

文章编号:1673-2049(2018)05-0203-08

# 火灾下柱失效对多层钢框架连续倒塌的影响

张壮南<sup>1</sup>, 杨 玥<sup>1</sup>, 李海平<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 碧桂园豫北区域, 河南 新乡 453000)

**摘要:**针对钢结构抗连续性倒塌分析中多数采用直接拆柱法,不能真实反映由于火灾引起钢结构发生连续性倒塌时的实际情况,用 ANSYS 有限元软件建立无楼板的多层钢框架模型,选取已有文献中角部区域不同失效柱个数的工况。采用热-固耦合法,考虑火灾使柱失效和材料非线性、几何非线性进行分析。研究了火灾下钢框架结构抗连续倒塌性能及角部区域允许失效柱个数,并将分析结果与已有文献采用直接拆除法结果进行对比。结果表明:采用 ANSYS 中热-结构耦合功能,结合生死单元法能够较好模拟钢框架由于火灾导致结构发生连续性倒塌的过程;通过分析 3 种角部区域不同失效柱个数的工况结果,得出失效柱允许个数为 3 根;与现有文献采用直接拆除法的有限元分析结果进行对比,发现采用直接拆除法分析结果过于保守,考虑火灾导致柱失效更加贴近实际倒塌情况。

**关键词:**火灾;钢框架结构;连续倒塌;生死单元法;有限元分析

**中图分类号:**TU973.2 **文献标志码:**A

## Influence of Column Failure on Progressive Collapse of Multi-story Steel Frames Under Fire

ZHANG Zhuang-nan<sup>1</sup>, YANG Yue<sup>1</sup>, LI Hai-ping<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China;

2. The Northern Region of Henan Province of Country Garden, Xinxiang 453000, Henan, China)

**Abstract:** In the analysis of continuous collapse of steel structure, the direct demolition method was mostly used, but because of the continuous collapse of steel structure was caused by fire, the actual situation could not be truly reflected. Therefore, it was very important to analyze the resistance of steel structure to continuous collapse under fire. A multi-layer steel frame model without floor was established by using ANSYS finite element software. The thermal and solid coupling method was used to consider the failure of fire, and the material nonlinearity and geometric nonlinearity were taken into account comprehensively. The continuous collapse resistance of steel frame structures under fire and the number of allowable failure columns in the corner region were studied, and the results were compared with the results of direct dismantling method used in the existing literature. The results show that the continuous collapse process of steel frame can be simulated by the method of thermal structural coupling in ANSYS, combined with the method of life and death unit. By analyzing the working conditions of different number of failure columns in 3 kinds of corner regions, the number of allowable numbers of the failure columns is 3. The results of the finite element analysis of dismantling method and the results of

收稿日期:2018-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51108279)

作者简介:张壮南(1977-),女,黑龙江哈尔滨人,副教授,工学博士,E-mail:zhuangnanzh@163.com。

finite element analysis are compared. It is found that the result of direct dismantling is too conservative. Considering the fire is more close to the actual collapse situation.

**Key words:** fire; steel frame structure; progressive collapse; birth and death element method; finite element analysis

## 0 引言

结构发生连续性倒塌是指在偶然荷载作用下,造成结构局部破坏从而使整体结构发生连锁反应,破坏部位向其周围位置扩散,最终导致结构整体丧失承载力而发生大范围的倒塌<sup>[1]</sup>。在火灾作用下,受火构件发生破坏,从而导致周围构件逐一失效,甚至引发整体结构的倒塌。因此,对钢结构框架在偶然荷载作用下的连续性倒塌性能研究是一项十分重要的课题。

Antois 等<sup>[2]</sup>采用气缸模拟柱失效分析钢框架结构在瞬时去柱后的动力响应。谢甫哲等<sup>[3-4]</sup>对抽柱法分析钢框架连续倒塌时柱失效时间取值、柱失效位置等问题进行研究,并对钢框架进行了试验研究。Chen 等<sup>[5]</sup>采用拉索形式使底层中柱迅速失效以模拟结构的初始破坏,对钢框架结构进行了抗连续性倒塌试验研究。Sun 等<sup>[6-7]</sup>考虑了梁截面尺寸、荷载比等对钢框架结构连续性倒塌机理的影响。杜修力等<sup>[8]</sup>对钢框架在爆炸荷载作用下连续性倒塌进行了数值模拟,对钢框架结构的连续倒塌机制进行了研究。王来等<sup>[9]</sup>采用拆除构件法对不带楼板、带钢筋混凝土楼板和带组合楼板的钢框架进行了仿真分析。姜健等<sup>[10]</sup>基于 OpenSees 软件分析了平面钢框架结构在受火情况下的倒塌机制,提出了当梁柱刚度比较小时,结构以弱梁机制发生倒塌,梁的刚度比较大时,结构以强梁机制倒塌。姜健等<sup>[11]</sup>在提高火灾下钢框架结构抵抗连续性倒塌的性能方面进行了探索,主要通过利用竖向和水平 2 种支撑。史奉伟等<sup>[12]</sup>研究了柱的不同失效时间对失效点位移、振动频率等方面的影响。谢甫哲等<sup>[13]</sup>对平面钢框架结构开展了抗倒塌动力试验研究。黄修峰<sup>[14]</sup>提出了评价钢结构在受火情况下对倒塌危险性程度方法。

