 1 - 0.4 \frac{b_s}{s} \quad (5)$$

式中： $b_s$  为在宽度  $s$  范围内的门窗洞口总宽度； $s$  为相邻横墙或壁柱之间的距离。

式中各参数取值、指标计算结果如表 4 所示，结果表明二层 A-F 轴外承重墙高厚比均不满足要求，墙体稳定性差。相比而言，一层砌体外墙为实心墙，且未对墙体开洞，不对允许高厚比取值进行折减；三层外墙计算高度更小，且墙体开洞更小，因此造成了此处二层外墙稳定性成为薄弱环节，在承载能力严重不足的情况下，更容易发生破坏。

表 4 高厚比验算结果

Table 4 Calculation results of height to thickness ratio

	轴号				
	A-B	B-D	D-E	E-F	F-I
$H_0$ (m)	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10
$h$ (m)	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
$\beta$	21.25	21.25	21.25	21.25	21.25
$\mu_1$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$b_s$ (m)	—	2.10	2.10	2.10	2.10
$s$ (m)	—	3.90	3.90	3.90	3.50
$\mu_2$	1.00	0.78	0.78	0.78	0.76
$[\beta]$	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00
$\mu_1 \mu_2 [\beta]$	16.00	12.48	12.48	12.48	12.16
规范要求	不满足	不满足	不满足	不满足	不满足

### 3.3 结构重力荷载传力机理分析

为了进一步分析结构的传力机理，验证计算模型的正确性，对二层 7×E 轴纵向窗间墙和钢筋混凝土柱承载力进行手算分析。计算时，考虑实际结构的特点，截取受荷面积为  $3.95 \times 3.90 = 15.41\text{m}^2$  的区域作为计算单元，第二~五层按砌体结构计算，第六

~八层按照框架结构进行计算，考虑计算单元内  $240\text{mm} \times 400\text{mm}$  钢筋混凝土柱的轴向承载力。计算单元选取如图 8，荷载传递路径如图 9 所示。

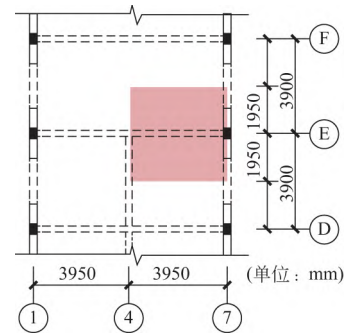


图 8 计算单元

Fig. 8 Calculation unit

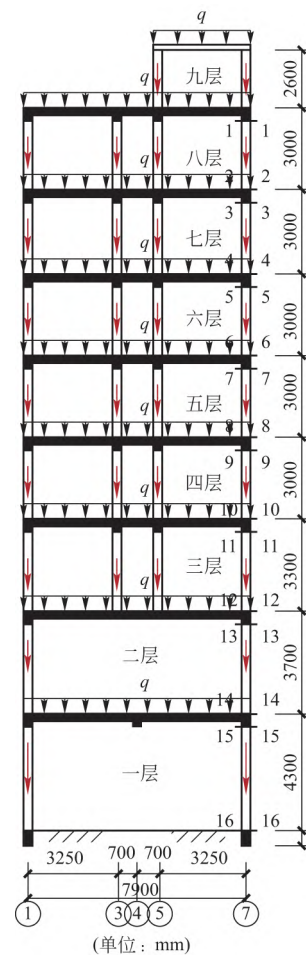


图 9 荷载传递路径示意图

Fig. 9 Schematic diagram of load transfer path

考虑到倒塌前房屋的侧向水平位移不可忽略，按弹性方案进行计算。为了方便计算，对结构作必要的简化处理，计算假定如下：

- (1) 计算构件自重时忽略重叠部分，按轴线长度计算。

(2) 承重墙看作竖向连续梁，屋盖、楼盖及基础顶面作为连续梁的支承点，假定连续梁在屋盖、楼盖处为铰接，墙体在每层高度范围内，均简化为两端铰接的竖向构件进行计算。

(3) 计算梁端有效支承长度时，假设梁端有刚性垫块；本计算结果中偏心距过小，必要时忽略其影响。

荷载取值与 PKPM 计算取值相同，各层控制截面的轴力计算结果如表 5 所示。

表 5 各层控制截面轴力计算值  
Table 5 Calculated axial forces in control sections at each level

楼层	控制截面	轴力(kN)	楼层	控制截面	轴力(kN)
8F	1-1	101.40	4F	9-9	765.88
	2-2	151.85		10-10	850.14
7F	3-3	262.06	3F	11-11	942.29
	4-4	338.58		12-12	1032.41
6F	5-5	425.59	2F	13-13	1097.66
	6-6	496.71		14-14	1143.41
5F	7-7	589.72			
	8-8	677.37			

二层控制截面轴力由窗间墙和钢筋混凝土柱共同承担，其轴压承载力  $N_u$  计算公式为：

$$N_u = \varphi_1 f_{m2} A_1 + \varphi_2 (f_c A_2 + f_s' A_s') \quad (6)$$

式中： $\varphi_1$ 为砌体墙轴压承载力影响系数； $\varphi_2$ 为钢筋混凝土构件稳定系数； $f_{m2}$ 、 $f_c$ 、 $f_s'$ 分别为砌体空斗墙、混凝土和钢筋抗压强度； $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_s'$ 分别为砌体墙、钢筋混凝土柱和钢筋横截面面积。

