

文章编号:1673-2049(2014)02-0065-06

基于静-动力转换分析方法的火灾引起钢结构连续倒塌性能研究

陈适才^{1,2}, 田相凯¹, 张磊¹, 闫维明^{1,2}

(1. 北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124;
2. 北京工业大学 城市与工程安全防灾减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:为研究火灾引起多高层钢结构连续性倒塌的破坏机理以及多高层钢结构在火灾作用下的初始破坏规律,基于 ABAQUS 预定义场和重启动功能,建立了局部火灾引起多高层钢结构连续倒塌分析的静-动力转换分析方法,运用此分析方法模拟了局部火灾作用下钢结构的破坏过程,重点研究了柱破坏引起多高层钢结构倒塌的初始破坏机理,分析了受火柱约束刚度比和荷载水平对火灾作用下钢结构初始破坏以及对整体结构产生动力效应的影响规律。研究结果表明:静-动力转换分析方法具有可行性;初始破坏的动力放大系数在 1.2~1.5 之间。

关键词:钢结构;火灾反应;连续倒塌;静-动力转换分析方法;显式动力分析;动力放大系数

中图分类号:TU312 **文献标志码:**A

Research on Fire Induced Progressive Collapse of Steel Frame Structures Based on Static-dynamic Conversion Analysis Methods

CHEN Shi-cai^{1,2}, TIAN Xiang-kai¹, ZHANG Lei¹, YAN Wei-ming^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To investigate the progressive collapse mechanism and the initial failure rule of multi-story steel structures under fire conditions, the static-dynamic conversion analysis method was developed based on the predefined field and restart function of ABAQUS. Applying this static-dynamic analysis method, the failure process of a steel structure under local fire was simulated and the initial damage mechanism of multi-story steel structures caused by the damage of column was studied. The influence of restraint stiffness ratio and load level to the initial damage mechanism of steel structures under fire conditions and dynamic effect of the whole structures was analyzed. The study results show that the static-dynamic conversion analysis method is feasible and the dynamic amplification coefficient of the column initial damage lies from 1.2 to 1.5.

Key words: steel structure; fire response; progressive collapse; static-dynamic conversion analysis method; explicit dynamic analysis; dynamic magnification coefficient

收稿日期:2013-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(50908006,51278516);中国博士后科学基金项目(2013M540030)

作者简介:陈适才(1979-),男,湖北黄石人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:csc@bjut.edu.cn。

0 引言

一些钢结构火灾破坏甚至倒塌的实例表明,局部火灾能够造成整体结构的连续性倒塌,因此钢结构耐火性能及抗倒塌性能是钢结构设计中需要重点考虑的问题。目前对于结构抗连续性倒塌设计分析^[1-2],主要利用各种分析方法对结构中的重要构件分别进行拆除,来分析结构在各种非常规灾害荷载下的构件破坏引起剩余结构的非比例破坏的倒塌性能,分析时统一采取拆除法而不需要考虑非常规荷载特性以及初始破坏构件的类型^[3-4],因此,一些研究者开展了具体非常规灾害荷载下的结构抗倒塌性能研究,如 Lynn 等^[5]进行了爆炸荷载作用下框架结构的连续倒塌性能分析,李国强等^[6]建立了用于爆炸冲击分析的框架柱模型进行结构反应分析, Sun 等^[7]通过自开发程序建立纤维模型单元进行火灾作用下钢结构的连续倒塌性能分析。