现今钢结构抗连续性倒塌分析中多数采用直接拆柱法,未具体考虑柱失效方式,不能准确体现失效方式对于整体结构连续性倒塌的影响。本文在考虑柱受火失效情况下,选取文献[15]中角部区域的 3 种工况,利用 ANSYS 有限元软件对五层八榀两跨钢框架结构的抗连续性倒塌进行全过程反应分析,

并将数值模拟结果与文献直接拆柱导致钢框架结构连续性倒塌的数据作对比,为后续提出完整的钢框架结构抗连续性倒塌机制打下基础。

## 1 有限元模型验证

参考文献[16],采用 ANSYS 建立计算模型。模型是一个层高 4 m,柱间距 9 m 的三层 3×2 跨的钢框架厂房。选择 Shell57 单元转换为 Shell181 单元,采用非线性静力分析方法。梁柱型号及具体尺寸、参数设置详见文献[16]。将柱分别编号为柱 1~12,如图 1 所示。

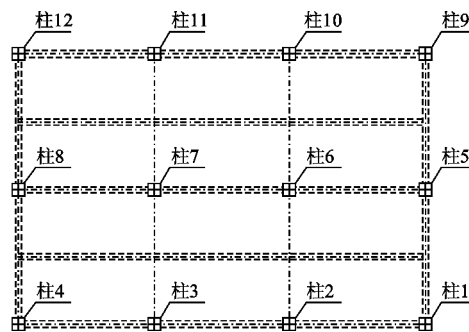


图 1 文献[16]钢框架模型柱布置示意

Fig. 1 Steel Frame Model Column Layout Diagram of Literature [16]

工况为柱 2 受火,热分析结束时得到受火构件各时刻所对应的温度对比,如图 2 所示。本文模拟的受火构件温度-时间曲线与文献曲线吻合较好,各时刻的构件温度相对误差均在 5% 以内,验证了本文建模、热参数设置以及热分析方法的准确性。

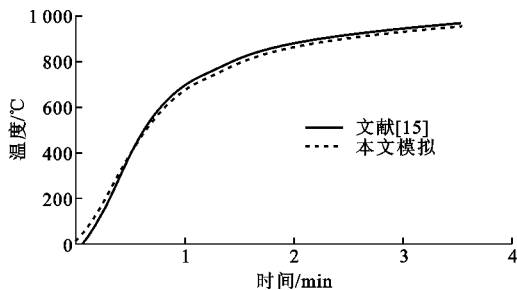


图 2 受火构件温度-时间曲线

Fig. 2 Temperature-time Curves of Fire Components

在结构分析中,由图 3 可以看出,在破坏时间 16 min 之前模拟与文献吻合较好,模拟受火柱的轴

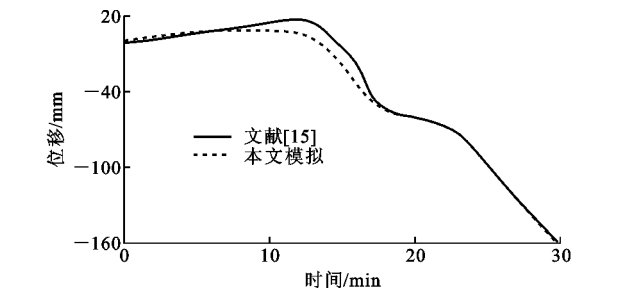


图 3 受火柱轴向位移对比

Fig. 3 Comparison of Axial Displacement of Fire Column  
向位移极大值略低于文献极大值,这是由于文献参数未明确给出。

对于边柱受火工况,对 16 min 时受火边柱 2 失效进行剩余结构的倒塌性能分析。受火边柱轴力-时间对比见图 4。模拟与文献大致趋势与受火柱失效时间相吻合。

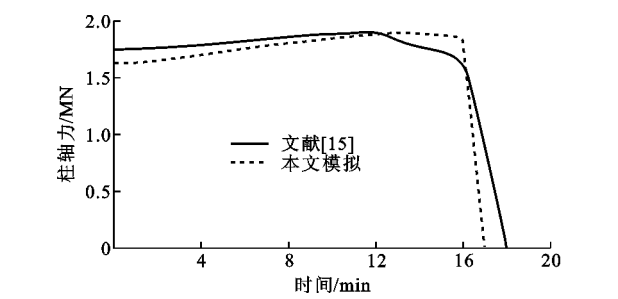


图 4 受火边柱轴力-时间对比

Fig. 4 Comparison of Axial Force-time of Fire Side Column  
由以上分析可知,采用 ANSYS 建立的有限元模型能够正确地模拟火灾下钢框架结构的连续性倒塌性能,为后续研究提供了正确依据。