依照《砌体结构设计规范》(GBJ 3—88)， $\varphi_1$ 取值为 0.33；根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)， $\varphi_2$ 取值为 0.77。二层 7×E 轴柱混凝土强度为 4.3MPa，配置有 8 根公称直径为 16mm 的纵筋。计算得到二层 7×E 轴计算单元的轴压承载力为 895.24kN，13-13 截面抗力与效应值比为 0.82，14-14 截面抗力与效应值比为 0.78。

从荷载传递路径角度分析，三~八层计算单元内的荷载由 5 轴内纵墙与其 7 轴窗间墙共同承受，第二层结构形式变化，计算单元内的荷载由 7 轴窗间墙与钢筋混凝土柱独自承担，且上部荷载全部传到二层 7 轴处，导致二层构件的荷载骤然增大。

### 3.4 违建前后墙柱轴压力对比分析

为了量化分析违建加层行为的影响，进一步分

离墙和柱的各构件的受力情况，采用 SAP2000 软件进一步计算倒塌自建房加层前后墙、柱内力分布和各构件的受力状态。在建模过程中，梁、柱采用杆系梁单元，墙体和楼板采用壳单元，钢筋、混凝土和砌体材料强度按照与 PKPM 相同材料取值，荷载取值与前述 PKPM 取值相同。计算模型分为 3 种工况如图 10 所示。

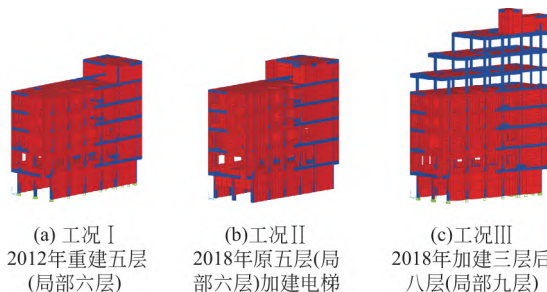


图 10 各工况下 SAP2000 计算模型  
Fig. 10 SAP2000 calculation model under various working conditions of the structure

不同工况下底部两层 1×B-F 轴和 7×B-F 轴柱、墙轴压力变化值分别如图 11、图 12 所示。对比分析 3 种工况发现，相比工况 I，工况 II 中的一、二层柱墙轴向压力略有增加，增幅在 4% 以内，墙轴向压力增加在 9% 以内，表明加建电梯并对结构受力影响有限。相较于工况 I，工况 III 中的一、二层柱墙轴向压力增加显著，柱轴向压力增加 34.33%~71.67%，砌体墙轴向压力增加 61.26%~69.44%，表明加层行为严重加剧了下部楼层构件的荷载。

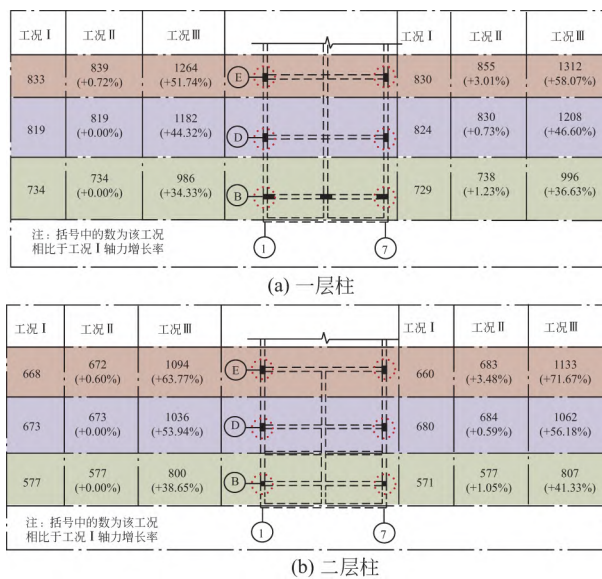


图 11 结构各工况下柱轴压力变化值(单位: kN)  
Fig. 11 Changes in column axial pressure under different working conditions of the structure (unit: kN)

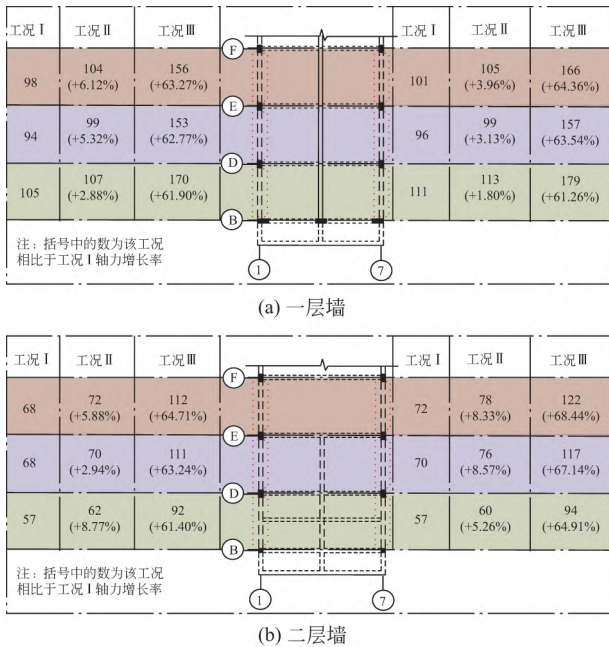


图 12 结构各工况下墙轴压力变化值(单位: kN)