火灾荷载引起结构的破坏与爆炸或冲击荷载不同,首先火灾荷载引起结构破坏倒塌之前需要经历火灾发生、发展、蔓延等过程,火灾荷载作用于结构上的时间较长;其次由于受火部分与非受火部分的相互作用,结构发生倒塌破坏时,火灾作用下初始破坏构件的初始破坏类型不同,因此,火灾引起结构的连续性倒塌性能分析不仅需要考虑结构倒塌前的火灾特性,还需要考虑具体的初始破坏类型的影响。Wang^[8]和 Shepherd 等^[9]对柱的初始破坏行为的分析表明,钢结构柱在火灾作用下发生破坏过程中会出现屈曲跳跃行为,由于局部构件的突然破坏或屈曲跳跃行为,会对整体结构产生动力效应,从而可能引起结构在达到整体或构件耐火极限前发生破坏,虽然采用静力分析方法可有效分析结构的耐火性能,但是难以考虑初始破坏的动力效应以及后续倒塌动力过程。然而采用全过程动力分析方法时,对结构倒塌前的火灾反应过程需要消耗大量计算资源,所以采取静力和动力联合分析方法来分析此全过程是较为合适的选择。目前的有限元软件(如 ABAQUS)容易实现静力-动力隐式的联合计算,动力隐式积分一般利用下一时刻的平衡求得下一时刻的位移,拟刚度矩阵只集结一次便可多次求解,在弹性、非线性和小塑性、非线性分析中,其分析步长大,求解效率高,但是刚度矩阵求解需要消耗大量的存储空间,在求解高度非线性问题时,需要不断迭代缩小步长,迭代时就需要重组刚度矩阵,计算量很大;而显式计算方法可有效解决结构倒塌的高度非线性

行为,尤其是钢构件火灾作用下的负刚度和非线性屈曲问题^[10-11]。为实现火灾作用下多高层钢结构连续性倒塌的破坏机理分析,本文中笔者基于 ABAQUS 预定义场和重启动功能,建立了局部火灾引起多高层钢结构倒塌分析的静力-显式动力联合转换分析方法,随后运用此分析方法模拟了局部火灾引起钢结构的破坏过程,研究了柱破坏引起多高层钢结构倒塌的初始破坏机理,分析了受火柱约束刚度比和荷载水平对火灾作用下钢结构初始破坏以及对整体结构产生动力效应的影响规律,可为钢结构火灾时抗连续性倒塌分析和设计提供参考依据。

1 静力-显式动力联合转换分析方法

重启动定义为基于前次某工况的分析结果(某分析步的任意增量步),利用不同的计算模块进行重启动接力分析,接力分析时可定义不同的工况和计算方法;预定义场是定义接力分析模型在开始分析时的初始状态。本文中通过对 ABAQUS Standard 计算模块和 ABAQUS Explicit 显式计算模块的相互调用来建立火灾作用下钢结构静力-显式动力联合转换分析方法,其分析流程如图 1 所示。在前次某荷载工况分析时,需要根据要求定义输出结果类型,在重启动分析时需要导入前次分析结果,包括应力、应变、位移以及温度(对于火灾反应分析)。

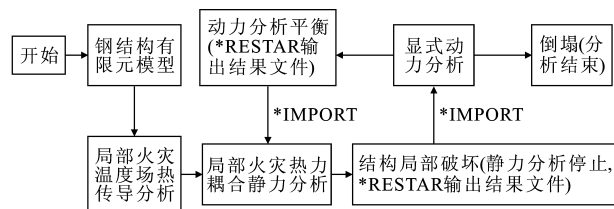


图 1 静力-显式动力联合转换分析流程

Fig. 1 Procedure of Static-explicit Conversion Analysis

为验证上述分析方法的可行性,本文中建立了 3 层钢结构框架模型进行分析,模型采用工字型钢梁、钢柱,结构模型如图 2 所示,梁跨度为 5.2 m,柱高 3.2 m。钢梁、钢柱均采用 HRB235 工字型钢,钢梁型号为 H300×150×8×12,钢柱型号为 H250×250×8×10,根据荷载规范,将楼面荷载转化为均布线荷载,荷载值为 $35 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。为了分析结构构件局部破坏,建立有限元模型时,梁、柱均采用 S4RT 即四节点热力耦合的壳单元。假设该模型中柱受火,火场模型采用 ISO834 标准火灾升温曲线。分析时,首先建立模型,对模型进行热力耦合全过程静力分析,并在模型分析步中定义重启动请求;然后

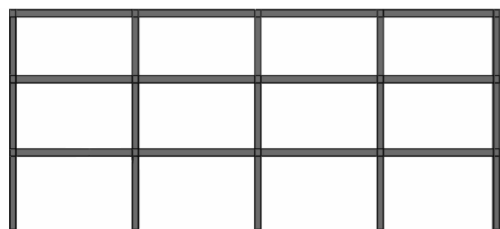


图 2 结构模型

Fig. 2 Structure Model

把中柱突然屈曲增量步处的结构状态作为模型的初始分析状态导入结构模型中,并通过定义显式动力分析工况,利用重启的功能对模型进行显式动力分析。若结构在动力分析中破坏,则分析结束;若结构在动力分析中达到平衡状态,则用相同的方法转换至静力分析状态,继续升温进行热力耦合静力分析,循环往复直至结构破坏或升温完成。图 3 为结构破坏模态。

