

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.02.015

## 单根立柱失效条件下框架结构楼房 动力响应特征研究\*

侯永恒<sup>1a,1b</sup>, 姚颖康<sup>1a,1b</sup>, 余珊珊<sup>1a,1b</sup>, 黄小武<sup>2</sup>

(1. 江汉大学 a. 省部共建精细爆破国家重点实验室; b. 爆破工程湖北省重点实验室, 武汉 430056;  
2. 武汉爆破有限公司, 武汉 430056)

**摘要:** 高层框架结构楼房不同部位单根立柱失效条件下楼房的变形能力、加速度响应和荷载传递等动力响应特征是本研究的重点。首先,依据《混凝土结构设计规范》(GB50010),采用PKPM设计软件建立了一个4×6跨的8层钢筋混凝土框架结构模型;其次,基于构件拆除法,应用有限元软件SAP2000非线性动力分析方法计算了一楼中心柱、长边中柱、短边中柱、角柱等不同部位单根立柱失效条件下框架结构的动力响应特征。研究表明:四种立柱失效条件下,其塑性转角均小于6°,结构不会发生倒塌,中心立柱失效时结构稳定性最差,发生连续倒塌的概率相对最大,短边中柱和长边中柱次之,角柱概率最小;中心柱失效条件下楼房荷载对剩余结构的动力冲击作用影响最为显著,其负向最大值加速度大约是短边中柱和长边中柱的2倍,可达3g左右;不同部位立柱失效后,荷载将重新分布,其轴力由紧邻的柱承担,而上方梁的受力形式也从受弯转变为受拉,发生悬链线效应,在中心柱失效工况下,相邻的各柱轴力增加了近20%。

**关键词:** 框架结构楼房; 单根立柱失效; 非线性动力分析; 内力调整; 动力响应特性

**中图分类号:** TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)02-0102-07

## Study on Dynamic Response Characteristics of Frame Structure Building with Single-column Failure

HOU Yong-heng<sup>1a,1b</sup>, YAO Ying-kang<sup>1a,1b</sup>, YU Shan-shan<sup>1a,1b</sup>, HUANG Xiao-wu<sup>2</sup>

(1. a. State Key Laboratory of Precision Blasting; b. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jianghan University, Wuhan 430056, China; 2. Wuhan Explosions and Blasting Corporation Limited, Wuhan 430056, China)

**Abstract:** The dynamic response characteristics such as deformation capacity, acceleration, and load transfer of high-rise frame structure buildings under the condition of single column failure in different parts were studied. Firstly, according to the Code for Design of Concrete Structure (GB50010), a 4×6 span 8-story reinforced concrete frame structure model was established by using PKPM design software. Secondly, based on the component removal method, the finite element software SAP2000 was used to calculate the dynamic response characteristics of the frame structure with the failure of different single columns at the first floor, including the center column, long side middle column, short side middle column and corner column. The results show that the plastic angle is less than 6 for all the four column failure conditions, and the structure will not collapse. When the central column fails, the structural stability is

收稿日期: 2023-01-31

作者简介: 侯永恒(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事建筑物爆破拆除相关领域研究, (E-mail) 1016879391@qq.com。

通讯作者: 姚颖康(1981-), 男, 博士、高级工程师, 主要从事建筑物精细爆破拆除和土木工程防灾减灾等领域的理论与技术研究, (E-mail) shanxiyao@jhun.edu.cn。

基金项目: 武汉市知识创新专项基础研究项目(2022020801010371); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2020CFA043); 湖北省重点研发计划项目(2020BCA084)

the worst, and the probability of continuous collapse is the highest, followed by that of the short side and long side middle columns, and the corner column has the least probability. Under the condition of center column failure, the dynamic impact of the load on the residual structure is the most significant, with a maximum negative acceleration of about 3 g, which is twice as high as that of the short side middle column and the long side middle column. After the failure of the columns, the loads will be redistributed. The axial force will be borne by the adjacent columns, while the stress form of the upper beam will also change from bending to tension, resulting in a catenary effect. In the scenario of the central column failure, the axial force of the adjacent columns will increase by nearly 20%.