2 火灾对钢结构连续倒塌的影响分析

2.1 工况选取

图 5 为钢框架模型柱示意图。本文选用文献[15]中 3 种角部区域的临界与倒塌工况,如表 1 所示,按照倒塌风险从小到大依次排序,对待拆除柱施加火荷载,使其在火灾作用下破坏直至失效。从而评定火灾下不同结构布置的框架抗连续倒塌性能。最后对比火灾情况下失效与文献采用的直接拆除法对结构连续性倒塌的影响程度。该模型的详细尺寸及材料参数见文献[15]。

荷载计算参考美国 DOD2010 对于倒塌分析时荷载取值的建议,荷载组合采用“1.2 倍恒载+0.5 倍活载”进行倒塌分析时所承受的荷载计算。具体框架荷载工况见文献[15]。研究过程中采用国际标准化组织制定的 ISO834 标准升温曲线<sup>[17]</sup>,表达式

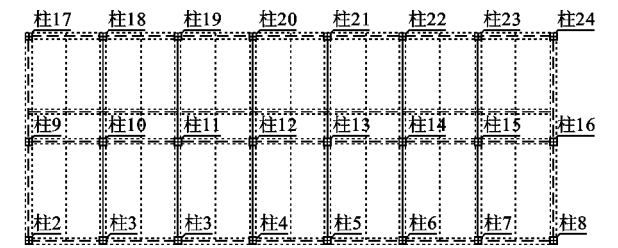


图 5 文献[15]钢框架模型柱布置示意

Fig. 5 Steel Frame Column Layout  
Diagram of Literature [15]

表 1 倒塌工况

Tab. 1 Collapse Conditions

倒塌工况编号	受火柱
1	1,9,17
2	1,2,9,17
3	1,2,9,10,17

如下

$$T_t=345lg(8t/60+1)+20$$
 (1)

式中: $t$  为时间; $T_t$  为  $t$  时刻炉内环境温度。

2.2 结构构件的破坏判别标准与整体结构倒塌判断准则

2.2.1 结构构件的破坏判别标准

结构构件耐火极限的判定准则为:构件在耐火试验时可以保证它承担荷载能力的时间<sup>[18]</sup>。构件承担荷载能力的判定参数为变形量和变形速率。变形速率准则在变形量大于  $L/30$  ( $L$  为构件净跨度)以后才考虑。构件达到以下任一判定准则时,均认为构件不适于继续承载<sup>[19]</sup>。

(1)抗弯构件

极限弯曲变形量  $D$  为

$$D=L^2/(400d)$$
 (2)

极限弯曲变形速率为

$$\frac{dD}{dt}=L^2/(9\ 000d)$$
 (3)

式中: $d$  为构件截面上抗压点与抗拉点之间的距离。

(2)轴向承重构件

极限轴向压缩变形量  $C$  为

$$C=h/100$$
 (4)

极限轴向压缩变形速率

$$\frac{dC}{dt}=3h/1\ 000$$
 (5)

式中: $h$  为初始高度。

2.2.2 火灾下钢框架整体结构倒塌判断准则

美国国防部发布的防连续倒塌暂行设计导则<sup>[20]</sup>(DOD 导则)规定由于去掉主要承重构件带来

的倒塌程度应加以限制,允许破坏可以出现在去除构件的上下 1 层,允许破坏的情况有以下 2 种:

(1)纯框架体系的破坏范围不应大于 1 根柱以外任何方向一跨。

(2)其他框架体系的破坏范围不应超过 70 m<sup>2</sup> 或楼层面积的 15%,如破坏范围超过以上限值则应重新设计。

本文采用非线性分析法,选用变形破坏准则,参照 DOD 导则,如表 2 所示。

表 2 变形破坏准则  
Tab. 2 Deformation Failure Criterion

构件	延性指标	转角/(°)	侧移
钢框架		24	H/25
受拉钢柱	20	12	0.09
受压钢柱	1		

注:H 为建筑高度;延性指标为极限位移与弹性极限位移之比。

综上所述,考察结构是否会发生连续性倒塌的判定准则如下(满足其一即可):

(1)所有参与荷载重分布的梁端及梁中部均产生塑性铰。

(2)由于荷载重分布导致火灾中未受热的柱子变形达到规定值。

2.3 工况结果分析

2.3.1 工况 1 结果

工况 1 热分析结果如图 6 所示。由图 6 可知,柱 9 失效时间为 22 min,柱 1,17 失效时间为 34 min。所对应的受火构件极限温度:柱 9 为 711 ℃,柱 1,17 为 835 ℃。

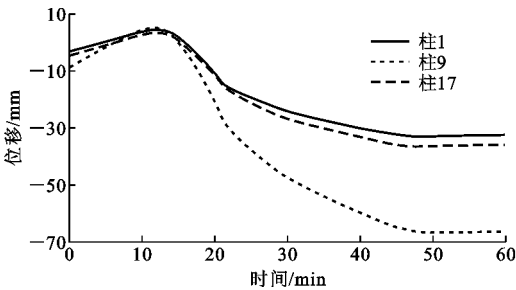


图 6 受火柱轴向位移-时间曲线 1

Fig. 6 Axial Displacement-time Curves 1 of Fire Columns

在剩余结构抗连续倒塌性能分析中分别在这 2 个时刻使受火柱失效,全部受火柱失效时刻的 Mises 应力云图见图 7。在第 34 min 全部受火柱失效时,可见失效柱上方钢梁变形程度严重。应力增长过大位置为梁柱节点处、梁端处、柱脚处。