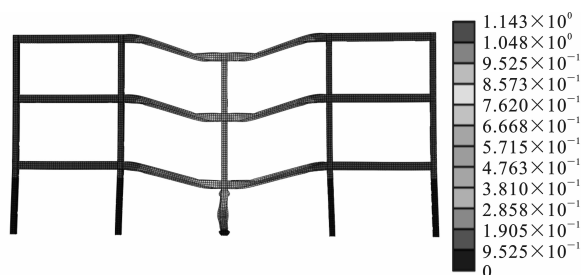


图 3 结构破坏模态

Fig. 3 Failure Mode of Structure

对图 2 中的模型进行热力耦合全过程静力分析时,受火柱的柱顶位移与柱轴力变化对比如图 4,5 所示。由图 4,5 可以看出:① Oa 段,由于受火柱温度升高引起膨胀变形,使柱顶位移和柱轴力增加;② $a-b$ 段,受火柱发生屈曲,上部结构产生竖向位移,柱顶位移和轴力迅速下降,由于结构尚有足够的承载力,所以结构在 b 点重新回到平衡状态;③在 $b-c$ 段,随着温度的升高,柱继续破坏,直到 c 点处,由于柱承载力下降,梁不能承担上部荷载,结构发生倒塌破坏。

由全过程动力分析结果可知,由于受火柱的屈曲,柱顶位移和柱轴力会在短时间内急剧下降,其屈曲失稳是一个动态过程,全过程静力分析难以模拟此动力效应。因此采用本文中的静-动力转换分析方法分析时,将柱开始发生屈曲破坏的增量步处的模型状态作为初始状态导入,利用重启的方法对该状态的结构进行显式动力分析,此时所得柱顶竖向位移和柱轴力变化如图 6,7 所示。由图 6,7 可以看出:轴力和位移在很短的时间内产生突变,而后重

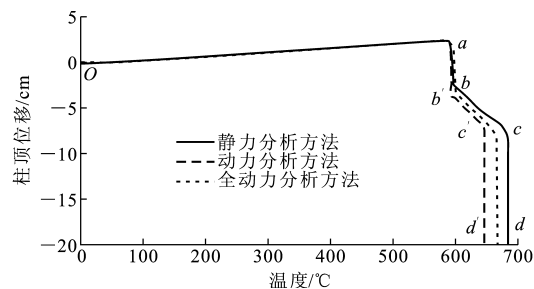


图 4 3 种分析方法的柱顶位移变化对比

Fig. 4 Comparisons of Displacements at Top of Column for Using Three Different Analysis Methods

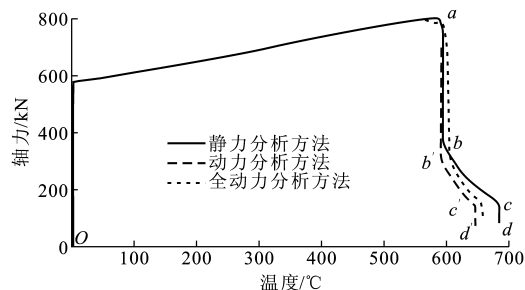


图 5 3 种分析方法的柱轴力变化对比

Fig. 5 Comparisons of Axial Forces of Column for Using Three Different Analysis Methods

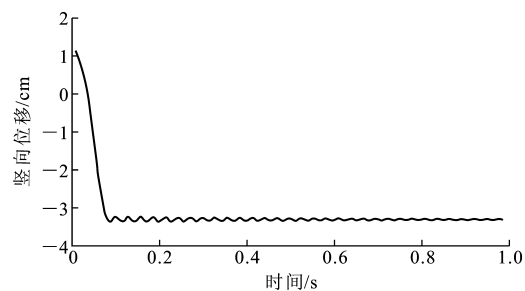


图 6 显式动力分析过程中竖向位移时程曲线

Fig. 6 Time-history Curve of Vertical Displacement Using Explicit Dynamic Analysis Procedure