Fig. 12 Changes in wall axial pressure under different working conditions of the structure (unit: kN)

相比工况 I，工况 III 第二层柱、墙轴向压力相比于第一层增加更明显，二层柱平均增加 54.26%，比一层多增加 8.98%；二层墙平均增加 65.14%，比一层多增加 2.29%。此现象与结构布局有关，二层结构布置相比于一层内墙布置更少，且二层采用空斗墙布置，同时存在更多墙体门窗开洞，缺乏构件来分担增加的荷载，二层相比于一层更易受到破坏。

相比工况 I，工况 III 从南北向布局上，E 轴线上柱墙轴压力增长率最大；从东西向布局上，7 轴线上柱墙轴压力增长率大于 1 轴。这与加建楼层的结构布局有关，加建的 7、8 层分别从 D、E 轴开始，加建的 9 层与电梯间靠近东侧，荷载分布偏向于东北侧。其中，二层 7×E 轴柱的轴向压力最大(工况 III 轴压力达到 1312kN，较工况 I 增加 71.67%)。

计算结果验证了加层后二层 7×E 轴混凝土柱内侧产生多条竖向裂缝，采用两根槽钢分别对其进行支顶加固；倒塌前，7×E 轴柱根部混凝土被压碎，钢筋暴露并弯曲，一根支顶槽钢严重变形，与墙面间隙约 50mm 等现象。初步推断自建房倒塌由 7×E 轴柱受压破坏引起。结构加层后，荷载骤增，加之二层柱混凝土强度过低，构件已经属于承载能力极限状态，槽钢支撑作为临时措施，不能解决柱和墙承载力不足的状况，仅延缓了结构的破坏进程。空斗墙内漏水导致砌筑黄泥砂浆软化，致使墙体强度降低发生受压变形，内力发生重分布，加固用槽钢分

担的竖向荷载逐渐增大，从而槽钢变形而退出工作，进而轴 7×E 柱被压溃，引起整体倒塌。

结构加层后，二层 7×E 轴柱荷载超出其承载力的 18%，超载状态较为严重，其变形与损伤不断缓慢发展但不足以导致混凝土迅速破坏，使得结构在 2018 年至 2022 年近 4 年内未发生倒塌。2022 年 4 月 25 日墙体强度降低后，二层 7×E 轴柱荷载进一步增大，变形急剧增加，不再收敛，加速了柱混凝土的破坏，最终导致倒塌。

对比分析了 PKPM、SAP2000 和手算方法 3 种工况下结构的总荷载，计算结果列于表 6，可以发现 3 种计算结果基本接近。加层行为使总荷载比原结构增加 45.54%，加剧了“头重脚轻”的状态，下部楼层构件荷载显著增大，是造成结构倒塌的直接原因。

表 6 各工况下结构总荷载

Table 6 The total load of the structure under various

	working conditions (unit: kN)		
	工况 I	工况 II	工况 III
PKPM	13004	13016	18926
SAP200	12453	12594	18503
手算	—	—	17990

#### 4 基于物理引擎模拟方法的结构倒塌序列分析

为了探究结构倒塌机理，直观还原结构倒塌全过程，基于文献[16-17]的研究成果，将物理引擎模拟方法运用到此倒塌房屋，使用 Blender 三维可视化渲染平台和 Oliver 和 Kostack 开发的 Bullet Constraints Builder(BCB) 程序及提出的预处理工具与约束建立方法<sup>[26]</sup>，实现倒塌过程可视化模拟，从而直观还原倒塌过程推演结构的倒塌的初始破坏位置的准确性。具体通过以下程序来实现：

步骤①：构建建筑物几何模型。在 Blender 软件中搭建建筑物刚体模型(图 13)，构件单元为刚体，不考虑单元内应力和应变，通过不同刚体之间的弹簧约束来考虑构件变形。

步骤②：输入构件信息。包括混凝土抗压强度、钢筋屈服强度、构件截面尺寸、梁柱板配筋信息、构件容重与楼板活荷载等。

步骤③：计算构件强度。由 BCB 程序计算各类钢筋混凝土构件的抗压、抗拉、抗剪及抗弯强度，对于砌体墙构件，直接输入墙体强度值。

步骤④：划分网格与建立约束。将构件单元离

散为微小刚体网格，网格间通过建立约束来模拟受力和变形性能，并形成一整体，以此形成 Bullet 倒塌模型(图 14)。

步骤⑤：引入初始失效部位，倒塌过程可视化渲染。

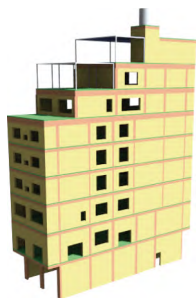
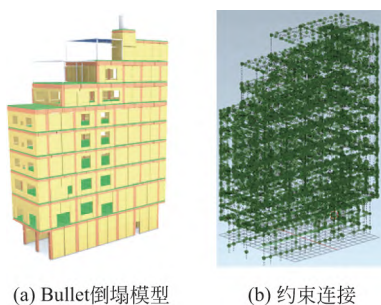