**Key words:** frame structure building; single column failure; nonlinear dynamic analysis; internal force adjustment; dynamic response characteristics

近年来,随着城市建设日新月异,在城市更新与工业升级改造过程中,大量高层楼房需要拆除,爆破拆除因其效率高,施工过程相对安全,已成为建筑物拆除的首选方式<sup>[1]</sup>。但是,高层楼房拆除逐渐呈现规模大型化、结构复杂化等特点,随之而来的是拆除爆破楼房倒塌破坏与有害效应的精细控制问题,高层楼房承重立柱失效条件下结构的内力调整和失稳破坏机制研究已成为拆除爆破领域理论研究的重点和难点。与此同时,随着国际安全形势和反恐新变化,建筑物在意外爆炸作用下的抗连续倒塌性能与安全评估理论也成为土木工程领域研究的热点问题。

目前,国内外相关学者围绕建筑物承重结构失效失稳倒塌开展了大量的研究,相关研究可归纳为理论分析,模型试验和数值模拟三个方面。理论分析方面:彭韬宇建立了框架结构建筑物爆破拆除的力学模型<sup>[2]</sup>;宋满荣等人提出了边柱失效时简化的结构抗力分析模型<sup>[3]</sup>;高佳明等人提出了结构极限承载力计算方法<sup>[4]</sup>,并建议同时考虑极限承载力和梁端转角对混凝土结构进行倒塌判定;模型试验方面:何庆峰等采用爆破方式对一 RC 框架结构短边中柱和角柱进行拆除试验<sup>[5]</sup>,研究发现,横向或纵向空间的空间空腹梁作用是结构在柱失效后的荷载重分布的主要传力路径;何嘉轩等制作了 1:1 的一榀两层两跨装配式预应力混凝土平面框架结构<sup>[6]</sup>,探究框架在中柱失效情况下的变形能力、受力机制和荷载的替代传力路径;杨涛等设计了 1/4 的框架子结构模型<sup>[7]</sup>,通过快速抽柱的方法研究了框架梁的跨高比和预应力等参数对其动态倒塌性能的影响;数值模拟方面:程建军等采用有限元软件对中柱失效时 RC 平面框架进行了非线性静力分析<sup>[8]</sup>,研究其抗倒塌的承载力及其对应的荷载传递机理;黄华采用 SAP2000 有限元软件对某框架结构依次拆除底层纵向边柱、横向边柱、角柱和内柱<sup>[9]</sup>,研究抗震框架的倒塌破坏行为。柯长仁利用 SAP2000 有限元软件采用非线性动力法对一 24 层框剪结构进

行抗连续倒塌研究<sup>[10]</sup>,发现同一楼层柱失效结构的连续倒塌概率最大的为中柱。

综上所述,虽然,国内外相关学者围绕建筑物承重结构失效条件下结构的失稳倒塌开展了相关研究,但相关结论尚不能为拆除爆破领域试爆立柱选择与稳定性评价提供依据。为此,本文根据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)设计了一栋 8 层钢筋混凝土框架结构楼房<sup>[11]</sup>,借助 SAP2000 有限元软件,运用非线性动力分析方法,分别拆除楼房的长边中柱、短边中柱、角柱、中心柱,进而分析其框架结构的变形能力、加速度响应和荷载传递等动力响应特征,可为拆除爆破试爆立柱的选择和框架结构楼房遭受意外冲击荷载局部承重立柱失效条件下的稳定性评价提供依据。

## 1 框架结构楼房模型

根据我国规范《混凝土结构设计规范》,利用 PKPM 软件来计算设计模型。模型为 8 层钢筋混凝土框架结构楼房,1 层层高 4.2 m,2~8 层为 3.6 m,纵横向柱距均为 6 m。见图 1 和图 2。