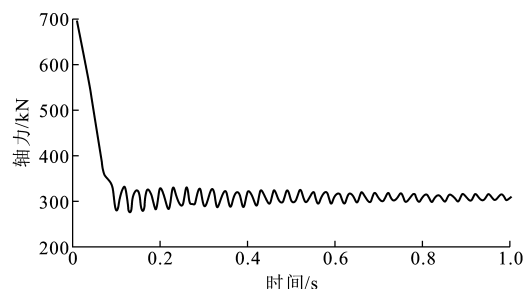


图 7 显式动力分析过程中轴力时程曲线

Fig. 7 Time-history Curve of Axial Force Using Explicit Dynamic Analysis Procedure

新回到平衡状态,该过程即为图 4,5 中的 $a-b'$ 段。在结构达到平衡状态后利用上述转换方法,转换为静力分析过程,继续进行热力耦合静力分析,其分析

过程为图 4,5 中的 $b'-c'$ 段。随着温度继续升高,柱进一步破坏,再次转换至动力分析状态,在动力分析中结构发生倒塌破坏,如图 4,5 中的 $c'-d'$ 段。由以上分析可知,在图 4,5 中,受火柱屈曲前的阶段,3 种方法分析结果基本相同,受火柱屈曲后的阶段,不同的分析方法得到的结构反应有一定差别,如全动力分析方法计算得到的结构破坏温度为 $660\text{ }^{\circ}\text{C}$,静力分析方法计算所得结构破坏温度为 $685\text{ }^{\circ}\text{C}$,静-动力转换分析方法计算得到的结构破坏温度为 $647\text{ }^{\circ}\text{C}$,静-动力转换分析方法与动力分析方法的结果考虑了动力效应,与实际情况更加接近,而本文中的静-动力转换分析方法可以明显节省计算时间,计算效率较高。

2 倒塌破坏参数的影响分析

2.1 荷载水平对结构倒塌破坏的影响

为了研究荷载水平对结构抗倒塌性能的影响,通过在柱顶施加竖向荷载,调整受火柱的轴压比 u ,利用 2 种分析方法分别对结构的破坏过程进行分析,其中, $u=0.3, 0.35, 0.4$ 下的柱顶位移-温度变化曲线如图 8 所示。

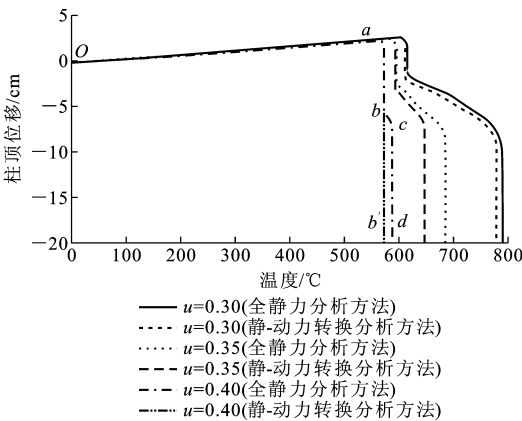


图 8 不同轴压比下的位移-温度变化曲线

上部荷载而直接发生倒塌破坏,其破坏曲线类型为 $Oa-b'$,定义这种破坏形式为破坏形式 2。显然,破坏形式 2 是在较低温度下的结构突然倒塌破坏,更具突然性和破坏性,是在结构设计中应当尽量避免的破坏形式。

表 1 为不同轴压比下的结构破坏温度与破坏形式,图 9 为极限温度-轴压比关系曲线。由表 1 和图 9 可知,当轴压比较小时($u<0.3$),结构没有发生破坏,2 种方法分析结果较为接近。随着轴压比的增大($0.3<u\leq 0.4$),结构会发生破坏形式 1 的倒塌破坏,而在该区间内由 2 种分析方法所得结构的破坏温度有差别,甚至有可能得到 2 种不同的破坏形式,如 $u=0.4$ 时,2 种分析方法得到的结构破坏形式分别为破坏形式 1 和破坏形式 2。当轴压比继续增大时($u>0.4$),由于荷载太大,结构在 2 种分析方法下均发生破坏形式 2 的突然破坏,此时,由于 2 种分析方法都能在初始破坏时反映其破坏情况,故其计算所得极限温度差别又趋向于变小。