图 13 几何模型  
Fig. 13 Geometric model

建模过程中，采用广义约束来模拟结构在弹性阶段受力和变形性能，连接类型为 16；当转入塑性阶段后，达到广义约束的断裂阈值并发生破坏，广义约束将被解除，继而采用弹簧约束模拟结构塑性变形阶段，采用的连接类型为 22。当弹簧约束发生的变形或所受的力大于其允许最大变形值和极限承载力时，达到弹簧约束的断裂阈值，弹簧发生断裂，则进入倒塌碰撞阶段。



(a) Bullet倒塌模型 (b) 约束连接  
图 14 Bullet 倒塌模型与约束连接

Fig. 14 Bullet collapse model and constraint connection

模型的基本信息如下：钢筋、混凝土和砌体材料强度按照与 PKPM 相同材料取值，钢筋伸长率取 20%，混凝土保护层厚度取 25mm。构件连接类型选用第 22 类连接类型。板厚取 120mm，楼面活荷载统一按  $2.5\text{kN/m}^2$  取值进行简化。由于缺乏相邻结构的设计资料，相邻受影响房屋采用刚性实体简化处理。

结合静力计算结果与倒塌前的征兆，倒塌最大可能由 7×E 轴墙柱初始破坏后引起，通过将构件强度取为 0 的方式引入 7×E 轴墙柱初始失效后，结构倒塌过程仿真模拟如图 15 所示。 $t = 0.68\text{s}$

时，二层 7×E 轴柱相邻的两面外墙发生挤压变形； $t = 1.45\text{s}$  时，外墙退出工作后，7×E 轴柱压力增大发生受压破坏； $t = 1.92\text{s}$  时，东侧其余受力构件相继发生受压破坏； $t = 2.42\text{s}$  时，二层向西侧发生压屈，三层及以上向东侧倾斜，产生倒塌趋势； $t = 3.74\text{s}$  时，倒塌继续发展，当局部九层坠落至六层高度时与东侧相邻建筑发生碰撞； $t = 5.92\text{s}$  时，结构倒塌结束。

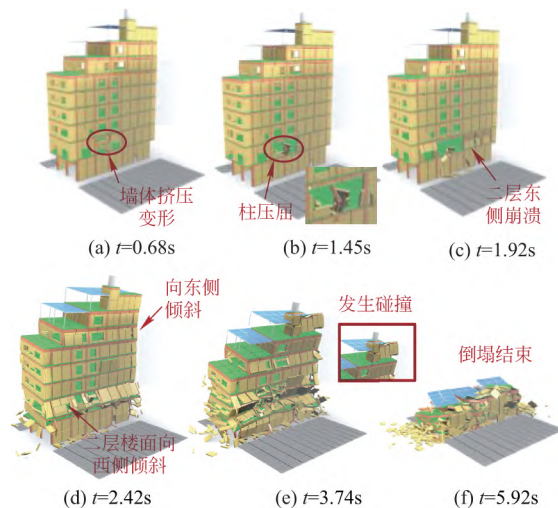


图 15 仿真模拟结构倒塌全过程  
Fig. 15 Simulate the entire process of structural collapse

模拟残骸分布和实际坍塌残骸在图 16 中进行了对比，结果吻合良好。由于相邻建筑物采用刚性实体简化处理，故被撞建筑四至六层并未发生撞击破坏，倒塌结构九层残骸也因此并未落入撞击部位。从撞击部位与其余残骸分布来看，结构的倒塌过程符合实际情况。从残骸整体堆积高度角度分析，二者残骸堆积高度均在 7.5m 左右。

从模拟过程与现场残骸情况来看，自建房整体倒塌模式属于由二层 7×E 轴墙柱破坏后引起的三层及以上结构向东侧“倾斜”式倒塌，但是受到东侧相邻建筑物的阻挡，在与其碰撞后呈现出“下坐”式趋势。从两侧相邻房屋破坏情况来看，由于二层楼面向西侧移导致西侧房屋一至二层外墙受到挤压变形；而东侧房屋三层以上西北区域受到上部结构的撞击，碰撞消耗了碎片下落产生的能量，同时由于二层的向西偏移导致东侧房屋底部两层未受到大范围破坏。

结构二层存在 12 面砌体墙抗力与效应值比不满足要求，为了排除其他位置初始破坏的可能性，对比分析了典型的 3 处不同位置墙柱破坏后，结构的倒塌模式与残骸分布，如图 18 所示。