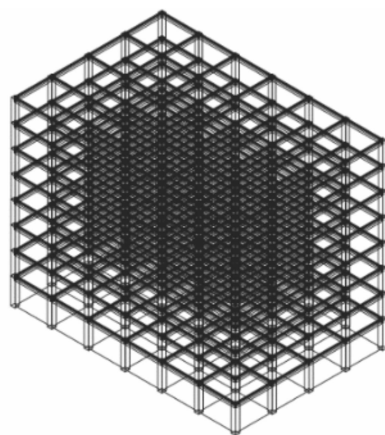


图 1 三维框架结构图

Fig. 1 Three-dimensional frame structure diagram

1 层柱截面为 700 mm × 700 mm、2-4 层柱截面为 650 mm × 650 mm、5~8 层柱截面 600 mm ×

600 mm;梁截面均为 300 mm × 550 mm;楼板厚为 150 mm;无外墙。梁、板、柱混凝土强度等级均为 C30;混凝土抗压强度采用强度等级的标准值为 20.1 MPa;纵向受力钢筋均为 HRB400,箍筋为 HPB300;屋面恒载 3.25 kN/m<sup>2</sup>,活载为 0.5 kN/m<sup>2</sup>,楼面恒载为 4.25 kN/m<sup>2</sup>,活载为 2.0 kN/m<sup>2</sup>;基本风压为 0.45 kN/m<sup>2</sup>,地面粗糙程度为 C 类;场地土为 II 类,设防烈度为 7 度,设计加速度为 0.01 g,周期折减系数为 0.7,二级框架。采用 PKPM 计算得到梁柱配筋结果如表 1,因结构简单,考虑钢筋归并以便分析,然后将模型导入至 SAP2000,采用拆除构件法分析其整体动力响应。

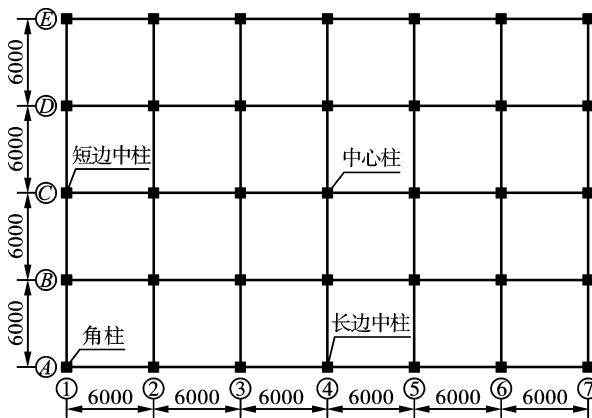


图 2 结构平面布置图(单位:mm)

Fig. 2 The layout plan of the structure(unit:mm)

表 1 梁柱配筋表

Table 1 Beam-column reinforcement table

层数	构件	配筋
1~8层	梁端	7 C22
	梁跨中	4 C22
	梁箍筋	A8@100/150
1层	柱	16 C20
	柱箍筋	A8@100/150
2~4层	柱	16 C18
	柱箍筋	A8@100/150
5~8层	柱	12 C20
	柱箍筋	A8@100/150

## 2 立柱失效分析理论

### 2.1 构件拆除分析方法

论文采用拆除构件法对框架结构单根立柱失效条件下的动力响应特征进行分析,拆除构件法可分为线性静力、非线性静力、线性动力和非线性动力四种分析方法。线性静力是最基本的分析方法,但未考虑构件失效过程中的动力特性,分析结果并不准

确。线性动力分析考虑了动力效应,但未考虑几何非线性和材料的非线性,不能准确反馈结构塑性变形时的行为。非线性静力分析在线性静力分析的基础上,考虑了材料非线性的作用,但是没有考虑立柱失效时的动力影响,分析的结果偏于相对安全。

试爆是指试验爆破或试探性爆破,试爆时间应在正式装药前且防护工作基本完成时进行,它是拆除爆破作业过程中检验爆破器材可靠性、防护形式有效性以及合理炸药单耗的重要技术手段,是确定各项爆破参数的必要环节。论文针对立柱试爆时的爆炸荷载特征和立柱失效破坏特征,选用考虑材料非线性及构件移除动力特性的非线性动力分析方法,以较精确分析单根立柱失效条件下框架结构的动力响应特性。

### 2.2 立柱失效条件下结构荷载模式和破坏准则

#### (1) 美国总务局规范 GSA2003

GSA2003 规定在静力分析时<sup>[12]</sup>,在结构上施加 2(DL+0.25LL)的荷载组合,其中 2 是动力放大系数,动力分析时施加(DL+0.25LL)的荷载组合;其中 DL 是恒载,LL 是活载。