表 1 不同轴压比下的结构破坏温度与破坏形式

轴压比	全静力分析方法		静-动力转换分析方法	
	破坏温度/ $^{\circ}\text{C}$	破坏形式	破坏温度/ $^{\circ}\text{C}$	破坏形式
0.30	790	1	785	1
0.33	729	1	707	1
0.35	685	1	647	1
0.38	628	1	600	1
0.40	587	1	573	1
0.42	563	2	563	2

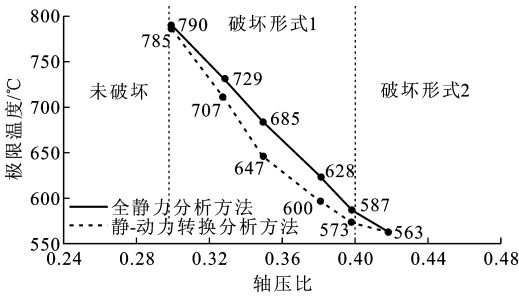


图 9 极限温度-轴压比关系曲线

Fig. 9 Relation Curves of Ultimate Temperature-axial Compression Ratio

2.2 不同约束刚度比下的结构倒塌性能

为分析约束刚度比对结构倒塌性能的影响,针对模型 1,固定其轴压比 $u=0.4$,通过改变梁的截面尺寸,调整受火柱轴向约束刚度比,使约束刚度比 $\rho=0.02, 0.025, 0.03, 0.035, 0.04$,进一步用 2 种分

由图 8 可以看出,结构在不同轴压比下,破坏过程有显著的区别,并且在相同轴压比下考虑动力效应后的结果也存在差别。一般来说,在受火柱屈曲后,柱仍能发挥屈曲后的承载力,随着温度的升高,柱逐步丧失承载力,直到由于柱承载力下降,梁不能承担上部荷载而发生结构倒塌破坏,其破坏曲线类型为 $Oa-b-c-d$,定义这种破坏形式为破坏形式 1。当轴压比增大时($u=0.4$),其静-动力转换分析方法分析结果为:在受火柱发生屈曲后,由于梁不能承担

析方法对各模型进行分析。图 10 中给出了约束刚度比 $\rho=0.02, 0.03, 0.04$ 时的位移-温度变化曲线。由图 10 可知,2 种分析方法得到的结构变形规律相似。当约束刚度比较小($\rho=0.02$)而受火柱屈曲破坏时,结构立即发生倒塌破坏,结构的破坏形式为破坏形式 2;随着约束刚度比的增大($\rho=0.03$),受火柱屈曲后,结构没有立即发生倒塌,由于存在动力效应,使得变形曲线偏离静力分析结果,随着温度的升高再发生破坏形式 1 的结构倒塌;随着约束刚度比($\rho=0.04$)继续增大,上部结构未使整体结构发生倒塌,两者变形曲线比较吻合。

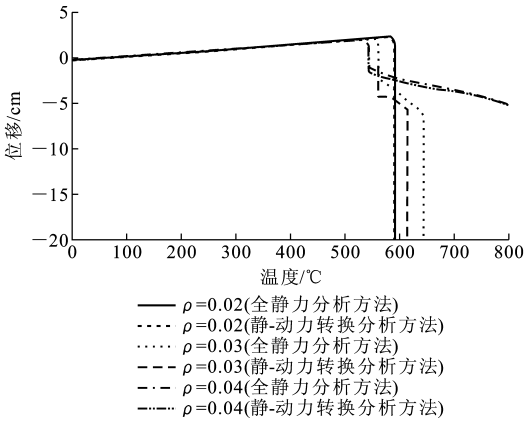


图 10 不同约束刚度比下的位移-温度变化曲线
Fig. 10 Variation Curves of Displacement-temperature Under Different Restraint Stiffness Ratios