由图 8(a)~(c)可知,靠近自由端的梁端应力在受火初期有所增长,随后在柱 9 失效时,左右两侧

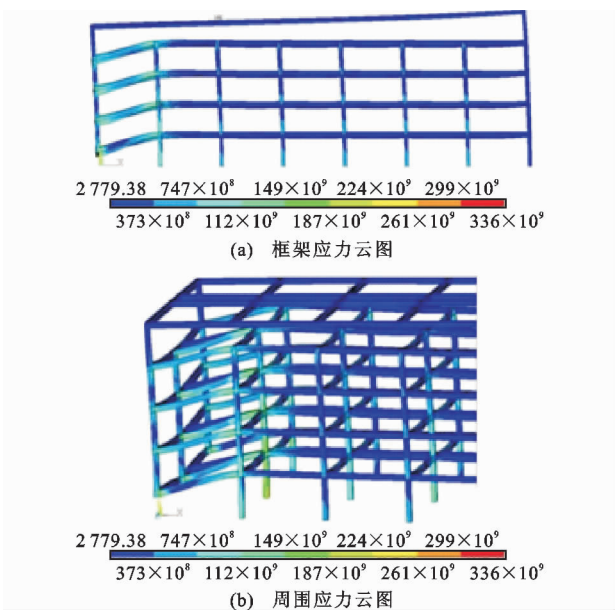


图 7 全部受火柱失效的 Mises 应力云图 1(单位:MPa)  
Fig. 7 Mises Stress Cloud Maps 1 of All Fire Columns Failure (Unit:MPa)

用于荷载重分布的柱应力突增,1 层柱应力突增明显,最大应力超过其屈服极限,进入塑性工作状态,但 2~4 层柱并未进入塑性。由图 8(d)~(f)可知,靠近悬臂端柱应力增长不明显,且所有用于荷载重分布的梁端应力小于其屈服极限 345 MPa,结构处于弹性阶段。此工况以上结果不满足结构倒塌破坏准则第 1 条。由图 9 可知,此工况用于荷载重分布的未受火柱最大侧移为 92.1 mm,小于钢构件侧移容许值 120 mm,不满足结构倒塌破坏准则第 2 条,但已达到接近值,此工况可作为倒塌临界工况考虑。综上所述,角部区域柱 1,9,17 全部失效后,失效柱相邻柱承担了原失效柱的轴力,结构进行了荷载重分配,此工况没有发生倒塌。

2.3.2 工况 2 结果

工况 2 热分析结果如图 10 所示。由图 10 可知,该工况分别在 22,34,36 min 时刻使柱依次失效并进行倒塌性能分析,对应的受火构件极限温度,柱 9 为 711 ℃,柱 1,17 为 835 ℃,柱 2 为 827 ℃。

在剩余结构抗连续倒塌性能分析中,分别在这 3 个时刻使受火柱失效,图 11 为全部受火柱失效时刻的 Mises 应力云图。在第 36 min 全部受火柱失效时,可见拆除柱上方钢梁变形程度严重,柱 2 因受火柱膨胀作用变形减小,这是由于柱 2 左侧受火柱失效拆除导致框架左侧角部区域向下变形塌落,压缩原本柱 2 受火产生的膨胀变形。此工况应力增长过大位置为梁柱节点处、梁端处、柱脚处。