对于线性分析,用能力供需比 DCR(Demand-Capacity-Ratios)作为连续倒塌的破坏准则的评价指标,DCR 的计算公式为

$$DCR = \frac{Q_{ud}}{Q_{ce}} \quad (1)$$

式中: $Q_{ud}$ 为关键构件失效时结构构件或节点受到的弯矩、剪力或轴力等; $Q_{ce}$ 为结构构件或节点能够承受的极限弯矩、剪力或轴力等。

GSA 规范规定;对于规则结构 DCR > 2,不规则结构 DCR > 1.5 时,结构破坏发生倒塌的概率较高。

对于非线性分析,美国规范 GSA 规定以塑性转角和位移线性比作为控制条件,非线性分析的评估标准如表 2 所示。

表 2 非线性分析评估标准

Table 2 Evaluation criteria of nonlinear analysis

钢筋混凝土框架构件	延性	转角	备注
钢筋混凝土框架梁		6°	
钢筋混凝土框架柱	1		
钢筋混凝土单向板		6°	
钢筋混凝土双向板		6°	
钢筋混凝土框架		2°	侧移 ≤ H/25

#### (2) 美国国防部规范 DOD2010

DOD 规定在静力分析时<sup>[13]</sup>,在结构上施加 2[(0.9or1.2)D+(0.5Lor0.2S)]+0.2W,其中 2 为动力放大系数,动力分析时施加(0.9or1.2)D+

$(0.5Lor0.2S) + 0.2W$ , 其中  $D$  为恒载,  $L$  为活载,  $S$  为雪载,  $W$  为风荷载。

对于线性分析, DOD 规范也采用能力供需比 DCR 作为评价标准, DCR 的定义与 GSA 规范相同。但以

$$DCR = \frac{Q_{ud}}{Q_{ce}} \leq 1 \quad (2)$$

作为破坏准则。

对于非线性分析, 同样的以位移的延性比和塑性转角作为控制条件。

### 3 不同立柱失效条件下结构动力响应分析

#### 3.1 有限元模型及关键参数确定

SAP2000 采用基于对象的非线性有限元技术, 在分析中, 软件会将结构对象转化为有限元分析数据, 本文中框架梁和柱均采用杆单元, 楼面采用膜单元。分析方法采用非线性动力时程分析, 根据《建筑结构抗倒塌设计规范 CECS392:2014》规定<sup>[14]</sup>, 采用非线性直接积分法, 考虑结构的几何非线性 P-Delta 效应和大位移, 时程分析的积分步长不宜大于 0.005 s, 钢筋混凝土阻尼比取 0.05, 选取构件在 1.0 s 时刻失效。根据 GSA 规定, 承重立柱失效时间不得大于 0.1  $T$ , 其中  $T$  为构件失效后的剩余结构的自振周期, 取失效时间为 0.05 s。建立的有限元模型如图 3 所示, 抽取柱后剩余结构有限元模型如图 4 所示。

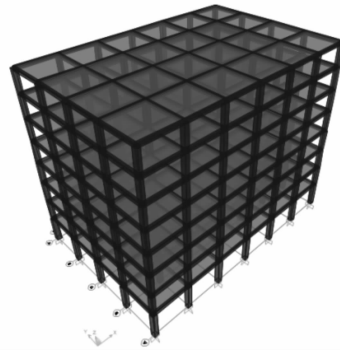


图 3 有限元分析模型

Fig. 3 Finite element analysis model

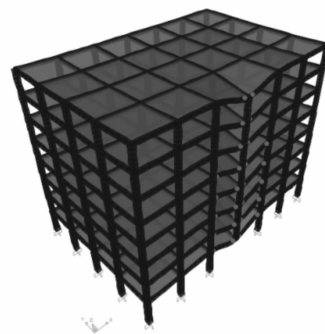


图 4 剩余结构有限元分析模型

Fig. 4 Finite element analysis model of the residual structure

#### 3.2 动态位移

分别拆除框架结构的长边中柱、短边中柱、角柱、中心柱, 立柱拆除后剩余结构应力云图如图 5 所示, 失效点竖向位移时程曲线如图 6 所示, 不同拆除工况的竖向位移结果见表 3。