图 11 为极限温度-约束刚度比关系曲线,表 2 为不同约束刚度比下的结构破坏温度与破坏形式。当约束刚度比 $\rho \leq 0.02$ 时,由于结构承载力较小,结构在 2 种分析方法下均发生破坏形式 2 的突然破坏,此时,由于 2 种分析方法都能在初始破坏时反映其破坏情况,故其计算所得极限温度差别很小。当 $0.02 < \rho < 0.04$ 时,随着约束刚度比的增大,结构破坏温度有所差别,并且由于破坏过程中的动力效应使得结构破坏温度低于静力的分析结果。同时,随着约束刚度比的继续增大,结构越趋向于安全,2 种分析方法所得到的结构破坏温度差别会变小。

上述分析表明,荷载水平和约束刚度比影响结构的破坏类型与破坏极限温度,如果将受火柱屈曲时上部结构的状态分为弹性状态、弹塑性屈服状态和进入大变形破坏 3 种状态,根据以上数值分析结果,在弹性状态时,动力效应对上部结构和受火柱影响较小,另外,在大变形破坏状态时,受火柱屈曲后结构直接进入倒塌破坏阶段,结构的破坏极限温度也比较接近,因此可以采用静力分析结果。而在约

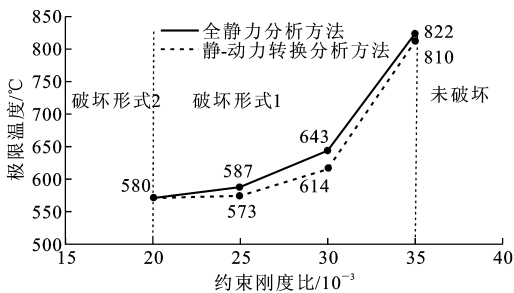


图 11 极限温度-约束刚度比关系曲线
Fig. 11 Relation Curves of Ultimate Temperature-restraint Stiffness Ratios

表 2 不同约束刚度比下的结构破坏温度与破坏形式

Tab. 2 Structural Damage Temperatures and Failure Forms Under Different Restraint Stiffness Ratios

约束刚度比	全静力分析方法		静-动力转换分析方法	
	破坏温度/℃	破坏形式	破坏温度/℃	破坏形式
0.020	580	2	580	2
0.025	587	1	573	1
0.030	643	1	614	1
0.035	822	1	810	1
0.040		未破坏		未破坏

束刚度比 $\rho=0.02$ 、轴压比 $u=0.3 \sim 0.4$ 阶段,或在轴压比 $u=0.4$ 、约束刚度比 $\rho=0.02 \sim 0.04$ 阶段,在受火柱屈曲后,上部结构都进入弹塑性屈服状态,此时屈曲动力效应导致上部结构和受火柱更大损伤,从而降低其耐火极限,所以弹塑性屈服状态范围内,考虑动力效应影响后,结构的破坏极限温度低于静力分析的结果。

3 柱初始破坏对结构产生的动力效应

由上述分析可知,火灾作用下柱突然屈曲的局部破坏会对上部结构产生动力效应,该动力效应不仅对受火柱的反应与破坏产生影响,同时对上部结构也产生影响,甚至改变结构的破坏类型。为了进一步分析其影响,本文中采用动力放大系数进行分析。由于结构的弹塑性影响,柱顶位移与柱轴力相比,更能直观反映整体结构的动力反应,故以柱顶位移变化量来定义动力放大系数 k ,即

$$k = \frac{u_1 - u_2}{s_1 - s_2}$$

式中: s_1, s_2 分别为在静力分析过程中柱开始发生屈曲破坏和屈曲结束后的位移; u_1, u_2 分别为在静-动力转换分析过程中柱开始发生屈曲破坏和屈曲结束后的位移。

由于在静-动力转换分析过程中,柱开始屈曲的

瞬时仍处于静力分析过程末尾,所以 $u_1=s_1$ 。

3.1 不同荷载水平下的动力效应分析

在第 2.1 节中分别用 2 种方法对同一结构(约束刚度比 $\rho=0.025$)在不同轴压比下的动力放大系数进行了分析,其结果如表 3 所示。由表 3 可知:随着轴压比的增大,结构的动力放大系数有增大趋势,当轴压比为 0.28 时,动力放大系数较小,为 1.24;当轴压比为 0.3 时,动力放大系数增大到 1.31,随后动力放大系数缓慢增大到 1.36,直至轴压比为 0.4 时结构发生倒塌破坏。由此可见,当轴压比较小时,结构动力效应较小,随着轴压比的增大,动力放大系数增大,但是仍保持在 1.3 左右。