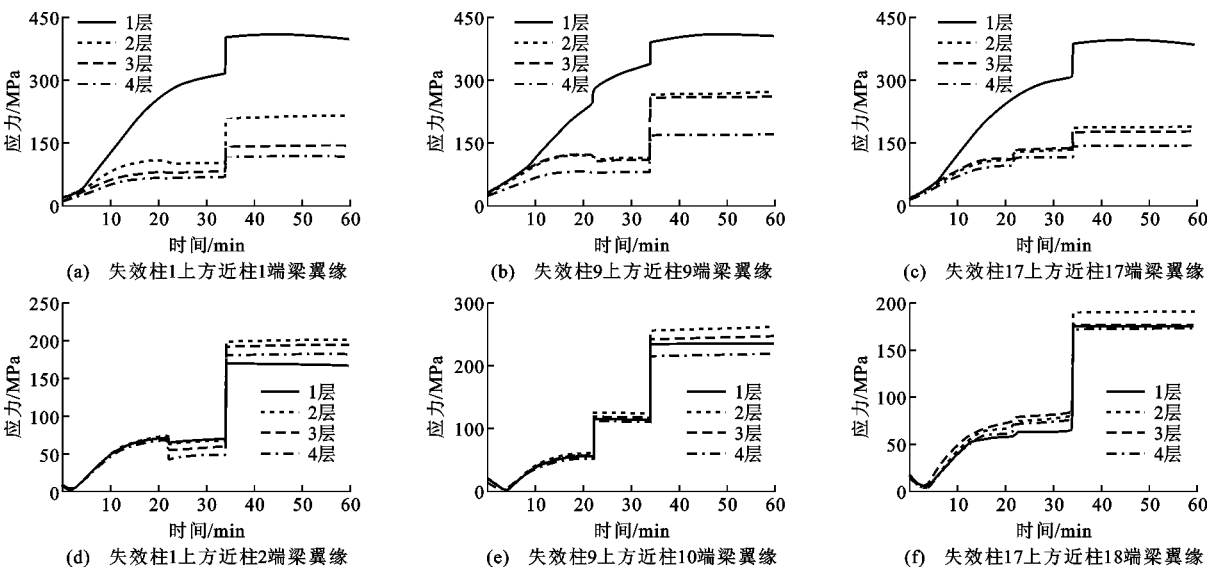


图 8 受火柱失效全过程的 Mises 应力-时间关系 1

Fig. 8 Mises Stress-time Relations 1 of Entire Failure Process of Fire Columns

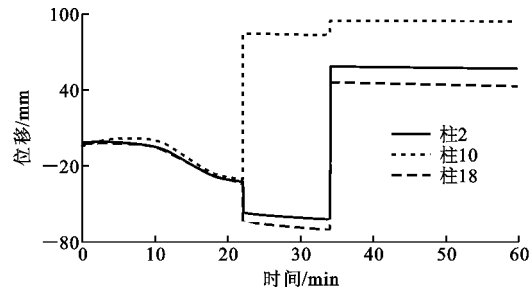


图 9 荷载重分布柱最大侧向位移-时间曲线 1

Fig. 9 Maximum Lateral Displacement-time Curves 1 for Load Redistribution Columns

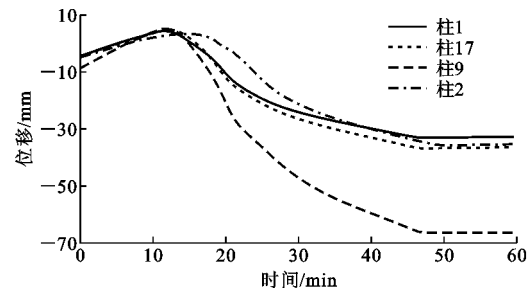


图 10 受火柱轴向位移-时间曲线 2

Fig. 10 Axial Displacement-time Curves 2 of Fire Columns

由图 12(a), (c)受火边柱上方梁端应力-时间关系可知, 1 层梁端均进入屈服状态, 产生塑性铰, 2~4 层梁端截面处于弹性工作状态。由图 12(b), (d)~(f)梁端应力-时间关系可知, 受火中柱失效上方梁端或受火边柱失效上方靠近中柱梁端 4 层梁应力增长较大, 除柱 17 上方近柱 18 端梁端应力较小且处于弹性工作状态外, 其他分析的梁端截面均产生了塑性铰。结构大部分区域已经进入塑性阶段,

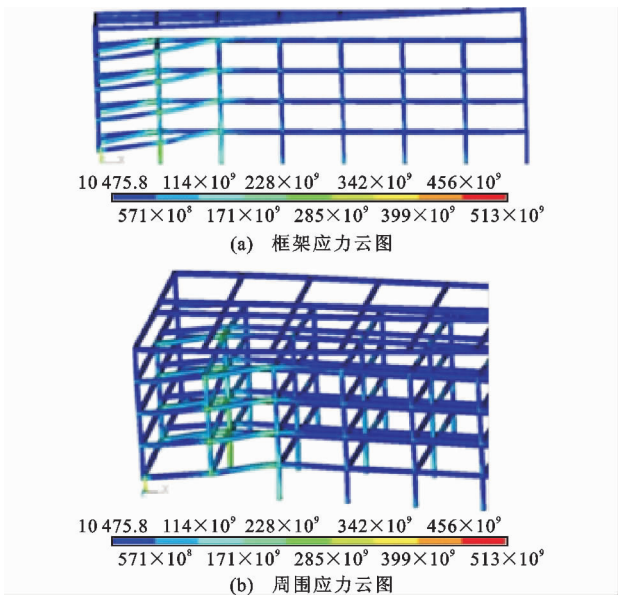


图 11 全部受火柱失效的 Mises 应力云图 2(单位:MPa)

Fig. 11 Mises Stress Cloud Maps 2 of All Fire Columns Failure (Unit:MPa)

仅有少数梁端处于工作状态。此工况以上结果不满足结构倒塌破坏准则第 1 条, 但已经很危险。

由图 13 可知, 用于荷载重分布的未受火柱最大侧移为 178 mm, 大于钢框架中钢构件侧移容许值 120 mm, 满足结构倒塌破坏准则第 2 条。综上所述, 角部区域柱 1, 2, 9, 17 全部失效后, 此工况发生倒塌, 倒塌时间为 36 min, 框架极限温度为 847 ℃。