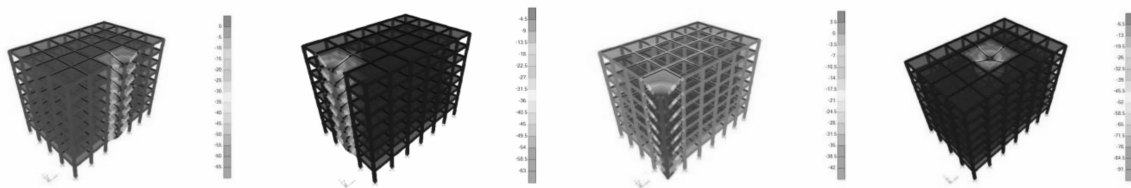


图 5 不同工况下的剩余结构应力云图

Fig. 5 Residual structural stress clouds under different working conditions

表 3 不同工况下动态响应分析

Table 3 Dynamic response analysis under different working conditions

	角柱	短边中柱	长边中柱	中心柱
失效点最大位移/mm	45.12	67.45	67.57	97.09
最大塑性转角/°	0.21	0.32	0.33	0.46

分析图 6 和表 3 数据分析可知:

1) 失效点的竖向位移均单调减小, 继而有一定波动, 最终趋向一稳定值。

2) 四种拆除工况导致的塑性转角均小于 6°, 根据 GSA 规范可知, 结构均不会发生连续倒塌, 可为框架结构楼房爆破拆除试爆立柱的选择提供理论支撑。

3) 在四种拆除工况下, 中心柱的竖向位移 97.09 mm > 长边中柱 67.57 mm 大于短边中柱 67.45 mm > 角柱 45.12 mm, 同样的最大塑性转角

中心柱  $0.46^\circ >$  长边中柱  $0.33^\circ >$  短边中柱  $0.32^\circ >$  角柱  $0.21^\circ$ , 由此可以得出拆除中心柱时结构的稳定性最差, 发生连续倒塌的概率相对最大, 短边中柱和长边中柱次之, 角柱概率最小。