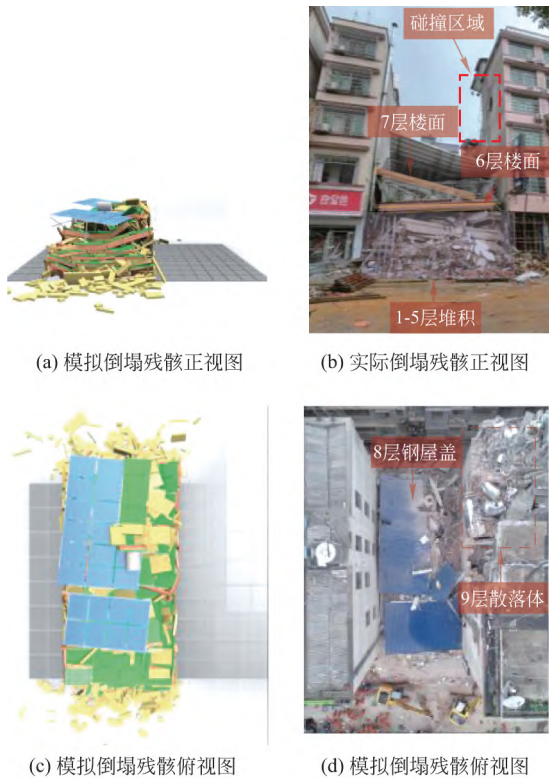


图 16 倒塌残骸模拟与实际对比  
Fig. 16 Comparison between simulation and actual collapse debris

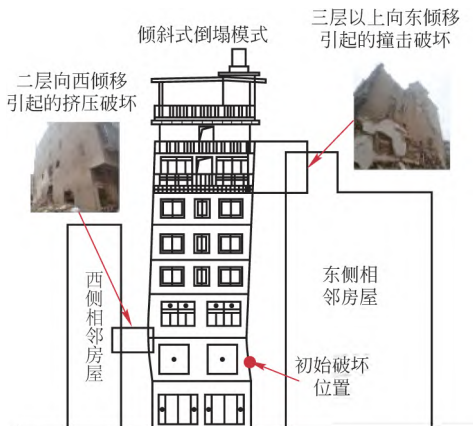


图 17 “倾斜”式倒塌对两侧相邻房屋的影响  
Fig. 17 Impact of “tilting” collapse on neighboring houses on both sides

- (1) 当引入  $7 \times D$  轴墙失效时，结构呈“下坐”式倒塌模式，结构向东侧倾斜趋势不明显，九层直坠至三层高度时才与东侧建筑相碰；
- (2) 当引入  $1-7 \times A$  轴墙失效时，结构明显有前倾趋势，并未与相邻建筑碰撞，整体呈“前倾”式倒塌模式；
- (3) 当引入西侧  $1 \times E$  轴墙柱失效时，二、三层

存在向西侧扭转趋势，三层楼面及以上整体向西侧偏移；其余情况都与实际有明显出入，基本排除其可能性。

经过对不同位置构件初始破坏后的倒塌模式与残骸对比分析，进一步证实自建房倒塌由二层  $7 \times E$  轴相邻外墙退出工作后，柱受压破坏引起。

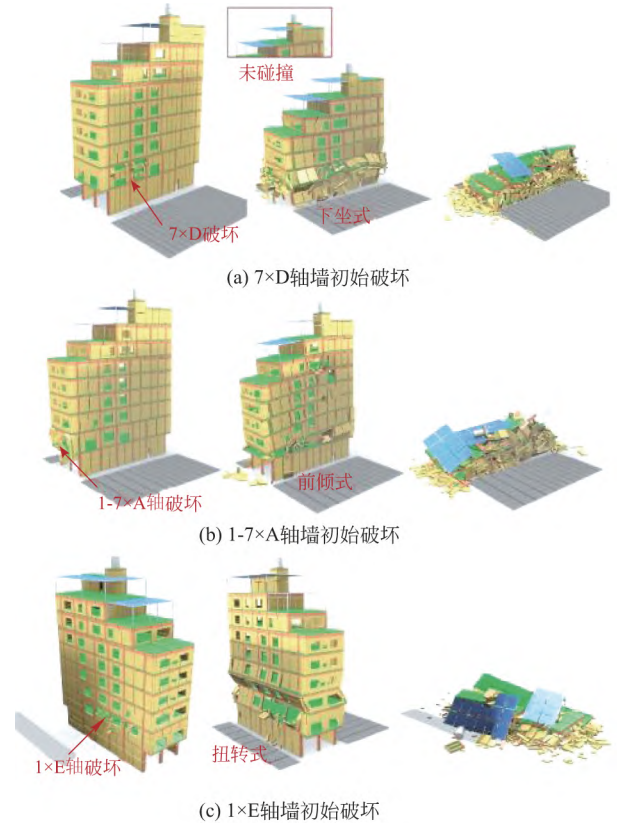


图 18 不同部位构件失效后倒塌效果  
Fig. 18 Collapse effect of components in different parts after failure

