

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220411003

考虑约束作用的混凝土柱耐火试验加载方式研究*

施涵远¹, 蔡新江^{1,2}, 毛小勇^{1,2}, 陈鑫^{1,2}, 田石柱^{1,2}

(1. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011;

2. 苏州科技大学江苏省结构工程重点实验室, 江苏 苏州 215011)

摘要: 为找到一种在构件耐火试验中能有效考虑整体结构对受火构件约束作用的加载方式, 建立了2层2跨的钢筋混凝土框架和受火单柱的有限元模型, 对比分析荷载比为0.2、0.4和0.6时, 恒载、变位移加载、变力加载和交互加载方式下受火单柱与整体结构的内力、变形和耐火极限的差异。研究表明: 恒载单柱不能准确反映整体结构受火柱的变形、轴力和耐火极限; 变位移加载和变力加载在荷载比为0.2时能较好考虑整体结构中的约束作用, 在荷载比为0.4和0.6时误差增大也不能准确反映整体结构的抗火性能; 交互加载的相对误差随荷载比增大而增大, 且最大误差小于20%。恒载、变位移加载、变力加载和交互加载中, 交互加载可以较好考虑整体结构中的约束作用, 近似达到整体结构试验的效果。

关键词: 钢筋混凝土框架; 结构抗火; 试验方法; 构件试验; 加载方法

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0202-08

Study on Loading Method of Fire Test for Reinforced Concrete Frame Column Considering Constraint

SHI Hanyuan¹, CAI Xinjiang^{1,2}, MAO Xiaoyong^{1,2}, CHEN Xin^{1,2}, TIAN Shizhu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Structural Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: In order to find a loading method that can effectively consider the constraint of the whole structure in the component fire resistance test, the finite element models of a two-story two-span reinforced concrete frame and a single column subjected to fire were established. The differences in internal force, deformation and fire resistance limit between the single column and the whole structure under constant loading, variable displacement loading, variable force loading and interactive loading were compared and analyzed when the load ratios are 0.2, 0.4 and 0.6. The results show that the single column under constant load cannot accurately reflect the deformation, axial force and fire resistance limit of the overall structure. The constraint in the whole structure can be considered by variable displacement loading and variable force loading when the load ratio is 0.2. The fire resistance of the whole structure cannot be performed accurately with an increasing error when the load ratio is 0.4 and

* 收稿日期:2022-04-11;修回日期:2022-06-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51778395)、江苏高校“青蓝工程”(2018)、江苏省“333工程”(2018)、江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX22_3286)资助

作者简介:施涵远(1998—),男,硕士。主要从事结构抗火研究。E-mail: hanyuanshi0936@163.com

通讯作者:蔡新江(1981—),男,副教授,博士。主要从事结构抗火研究。E-mail: caixinjiang77@126.com

0.6. The relative error under interactive loading increases with the increase of load ratio and the maximum error is less than 20%. Among the constant loading, variable displacement loading, variable force loading and interactive loading, the constraint in the whole structure can be better considered by interactive loading, approximately achieving the effect of the whole structure test.

Keywords: reinforced concrete frame; fire resistance of structures; testing method; component testing; loading method

0 引言

火灾作用下,整体结构中受火构件的热膨胀变形会受到周围构件的约束作用,这种约束作用会使受火构件产生附加内力。构件标准耐火试验是目前最常见的火灾试验方法,通常采用恒载升温的方式,但试验中一般未能考虑整体结构中的约束作用,所得受火构件的耐火性能与整体结构中受到约束作用的受火构件存在一定差异。在构件耐火试验中适当考虑约束作用的影响,调整边界条件,预期以常规的试验设备、较低的试验成本反映整体结构中受到约束作用的受火构件的耐火性能,具有一定的研究价值。