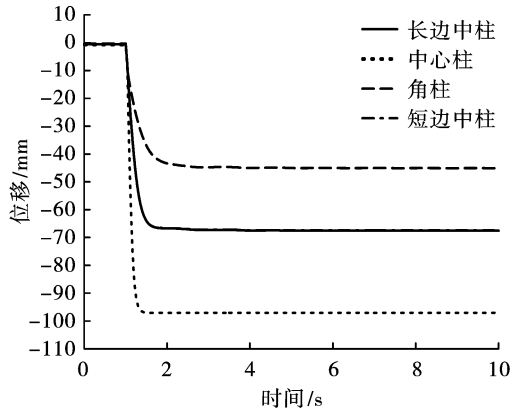


图6 失效点位移时程曲线

Fig. 6 Displacement-time curves of column failure points

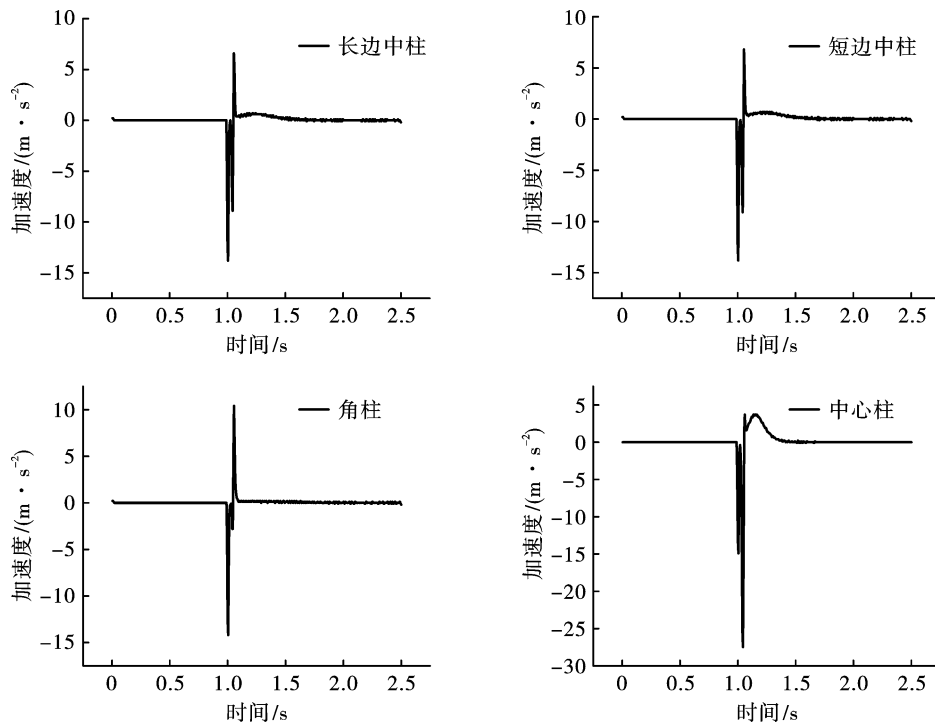


图7 失效节点加速度时程曲线

Fig. 7 Acceleration curves of column failure points

由图7加速度时程曲线和表4加速度极值数据可知:

(1) 框架结构楼房不同部位立柱移除时, 失效节点均会经历显著的“失重”和“超重”效应, 且失重和超重的变换速度极快, 直至停止。

(2) 拆除短边中柱工况和长边中柱工况下, 其正、负两个方向的最大加速度基本相似, 但却与角柱和中心柱拆除工况有较大区别, 其与楼房结构形式

### 3.3 加速度响应

建(构)筑物爆破拆除的失稳倒塌是一个高度复杂的非线性动力学过程。目前, 爆破拆除理论研究的最大瓶颈是缺少像建筑学那样有一套完整的力学理论基础。加速度作为一基本物理量, 对爆破拆除建筑物的动力学研究是非常重要和必要的。图7为四种不同工况下, 失效点竖向加速度时程曲线, 表4为不同工况下失效节点加速度极值, 其中加速度向上为正。

表4 不同工况下加速度极值  
Table 4 Extreme values of acceleration under different working conditions

工况	正向最大值/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	负向最大值/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
拆除短边中柱	6.8	-13.8
拆除长边中柱	6.6	-13.8
拆除角柱	10.4	-14.2
拆除中心柱	3.7	-27.5

有关。

(3) 中心柱拆除的负向最大加速度值是短边中柱和长边中柱拆除工况的近2倍, 楼房荷载对中心柱拆除后剩余结构的动力冲击作用更明显。

总体上看, 中心柱拆除情况下, 楼房荷载对剩余结构的动力冲击作用影响更大。

### 3.4 内力调整情况

不同部位的单根承重立柱失效后, 由于荷载分

配得不均匀,会导致上部荷载进行内力的重新分配。此时,失效柱上方的梁会进入塑性变形阶段,形成塑性铰,塑性铰在各个梁上大量出现致使变形充分发展,有利于荷载的耗散,从而产生了内力的重分布。研究特定部位承重立柱拆除后框架结构的内力调整情况,是分析框架结构楼房爆破拆除失稳倒塌破坏机理的基础,可为拆除爆破定量化设计研究提供支撑。

论文分析了四种工况下的内力调整情况,分别选取与失效立柱紧邻的纵跨和横跨立柱作为研究对象,立柱轴力变化计算结果见表 5,其中  $N$  为失效后立柱轴力, $N_A$  为失效前立柱轴力,失效节点梁端弯矩变化见表 6。因中心柱失效工况下,结构的稳定性相对较差,因此,以中心柱下工况为例分析结构的内力调整情况,其中图 8 为中心柱失效工况下内外围底层各柱轴力时程曲线,图 9 为中心柱失效后失效节点上方梁弯矩时程曲线。

表 5 不同工况下立柱轴力变化  
Table 5 Variation of column axial force under different working conditions