### 2.3.3 工况 3 结果

工况 3 热分析结果如图 14 所示, 该工况分别在 17, 21, 30, 34 min 四个时刻使柱分别失效并进行倒

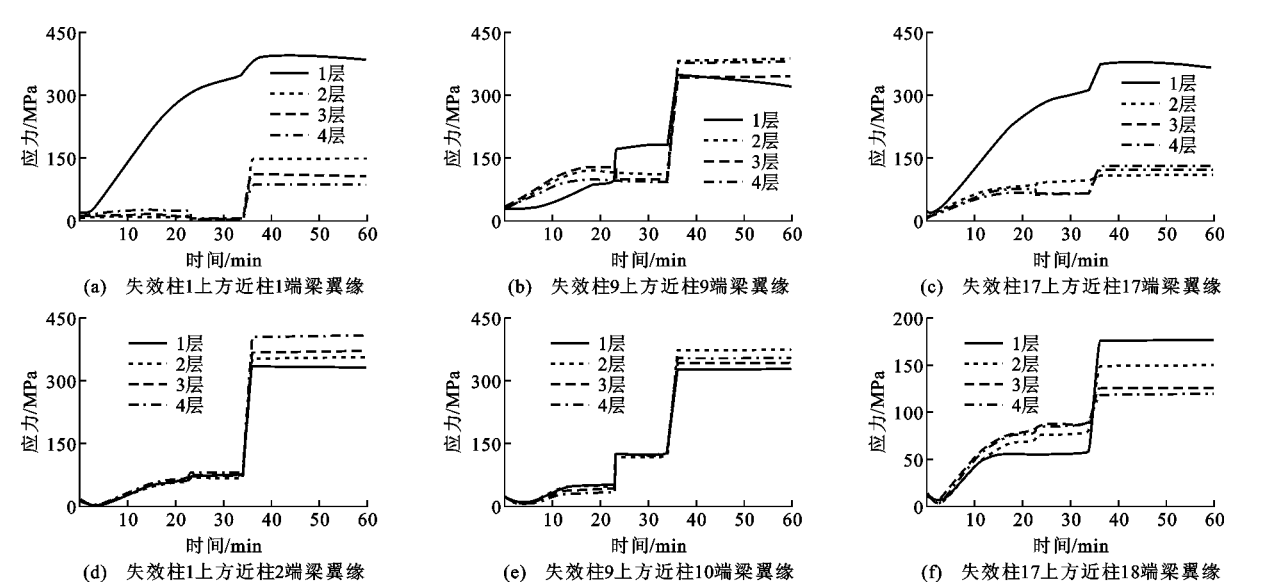


图 12 受火柱失效全过程的 Mises 应力-时间关系 2

Fig. 12 Mises Stress-time Relations 2 of Entire Failure Process of Fire Columns

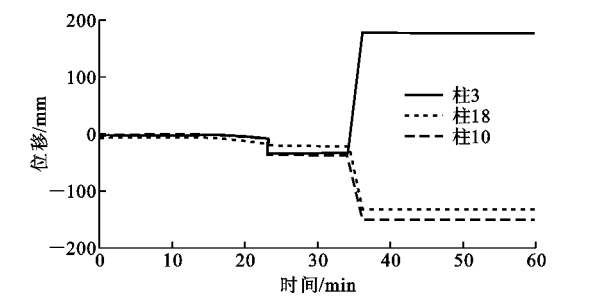


图 13 荷载重分布柱最大侧向位移-时间曲线 2

Fig. 13 Maximum Lateral Displacement-time Curves 2 for Load Redistribution Columns

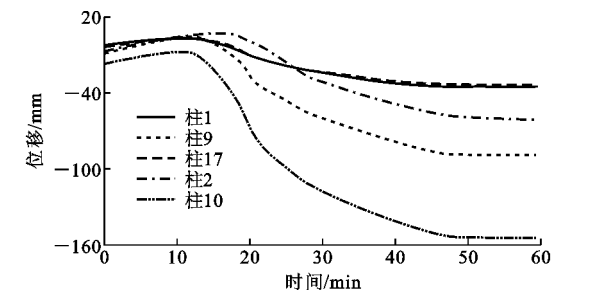


图 14 受火柱轴向位移-时间曲线 3

Fig. 14 Axial Displacement-time Curves 3 of Fire Columns

塌性能分析, 对应的受火构件极限温度: 柱 10 为 629 ℃, 柱 9 为 697 ℃, 柱 2 为 803 ℃, 柱 1, 17 为 835 ℃。

在剩余结构抗连续倒塌性能分析中, 分别在这 4 个时刻使受火柱失效, 全部柱失效时刻的 Mises 应力云图见图 15。由图 15 可知, 受火中柱上方 4 层梁端、梁中部均进入塑性状态, 受火边柱上方梁端、梁中部大部分均进入塑性状态, 此工况整体结构已超过不适于继续承载的变形, 丧失整体稳定性。