目前,各国学者开展了考虑约束作用的构件耐火试验,其中大部分均通过增加约束构件的方式来考虑约束作用对构件耐火性能的影响。徐玉野、吴波等^[1-4]通过对混凝土异形柱的火灾数值模拟和明火试验,探究了轴向约束和转动约束对L形柱、T形柱、十字形柱和矩形柱的高温力学反应的影响,影响参数包括轴压比、约束刚度比和荷载偏心率,研究发现:轴向约束和转动约束会对钢筋混凝土柱的耐火性能产生影响,且轴压比、约束刚度比和荷载偏心率不同时影响规律存在一定差异。K.H.Tan等^[5]对混凝土柱进行了高温和常温的受压试验,发现约束与非约束情况下破坏模式有差异。王冠等^[6]开展了约束高强混凝土柱明火试验,发现由于轴向约束而产生的附加轴力对高强混凝土柱的爆裂时间有一定影响。郑蝉蝉等通过对受约束型钢混凝土柱^[7]和型钢高强混凝土柱^[8]的有限元分析结果表明:对于型钢混凝土柱,在一定条件下轴向约束和转动约束是有益的,能够提高其耐火极限;对于型钢高强混凝土柱,由于混凝土爆裂的影响,轴向约束和转动约束对耐火极限的影响较小。李国强等针对钢梁^[9]、组合梁^[10]和高强钢柱^[11-12]受约束下的高

温力学性能分别进行了研究,发现约束构件高温下产生的附加内力会对其承载力产生较大影响。C. Couto等^[13]研究了高温下横向约束钢梁的局部屈曲问题,并提出了对欧洲规范中火灾下钢梁局部屈曲问题的设计修改建议。

部分学者通过调整加载方式来考虑不同的约束作用。陈俊等^[14]进行了混凝土轴压短柱在恒定荷载和恒定刚度两种约束情况下的火灾试验,研究发现:混凝土轴压短柱受到恒定刚度约束时的耐火极限会小于受到恒定荷载时。

综上所述,本文从加载方式出发,通过调整试验构件的边界条件来考虑整体结构中周围构件对其约束作用,以两层两跨钢筋混凝土框架模型作为基准,对比分析受火约束柱在恒载、变位移加载、变力加载和交互加载情况下的变形、内力及耐火极限与整体结构中受火柱的差异,找到一种能较好考虑整体结构中约束作用的受火单柱加载方式,为约束构件火灾试验提供参考。

1 框架模型及加载工况

1.1 几何尺寸及材料高温本构

框架层高为3.9 m,跨长为5.4 m,采用C30混凝土、HRB400纵筋和HRB335箍筋,截面配筋详情见表1。

表1 梁柱配筋表

Table 1 Beam and column reinforcement

构件	截面尺寸/mm	纵筋	箍筋	保护层厚度/mm
柱	300×300	4C20	B10@150	30
梁	200×450	4C20	B10@200	30

钢筋热工参数采用欧洲规范EC2^[15]中给出的不考虑温度影响的简化计算形式,即热膨胀系数为 $1.4 \times 10^{-5} \text{ m}/(\text{m} \cdot \text{C})$,热传导系数为 $45 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{C})$,比热容为 $600 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{C})$ 。考虑到混凝土的含水率

对温度场存在较大影响,因此采用 T.T.Lie 等^[16-17]给出的考虑含水率和温度影响的热工参数,见公式(1)~(5)。

$$\lambda_c = \begin{cases} 1.355 & 0^\circ\text{C} < T \leq 293^\circ\text{C} \\ -0.001241T + 1.7162 & T > 293^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