## 5 房屋结构变形监测与预警

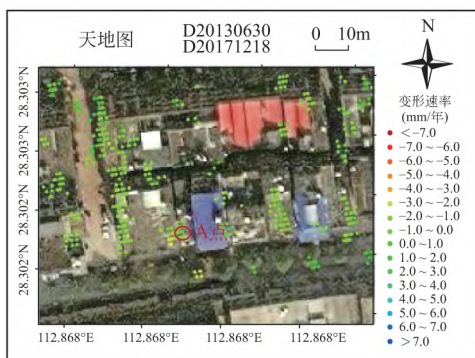
结构健康监测(SHM)是城市房屋安全风险排查、保障房屋安全运维的有效手段，然而结构健康监测存在的瓶颈是结构建造时基线(Baseline)数据的获取，如何判断结构的变形并对其变形风向进行研判成为了难题。通过广泛调研，此结构无任何留存的基线测量数据。为了探索加层违建行为对结构健康状况的影响，本研究利用 PS-InSAR 变形监测技术，通过调取 SAR 卫星影像并结合现场高程测量，分析倒塌自建房加层前后 2 个时间段的整体变形趋势。

采用的 SAR 卫星为 COSMO-SkyMed，最高分辨率为 3m。以 2018 年加建施工为节点，提取倒塌自建

房目标点加盖前时间段 I: 2013 年 06 月 30 日~2017 年 12 月 18 日内的 53 期数据, 和加盖后时间段 II: 2019 年 01 月 14 日~2022 年 01 月 29 日内的 39 期数据, 如图 19 所示。考虑到两个时间段目标区域存在变化, 测量点的位置也会有相应变化, 在图 19(b)、图 19(d) 中分别表现为 A、B 目标点。



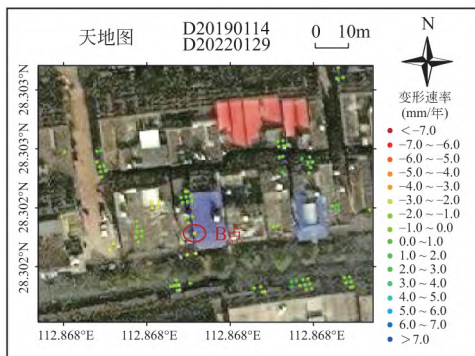
(a) 时间段 I 内目标点 A 变形时间序列



(b) 时间段 I 内目标区域变形速率



(c) 时间段 II 内目标点 B 变形时间序列



(d) 时间段 II 内目标区域变形速率

图 19 不同时段自建房变形变化 PS-InSAR 监测结果  
Fig. 19 PS-InSAR monitoring results of deformation changes in self built houses at different time periods

对比两个时间段内建筑物的 SAR 影像可以发现, 目标点 A 在第 I 时间段内变形在  $\pm 6\text{mm}$  以内, 不存在明显的沉降趋势, 建筑物在时间段 I 内总体相对稳定, 由于受到大气温度、地下水活动等因素, 建筑物的变形在正常范围内上下波动; 而目标点 B 在第 II 时间段内出现一定的沉降趋势, 沉降速率约为  $4.78\text{mm}/\text{年}$ , 变形发展最大时达到  $16.65\text{mm}$ , 表明建筑物在加层后变形开始不断发展, 直到构件失效引起整体倒塌。

事故发生后, 基于 PS-InSAR 变形监测技术对事故房屋周边方圆  $5\text{km}$  区域内建筑物在时间段 II (2019 年 01 月 14 日~2022 年 01 月 29 日) 内的沉降变形速率进行了监测, 初步排查出部分存在沉降问题的建筑物如图 20 所示。

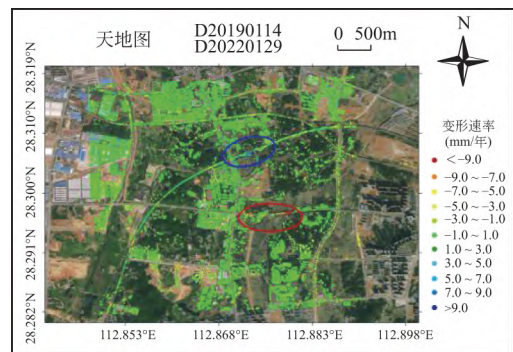


图 20 周边区域建筑物变形速率

Fig. 20 Deformation rate of buildings in the surrounding area

图中偏红色点为建筑物存在沉降现象, 偏蓝色点为建筑物存在隆起现象, 绿色点为建筑物相对稳定。监测结果显示, 区域内存在某些位置存在沉降与隆起现象, 主要沿城市道路分布, 初步分析现象可能与建设施工等因素相关。监测结果能够快速排查出存在问题的房屋, 为有关部门作进一步自建房检测鉴定提供帮助。

为了尽可能杜绝此类事故发生, 近年来国家越来越重视自建房安全隐患问题, 全国各地加强了对自建房专项整治工作。面对如此庞大体量的自建房, 传统的房屋检测需要耗费大量的人力物力, 难以维持长期监测。目前 PS-InSAR 技术在建筑风险排查领域的应用越来越成熟, 依托 PS-InSAR 技术建立城市建筑风险预警系统, 实时关注建筑“健康状况”, 追踪发现建筑安全隐患, 实现无基线数据下的结构安全监测, 进行“天-空-地”一体化安全监测与排查, 避免发生倒塌事故可以成为以后的研究方向。