表 3 不同轴压比下的动力放大系数

Tab. 3 Dynamic Magnification Coefficients Under Different Axial Compression Ratios

轴压比	s_1/m	s_2/m	u_1/m	u_2/m	k
0.28	0.013 6	-0.010 0	0.013 6	-0.015 7	1.24
0.30	0.013 2	-0.013 3	0.013 2	-0.021 5	1.31
0.33	0.011 3	-0.020 0	0.011 3	-0.030 6	1.34
0.35	0.010 7	-0.025 7	0.010 7	-0.038 7	1.36
0.38	0.010 0	-0.035 3	0.010 0	-0.052 1	1.37
0.40	0.009 5	-0.056 8	0.009 5		

3.2 不同约束刚度比下的结构动力效应分析

在第 2.2 节中分别用 2 种方法对同一轴压比($u=0.4$)状态下,约束刚度比 $\rho=0.02\sim0.04$ 的结构进行了分析,其结果如表 4 所示。由表 4 可知:随着约束刚度比的减小,结构的动力效应越明显,当结构约束刚度比不足时,结构会在初始破坏时直接倒塌;当约束刚度比较大时($\rho=0.04$),结构的动力放大系数 $k=1.21$;当约束刚度比减小到 0.03 时,结构的动力放大系数增大到 1.57,随后结构发生倒塌破坏。由此可见,结构动力效应随着约束刚度比的减小而急剧增大,约束刚度比相对轴压比对火灾作用下结构破坏时的动力效应影响更大。

表 4 不同约束刚度比下的动力放大系数

Tab. 4 Dynamic Magnification Coefficients Under Different Restraint Stiffness Ratios

约束刚度比	s_1/m	s_2/m	u_1/m	u_2/m	k
0.020	0.012 4		0.012 4		
0.025	0.009 5	-0.056 8	0.009 5		
0.030	0.012 1	-0.023 5	0.012 1	-0.044 0	1.57
0.035	0.010 5	-0.014 4	0.010 5	-0.025 3	1.44
0.040	0.007 5	-0.010 7	0.007 5	-0.014 5	1.21

在美国规范 DOD 2009 抗连续性倒塌设计规范中,推荐了利用拆除构件法验算结构在柱因爆炸、撞

击等作用下突然失效后结构的抗倒塌性能,在该设计规范中规定,按照一定规则拆除结构中的竖向承重构件,计算剩余结构的抗倒塌能力。根据美国规范 DOD 2009 中规定,其拆除柱的上部位移和相邻柱的轴力以及上部梁轴力和弯矩突变约为拆除构件前的 2 倍,即其动力放大系数 k 约为 2。由于拆除构件法分析时,结构的初始破坏不考虑非常规荷载特性以及初始破坏构件的类型,因此,当用于分析火灾作用下结构抗倒塌性能时,其计算结果偏于保守,而完全采用静力分析方法不考虑其动力效应时,在某些特殊情况下,会偏于不安全。

4 结 语

(1)笔者建立的基于 ABAQUS 的静-显式动力转换分析方法可以有效应用于火灾引起结构的倒塌性能分析,不仅可以提高火灾反应计算效率,还可以解决火灾反应中结构的局部非线性屈曲和负刚度问题。

(2)在结构火灾反应中,受火柱在发生局部屈曲失稳破坏时,会对整体结构产生动力效应,在一定的范围内,会改变结构的破坏形态以及降低结构的破坏极限温度。

(3)火灾作用下结构的动力效应随着结构的约束刚度比及轴压比的变化而变化。在一定的范围内,结构的动力效应随着轴压比的增大而增大,或随着约束刚度比的减小而增大,根据本文中的分析结果可知,采用位移表示的动力放大系数在 1.2~1.5 之间。

(4)钢结构火灾作用下抗倒塌性能分析时,直接拆除构件法会偏于保守,需要考虑火灾荷载的特性以及初始破坏类型,才能精确分析其倒塌性能。

参考文献:

References:

[1] GSA 2003, Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects[S].

[2] KAPIL K, EL-TAWIL S, FAHIM S. Progressive Collapse Analysis of Seismically Designed Steel Braced Frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(3): 699-708.