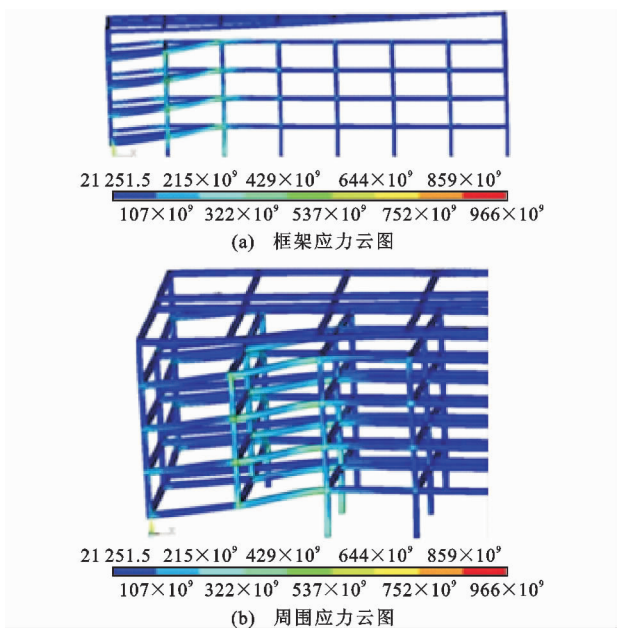


图 15 受火柱失效全过程的 Mises 应力云图 3(单位:MPa)

Fig. 15 Mises Stress Cloud Maps 3 of Entire Failure Process of Fire Columns (Unit:MPa)

由图 16 可知, 除失效柱 17 上方近柱 18 端 3, 4 层梁端外, 所有分析截面均进入屈服状态, 产生了塑性铰。钢梁远端翼缘应力突增, Mises 应力值均超过材料的屈服强度, 并已接近于材料的极限强度。此工况以上结构满足结构倒塌破坏准则第 1 条。

由图 17 可知, 用于荷载重分布的未受火柱最大侧移为 352 mm, 大于钢构件侧移容许值 120 mm, 满足结构倒塌破坏准则第 2 条。

综上所述, 角部区域柱 1, 2, 9, 10, 17 全部失效

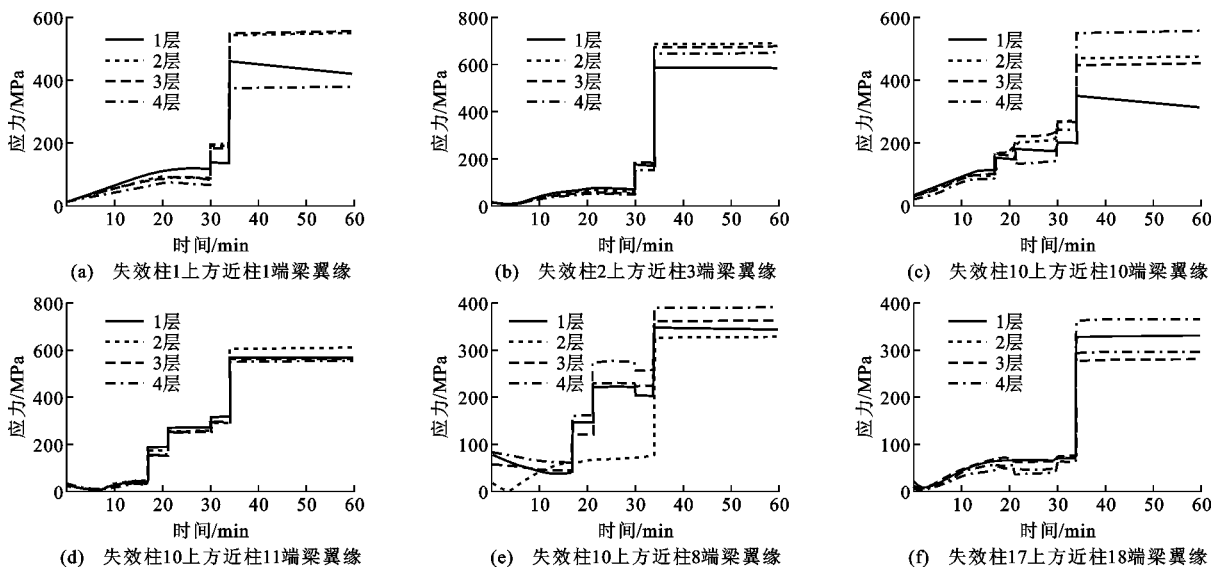


图 16 受火柱失效全过程的 Mises 应力-时间关系 3

Fig. 16 Mises Stress-time Relations 3 of Entire Failure Process of Fire Columns

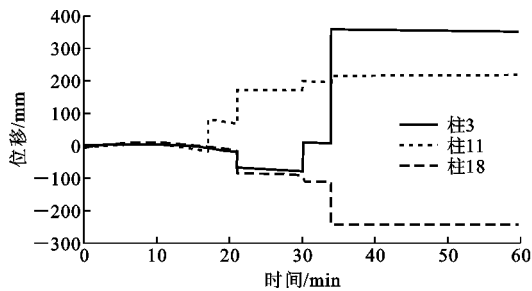


图 17 荷载重分布柱最大侧向位移-时间曲线 3

Fig. 17 Maximum Lateral Displacement-time Curves 3 for Load Redistribution Columns

后,用于荷载重分布柱的侧向位移超过破坏准则,此工况发生倒塌。

### 3 结 语

(1)通过与已有文献的热分析结果、结构分析结果对比,证明了利用 ANSYS 有限元软件建立模型的准确性。

(2)基于生死单元方法,在受火柱失效时刻拆除失效柱,对整体结构进行力学分析,模拟构件失效后结构变形的实际情况。通过对比不同工况结果,得到不同位置柱受火失效时整体结构的破坏机理与倒塌危险情况。

(3)通过分析 3 种工况结果可知,对于角部区域不同数量柱受火失效,失效柱允许个数为 3 根。

(4)对比现有文献直接拆柱导致钢框架结构连续性倒塌的情况以及本文考虑火灾导致柱失效情况下的有限元分析结果,采用拆除法(不考虑钢框架连续性倒塌的失效原因)分析结果过于保守,火灾导致

柱失效更加贴近实际倒塌情况。

### 参考文献:

#### References:

[ 1 ] ELLINGWOOD B R. Mitigating Risk from Abnormal Loads and Progressive Collapse[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20(4): 315-323.