## 6 结 论

本文针对某砌体房屋整体倒塌事故背景,对该事故倒塌成因和倒塌机理进行了全面地分析和研究,从中汲取经验教训,防止此类事故发生。依据现场勘察复原的图纸与荷载资料,利用PKPM与SAP2000计算软件及人工手算相互验证,分析了自建房全寿命过程中3种工况下静力学性能;基于物理引擎模拟方法直观还原了自建房倒塌过程;最后利用PS-InSAR变形监测技术分析了自建房全寿命过程中的变形趋势。主要结论总结如下:

(1) 构件抗力与荷载效应比结果及荷载传导机理表明,二层存在12面砌体墙不满足要求,是结构的薄弱层。对比3种工况下墙柱轴压力变化可以发现,加建电梯对结构影响不明显;而加盖三层行为使底层墙柱轴压力显著增加,其中二层7×E轴柱最高增加71.67%,总荷载比原结构增加45.54%,是造成事故的直接原因。

(2) 基于物理引擎的模拟方法快速还原了结构倒塌全过程,残骸分布对比分析结果表明,结构整体连续倒塌由二层东侧7×E轴墙柱破坏后引起的三层及以上结构向东侧“倾斜”式倒塌,在坠落至6层高度时与东侧相邻房屋发生碰撞,后发展为“下坐”式整体垮塌。

(3) PS-InSAR技术能够实现无基线数据情况下的结构变形监测。对比两个时间段内建筑物的SAR影像可以发现,建筑物在加建前相对稳定,在加建后出现明显沉降趋势,表明建筑物在加层后变形开始不断发展,直到构件失效引起整体倒塌。表明了利用该技术能够实现大规模的城市建筑安全风险预警。

致谢:

感谢湖南大学施楚贤教授的指导。

感谢南京奥达升智能科技有限公司潘宇翔博士对BIM模型的支持。

### 参 考 文 献

- [1] 人民日报. 排隐患 建规范 强监管(关注农村自建房)[EB/OL]. [2022-01-24]. <http://cpc.people.com.cn/n1/2022/0124/c64387-32337930.html>
- [2] 人民日报. 全国已排查经营性自建房726万栋[EB/OL]. [2022-07-10]. <http://society.people.com.cn/n1/2022/0710/c1008-32470860.html>
- [3] ASCE/SEI 7-10 Minimum design loads for buildings and other structures [S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2011
- [4] Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization project [S]. Washington, D. C.: GSA, 2005

- [5] UFC 4-023-03 Design of buildings to resist progressive collapse [S]. Washington, D. C.: Department of Defense, 2009
- [6] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011 (GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011 (in Chinese))
- [7] Pearson C, Delatte N. Ronan point apartment tower collapse and its effect on building codes [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005, 19(2): 172-177
- [8] Li Y, Lu X Z, Guan H, et al. A case study on a fire-induced collapse accident of a reinforced concrete frame-supported masonry structure [J]. Fire Technology, 2016, 52(3): 707-729
- [9] Reins J D. Partial collapse of john purdue block, a historic brick masonry structure [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(1): 04014190
- [10] 陆新征, 江见鲸. 世界贸易中心飞机撞击后倒塌过程的仿真分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 8-10 (Lu Xinzhen, Jiang Jianjing. Dynamic finite element simulation for the collapse of world trade center [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 8-10 (in Chinese))
- [11] Lu X Z, Guan H, Sun H L, et al. A preliminary analysis and discussion of the condominium building collapse in surfside, Florida, US, June 24, 2021 [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2021, 15(5): 1097-1110
- [12] Lu J X, Wu H, Fang Q. Progressive collapse of murray federal building: revisited [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 57: 104939
- [13] Díaz J J, Adam J M, Martínez-Luengas A L, et al. Collapse of a masonry wall in an industrial building: diagnosis by numerical modeling [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27(1): 65-76
- [14] 姜健, 吕大刚, 陆新征, 等. 建筑结构抗连续性倒塌研究进展与发展趋势[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 1-28 (Jiang Jian, Lü Dagang, Lu Xinzhen, et al. Research progress and development trends on progressive collapse resistance of building structures [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(1): 1-28 (in Chinese))
- [15] 许镇, 陆新征, 任爱珠. 基于数值分析与物理引擎的建筑垮塌全过程视景模拟[C]//计算机技术在工程设计中的应用——第十六届全国工程设计计算机应用学术会议论文集. 广州: 中国土木工程学会计算机应用分会, 2012
- [16] Zheng Z, Tian Y, Yang Z B, et al. Hybrid framework for simulating building collapse and ruin scenarios using finite element method and physics engine [J]. Applied Sciences, 2020, 10(12): 4408
- [17] 王希, 王宪杰, 董艳秋, 等. 基于离散单元法和物理引擎的结构连续倒塌可视化模拟[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 267-275 (Wang Xi, Wang Xianjie, Dong Yanqiu, et al. Visual simulation for structure continuous collapse based on discrete element method and physical engine [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(13): 267-275 (in Chinese))
- [18] Li R R, Yu J, Zhou X D, et al. Analysis of progressive

collapse process of RC structures based on hybrid framework of FEM-physics engine [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 147: 107138