[3] KWASNIEWSKI L. Nonlinear Dynamic Simulations of Progressive Collapse for a Multistory Building[J]. Engineering Structures, 2010, 32(5): 1223-1235.

- Simulation of Complex Cohesive Fracture in Random Heterogeneous Quasi-brittle Materials [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(17): 3222-3234.
- [9] SU X T, YANG Z J, LIU G H. Monte Carlo Simulation of Complex Cohesive Fracture in Random Heterogeneous Quasi-brittle Materials: a 3D Study [J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(17): 2336-2345.
- [10] 丁发兴, 余志武, 欧进萍. 混凝土单轴受力损伤本构模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 70-73.
- DING Fa-xing, YU Zhi-wu, OU Jin-ping. Damage Constitutive Model for Concrete Under Uniaxial Stress Conditions [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 70-73.
- [11] 郑木莲, 陈拴发, 王崇涛. 多孔混凝土的强度特性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(4): 20-25.
- ZHENG Mu-lian, CHEN Shuan-fa, WANG Chong-tao. Strength Character of Porous Concrete [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(4): 20-25.
- [12] 孟江, 赵宝俊, 刘建梅. 混凝土收缩徐变效应预测模型及影响因素[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(2): 56-62.
- MENG Jiang, ZHAO Bao-jun, LIU Jian-mei. Prediction Model and Influencing Factors for Concrete Shrinkage and Creep Effects [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(2): 56-62.
- [13] 李新忠, 魏雪英, 赵均海. 混凝土力学性能的应变率效应[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(2): 82-86.
- LI Xin-zhong, WEI Xue-ying, ZHAO Jun-hai. Strain Rate Effect on Mechanical Properties of Concrete [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(2): 82-86.
- [14] WALARAVEN J C, REINHARDT H W. Theory and Experiments on the Mechanical Behavior of Cracks in Plain and Reinforced Concrete Subjected to Shear Loading [J]. Heron, 1981, 26(1A): 23-33.
- [15] SL 352—2006, 水工混凝土试验规程[S].
- SL 352—2006, Test Code for Hydraulic Concrete [S].
- [16] 邓宗才. 高性能大坝混凝土的强度与变形[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- DENG Zong-cai. Strength and Deformation of High Performance Dam Concrete [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- ~~~~~
- (上接第 70 页)
- [4] 陆新征, 李易, 叶列平. 混凝土结构防连续倒塌理论与设计方法研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- LU Xin-zheng, LI Yi, YE Lie-ping. Theory and Design Method for Progressive Collapse Prevention of Concrete Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [5] LYNN K M, ISOBE D. Structural Collapse Analysis of Framed Structures Under Impact Loads Using ASI-Gauss Finite Element Method [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(9): 150-160.
- [6] 李国强, 孙建运, 王开强. 爆炸冲击荷载作用下框架柱简化分析模型研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(1): 8-11, 20.
- LI Guo-qiang, SUN Jian-yun, WANG Kai-qiang. Research on a Simplified Frame Column Model to Resist Blast Load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(1): 8-11, 20.
- [7] SUN R, HUANG Z, BUGRESS I W. Progressive Collapse Analysis of Steel Structures Under Fire Conditions [J]. Engineering Structures, 2012, 34: 400-413.
- [8] WANG Y C. Postbuckling Behavior of Axially Restrained and Axially Loaded Steel Columns Under Fire Conditions [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(3): 371-380.
- [9] SHEPHERDA P G, BURGESS I W. On the Buckling of Axially Restrained Steel Columns in Fire [J]. Engineering Structures, 2011, 33(10): 2832-2838.
- [10] 高山, 魏民, 徐嫚. 支撑钢框架中关键柱破坏后结构抗倒塌性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(1): 66-73.
- GAO Shan, WEI Min, XU Man. Performance Analysis of Structural Resist Progressive Collapse of Braced Steel Frames After Destruction of Key Column [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(1): 66-73.
- [11] 黄华, 刘伯权, 吴涛, 等. 结构工程抗倒塌设计研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(1): 27-37.
- HUANG Hua, LIU Bo-quan, WU Tao, et al. Overview of Research on Collapse-resistant Design in Structure Engineering [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(1): 27-37.