[ 2 ] ANTONIS T, GILBERTO M, ANDRE F, et al. Experimental Investigation of Progressive Collapse of Steel Frames Under Multi-hazard Extreme Loading [C]//Seismological Society of China. Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing: Seismological Society of China, 2008: 33-38.

[ 3 ] 谢甫哲, 舒赣平, 凤俊敏. 基于抽柱法的钢框架连续倒塌分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(1): 154-159.

XIE Fu-zhe, SHU Gan-ping, FENG Jun-min. Progressive Collapse Analysis of Steel Frame Structure Using Removing Column Method[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(1): 154-159.

[ 4 ] 谢甫哲, 舒赣平. 空间钢框架连续倒塌拟静力试验 [J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2013, 14(2): 195-201.

XIE Fu-zhe, SHU Gan-ping. Quasi-static Experimental Research on Progressive Collapse of Space Steel Frames[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 14(2): 195-201.

[ 5 ] CHEN J L, HUANG X, MA R L, et al. Experimental

- Study on the Progressive Collapse Resistance of a Two-story Steel Moment Frame[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(5): 567-575.
- [6] SUN R R, HUANG Z H, BURGESS I W. Progressive Collapse Analysis of Steel Structures Under Fire Conditions[J]. Engineering Structures, 2012, 34: 400-413.
- [7] SUN R R, HUANG Z H, BURGESS I W. The Collapse Behavior of Braced Steel Frames Exposed to Fire[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 72: 130-142.
- [8] 杜修力, 石磊. 爆炸荷载作用下钢框架结构连续倒塌分析[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(7): 986-993.
- DU Xiu-li, SHI Lei. A Study on Progressive Collapse of Steel-frame Building Under Explosion[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(7): 986-993.
- [9] 王来, 邱婧, 马洋. 基于组合楼板影响的空间钢框架连续倒塌分析[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2014, 33(4): 50-57.
- WANG Lai, QIU Jing, MA Yang. Progressive Collapse Analysis of Space Steel Frames Considering the Influence of Composite Floor Slab[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2013, 34, 33(4): 50-57.
- [10] 姜健, ASIF U, 李国强. 基于 OpenSees 的火灾下钢结构连续性倒塌分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(1): 1-5.
- JIANG Jian, ASIF U, LI Guo-qiang. Progressive Collapse Analysis of Steel Structures in Fire Using Open Sees[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(1): 1-5.
- [11] 姜健, 李国强. 支撑布置对火灾下钢框架结构抗连续性倒塌性能影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(3): 394-398.
- JIANG Jian, LI Guo-qiang. Influence of Bracing Systems on the Fire Resistance of Steel Frames Against Progressive Collapse[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(3): 394-398.
- [12] 史奉伟, 王来, 董硕. 基于楼板薄膜效应的钢框架抗连续倒塌研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(3): 113-118.
- SHI Feng-wei, WANG Lai, DONG Shuo. Progressive Collapse Analysis of Steel Frame Structure Based on Membrane Action of Composite Floor Slabs[J]. Industrial Construction, 2016, 46(3): 113-118.
- [13] 谢甫哲, 舒赣平. 平面钢框架结构抗倒塌动力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(12): 144-152.
- XIE Fu-zhe, SHU Gan-ping. Dynamic Experiment on Collapse-resistant Behavior of Plane Steel Frame Structure[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(12): 144-152.
- [14] 黄修峰. 火灾下钢结构整体稳定性的评价标准[J]. 山西建筑, 2017, 43(11): 42-44.
- HUANG Xiu-feng. The Evaluation Standard of Steel Structures Overall Stability Under Fire[J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(11): 42-44.
- [15] 张建兴. 多层钢框架连续倒塌性能和设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- ZHANG Jian-xing. Progressive Collapse Behaviour and Design Method of Multi-story Steel Frames[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [16] 吕宝良. 火灾情况下钢框架抗连续倒塌性能分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- LU Bao-liang. Case of Fire Resistance to Progressive Collapse of Steel Frame Performance Analysis[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [17] ISO TC 92/SC2/WG1. Draft of Proposed Revision to ISO 834[S].
- [18] LI L, CHEN Y Y, WANG W, et al. Effect of Beam Web Bolt Arrangement on Catenary Behavior of Moment Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 104: 22-36.
- [19] 黄晨. 空间钢框架连续倒塌破坏机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
- HUANG Chen. Study on Structure Progressive Collapse Mechanism of Space Steel Frame[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014.
- [20] UFC 4-023-03. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse[S].