- [19] Wang S N, Cheng X W, Li Y, et al. Rapid visual simulation of the progressive collapse of regular reinforced concrete frame structures based on machine learning and physics engine [J]. *Engineering Structures*, 2023, 286: 116129
- [20] 周云,郝官旺,危俊杰,等. 基于 PS-InSAR 技术的大跨度桥梁结构变形监测综述 [J/OL]. *工程力学*, 2023. DOI: 10. 6052/j. issn. 1000-4750. 2022. 12. 1069 (Zhou Yun, Hao Guanwang, Wei Junjie, et al. Review of PS-InSAR-based long-span bridges structural deformation monitoring [J/OL]. *Engineering Mechanics*, 2023. DOI: 10. 6052/j. issn. 1000-4750. 2022. 12. 1069 (in Chinese))
- [21] Mohamadi B, Balz T, Younes A. Towards a PS-InSAR based prediction model for building collapse: spatiotemporal patterns of vertical surface motion in collapsed building areas—case study of Alexandria, Egypt [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12( 20): 3307
- [22] 莫莉,王贤能. 基于 PS-InSAR 技术的后海深槽地面及

建筑物形变监测分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34( 1): 68-74 ( Mo Li, Wang Xianneng. Monitoring and analysis of ground and building settlement of deep trough in Houhai based on PS-InSAR technology [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34( 1): 68-74 ( in Chinese))

- [23] Drougkas A, Verstryngge E, Van Balen K, et al. Country-scale InSAR monitoring for settlement and uplift damage calculation in architectural heritage structures [J]. *Structural Health Monitoring*, 2021, 20( 5): 2317-2336
- [24] Tzima M S, Agapiou A, Lysandrou V, et al. An application of machine learning algorithms by synergetic use of SAR and optical data for monitoring historic clusters in Cypriot Cities [J]. *Energies*, 2023, 16( 8): 3461
- [25] 中华人民共和国应急管理部. 湖南长沙“4·29”特别重大居民自建房倒塌事故调查报告 [R/OL]. [2023-05-21]. [https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsqdcbg/2023dcbg\\_5532/202305/W020240229381934853466.pdf](https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsqdcbg/2023dcbg_5532/202305/W020240229381934853466.pdf)
- [26] Kostack K, Walter O. Bullet constraints builder tutorial: 2/3 guide to simulate a multi-family house with standard blender [R]. Uusimaa: Laurea University of Applied Sciences, 2018

周云(1979—)男,博士,教授。主要从事结构健康监测和结构测试新技术的研究。

陈嘉豪(1998—)男,硕士研究生。主要研究结构连续倒塌分析与仿真模拟的研究。

易伟建(1954—)男,博士,教授。主要从事混凝土结构设计及基本理论的研究。

朱茂(1988—)男,博士,副研究员。主要从事 InSAR 和 SAR 算法相关的研究。

#### (上接第 13 页)

- [38] Bowness D, Lee M M K. Stress intensity factor solutions for semi-elliptical weld-toe cracks in T-butt geometries [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1996, 19( 6): 787-797
- [39] Ma Y, Cui C, Zhang Q H, et al. Fatigue life prediction for Q420qFNH weathering steel welded joints considering the effect of multiple cracks [J]. *International Journal of Fatigue*, 2025, 190: 108665
- [40] Kumar R, Singh K. Influence of stress ratio on fatigue crack growth in mild steel [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1995, 50( 3): 377-384
- [41] Walker K. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum [M]// *Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life*. West Conshohocken: ASTM International, 1970
- [42] Cui C, Zhang Q H, Bao Y, et al. Residual stress relaxation at innovative both-side welded rib-to-deck joints

under cyclic loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 156: 9-17

- [43] ISO 14993: 2018 Corrosion of metals and alloys - Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, dry and wet condition [S]. Geneva: International Standardization Organization, 2018
- [44] 李安邦. CFRP 板加固锈蚀钢板疲劳性能及其设计方法研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019 ( Li Anbang. Fatigue behavior and design method of corroded steel plate strengthened with CFRP plates [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019 ( in Chinese))
- [45] 杨颖,张哲,侯华兴,等. 不同屈强比 Q500qE 桥梁钢的疲劳裂纹扩展速率 [J]. *金属热处理*, 2018, 43( 7): 229-232 ( Yang Ying, Zhang Zhe, Hou Huaxing, et al. Fatigue crack growth rate of different yield ratio bridge steel Q500qE [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2018, 43( 7): 229-232 ( in Chinese))

张清华(1975—)男,博士,教授。主要从事钢结构桥梁服役性态与结构安全的研究。

唐琨(1998—)男,博士研究生。主要从事钢结构桥梁疲劳性能数值模拟方法的研究。

崔闯(1989—)男,博士,副教授。主要从事钢结构桥梁疲劳失效机制与安全的研究。

马燕(1993—)女,博士。主要从事钢结构桥梁疲劳性能评估方法的研究。

袁晓鹏(2001—)男,硕士研究生。主要从事钢结构桥梁疲劳性能评估方法的研究。

李亚鹏(2001—)男,硕士研究生。主要从事钢结构桥梁疲劳性能评估方法的研究。