失效工况	紧邻柱失效前后轴力变化 $N/N_A$			
长边中柱 A4 失效	A5	A3	B4	
	(1.36)	(1.35)	(1.19)	
短边中柱 C1 失效	B1	D1	C2	
	(1.34)	(1.34)	(1.19)	
角柱 A1 失效	B1	A2		
	(1.36)	(1.36)		
中心柱 C4 失效	C5	D4	C3	E4
	(1.19)	(1.18)	(1.19)	(1.18)

表 6 不同工况下失效节点梁弯矩变化  
Table 6 Variation of bending moment of the beams at the failed nodes under different working conditions

失效工况	失效点梁弯矩变化/( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	
	失效前	失效后
长边中柱失效	-60.2	137.4
短边中柱失效	-59.9	137.4
角柱失效	-59.9	133.1
中心柱失效	-108.1	122.6

从上述计算结果表中和图 8、图 9 时程曲线可知:

- 1) 立柱失效后,底层相邻柱的轴力发生急剧变化,继而上下波动衰减,最终趋于一稳定值。
- 2) 立柱失效后,其内力基本由其相邻的柱子分担,离失效柱越远的柱其承担内力也越小。可见,与失效柱相邻的柱是结构内力重分布的关键构件。
- 3) 长边中柱和短边中柱失效工况下,其紧邻边

柱轴力增加 35%,内柱轴力增加近 20%、角柱失效工况下,紧邻柱轴力增加 36%、中心柱失效工况下,紧邻各柱轴力增加近 20%。

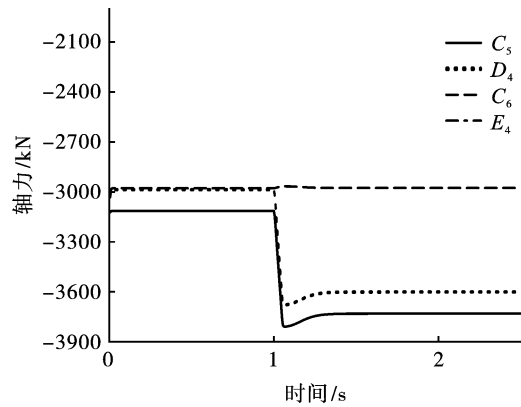


图 8 中心柱失效工况下柱底层各柱轴力时程曲线  
Fig. 8 Axial force curves of bottom columns when the central column fails

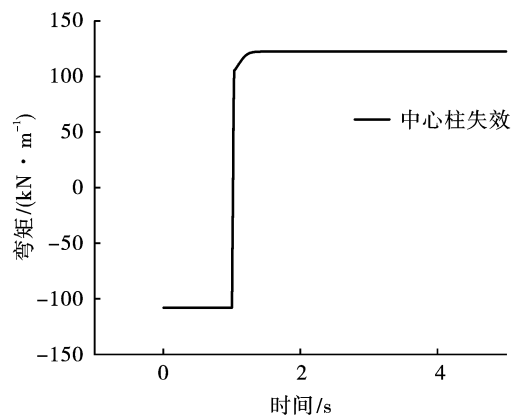


图 9 中心柱失效后失效节点上方梁弯矩时程曲线  
Fig. 9 Bending moment curve of the beam above the failure node after the failure of the central column

4) 失效柱上方节点梁弯矩迅速减小到零然后反向增大,说明结构的受力形式发生了变化,梁从受弯为主转变成为受拉传力,即梁发生了悬链线效应。

由上述分析可知,与失效柱紧邻的柱和与其相连的梁在立柱失效后是结构进行内力重分布的关键构件。

## 4 结论

通过建立一个 8 层的 RC 框架结构模型,在 SAP2000 中采用构件拆除法研究立柱失效情况下结构的动力响应特征。分别拆除首层长边中柱、短边中柱、角柱、中心柱,分析这四种工况的计算结果,得到了以下结论:

- 1) 在四种拆除工况下,其塑性转角均小于  $6^\circ$ ,结构不会发生倒塌,且拆除中心柱时结构的稳定性

最差,发生连续倒塌的概率最大,短边中柱和长边中柱次之,角柱概率最小。

2)在中心柱拆除工况下,楼房荷载对剩余结构的动力冲击作用影响更大。

3)立柱失效后,荷载将重新分布,其轴力由紧邻的柱承担,轴力变化与结构形式有关,其中,中心柱拆除工况下,相邻柱的轴力增加近20%,而上方梁的受力形式也从受弯转变为受拉,发生悬链线效应,反映出与失效柱紧邻的柱和梁是结构进行内力重分布的关键构件。

### 参考文献 (References)

- [1] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. 爆破, 2019, 36(2):1-12.
- [1] XIE Xian-qi. Development situation and trend of demolition blasting technology[J]. Blasting, 2019, 36(2):1-12. (in Chinese)
- [2] 彭韬宇. 框架结构建筑物爆破拆除失稳倒塌分析及计算机模拟[D]. 宁波:宁波大学, 2009.
- [2] PENG Tao-yu. Unstable analysis and collapse simulation of frame construction by blasting demolition[D]. Ningbo: Ningbo University, 2009. (in Chinese)
- [3] 宋满荣, 胡忍强, 黄慎江, 等. 预压装配式预应力混凝土框架边柱拆除时抗连续倒塌性能试验研究与理论分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(3):64-74.
- [3] SONG Man-rong, HU Ren-qiang, HUANG Shen-jiang, et al. Experimental research and theoretical analysis on progressive collapse resistance of prestressed fabricated PC fram with removal of side columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(3):64-74. (in Chinese)
- [4] 高佳明, 刘伯权, 黄 华, 等. 带板钢筋混凝土框架连续倒塌理论分析[J]. 工程力学, 2018, 35(7):117-126.
- [4] GAO Jia-ming, LIU Bo-quan, HUANG Hua, et al. Theoretical analysis on the progressive collapse of RC frame structures with slabs[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(7):117-126. (in Chinese)
- [5] 何庆峰, 易伟建. 爆破移除钢筋混凝土框架柱倒塌性能试验研究[J]. 爆破, 2017, 34(1):20-26.
- [5] HE Qing-feng, YI Wei-jian. Experimental study on collapse-resistant behavior of RC frame structures in explosion demolition[J]. Blasting, 2017, 34(1):20-26. (in Chinese)
- [6] 何嘉轩. 预压装配式预应力混凝土框架中柱失效下的结构连续倒塌试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2020.
- [6] HE Jia-xuan. Experimental study on progressive collapse of a prestressed fabricated PC frame subjected to a middle-column-removal scenario[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [7] 杨 涛, 谢元康, 郝天之. 装配式混凝土框架结构动态倒塌性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1):126-134.
- [7] YANG Tao, XIE Yuan-kang, HAO Tian-zhi. Experimental study on dynamic collapse of prefabricated RC frame sub-structures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1):126-134. (in Chinese)
- [8] 程建军, 喻 君, 刘 军. 中柱失效时多层 RC 平面框架荷载传递机理研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2):259-266, 280.
- [8] CHENG Jian-jun, YU Jun, LIU Jun. Load transfer mechanisms of multi-story planar frame subjected to a middle column removal scenario[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2):259-266, 280. (in Chinese)
- [9] 黄 华, 刘伯权, 张彬彬, 等. 钢筋混凝土抗震框架连续倒塌行为分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(4):35-44.
- [9] HUANG Hua, LIU Bo-quan, ZHANG Bin-bin, et al. Analysis of progressive collapse behavior of earthquake-resistant reinforced concrete frame[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4):35-44. (in Chinese)
- [10] 柯长仁, 姚东浩. 基于 SAP2000 的框剪结构抗连续倒塌研究[J]. 湖北工业大学学报, 2021, 36(2):86-90.
- [10] KE Chang-ren, YAO Dong-hao. Research on the continuous collapse resistance of frame-shear structure based on sap2000[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2021, 36(2):86-90. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国建设部. GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [12] Applied Reserch Associates, Inc. Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects[S]. Prepared for the US General Services Administration, Washington, DC, 2003.
- [13] Department of Defense. Design of buildings to resist progressive collapse[S]. Department of Defense, January 2005.
- [14] CECS 392—2014 建筑结构抗连续倒塌设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2014.