$$\rho_c c_c = \begin{cases} 2.566 \times 10^6 & 0^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\ (0.1765T - 68.034) \times 10^6 & 400^\circ\text{C} < T \leq 410^\circ\text{C} \\ (-0.05043T + 25.00671) \times 10^6 & 410^\circ\text{C} < T \leq 445^\circ\text{C} \\ 2.566 \times 10^6 & 445^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C} \\ (0.01603T - 5.44881) \times 10^6 & 500^\circ\text{C} < T \leq 635^\circ\text{C} \\ (0.16635T - 100.90225) \times 10^6 & 635^\circ\text{C} < T \leq 715^\circ\text{C} \\ (-0.22103T + 176.07343) \times 10^6 & 715^\circ\text{C} < T \leq 785^\circ\text{C} \\ 2.566 \times 10^6 & T > 785^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho'_c c'_c = \begin{cases} 0.95\rho_c c_c + 0.05\rho_w c_w & T < 100^\circ\text{C} \\ \rho_w c_w & T \geq 100^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

$$\rho_w c_w = 4.2 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (4)$$

$$\alpha_c = (0.008T + 6) \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中, λ_c 为热传导系数,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ_c 和 c_c 分别为不考虑含水率的混凝土的容重和比热; ρ'_c 和 c'_c 分别为含水率 5% 时混凝土的容重和比热; ρ_w 和 c_w 分别为水的容重和比热; $\rho_c c_c$ 、 $\rho'_c c'_c$ 和 $\rho_w c_w$ 的单位为 $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; α_c 为混凝土的热膨胀系数,单位为 $\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

钢筋采用欧洲规范 EC2^[15]中给出的考虑强化和破坏阶段的应力应变曲线及对应的强度与刚度高温劣化表格,混凝土采用姚亚雄等^[18]提出的考虑常温下弹性模量的应力应变曲线及对应的强度与刚度高温劣化公式,见公式(6)~(9)。

$$\sigma = \begin{cases} \frac{E_{c,T}\epsilon}{(1 - \epsilon/\epsilon_{0,T})^2 + E_{0,T}\epsilon/f_{c,T}} & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{0,T} \\ f_{c,T}(1.3 - 0.3\epsilon/\epsilon_{0,T}) & \epsilon > \epsilon_{0,T} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{c,T} = \begin{cases} f_c & 0^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\ 1.76 - 0.0019T & 400^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (7)$$

$$E_{c,T} = (1 - 0.00094T)E_c \quad (8)$$

$$\epsilon_{0,T} = (1 + 0.0018T)\epsilon_0 \quad (9)$$

式中, σ 和 ϵ 分别为应力和应变; $E_{c,T}$ 和 E_c 分别为温度 T 和常温下的混凝土弹性模量; $f_{c,T}$ 和 f_c 分别为温度 T 和常温下的混凝土棱柱体强度; $\epsilon_{0,T}$ 和 ϵ_0 分别为温度 T 和常温下的混凝土峰值压应变

1.2 加载工况

(1) 整体结构(基准)

框架底层柱的柱底为固定端约束,并在节点处限制平面外的位移和转动。底层中柱为受火柱,按照 ISO834 升温曲线对其四面施加热辐射和热对流

边界条件。框架梁上施加 20 kN/m 的均布荷载,顶层柱的柱顶施加集中荷载。荷载比为 0.2、0.4 和 0.6 时,荷载大小分别为 144、492、840 kN。

(2) 受火单柱

单柱在柱顶和柱底增设刚性垫层,模拟真实试验加载情况。在两端刚性层施加固定端约束,其中柱顶边界条件中放松竖向位移约束用于加载。恒载单柱在柱顶施加恒定轴力,荷载比为 0.2、0.4 和 0.6 时轴力大小分别为 348、696、1 044 kN。变位移加载以整体结构中受火柱柱顶截面中心位置的竖向位移作为边界条件对受火单柱进行加载。变力加载以整体结构中受火柱柱顶截面的竖向轴力作为边界条件对受火单柱进行加载。交互加载为混合试验加载方法,以受火单柱为试验子结构,整体结构中除受火单柱外的区域为数值子结构。二者每间隔 10 min 进行一次交互,将试验子结构的柱顶竖向位移施加至数值子结构,将数值子结构交互截面轴力反馈回试验子结构,子结构模型如图 1 所示。

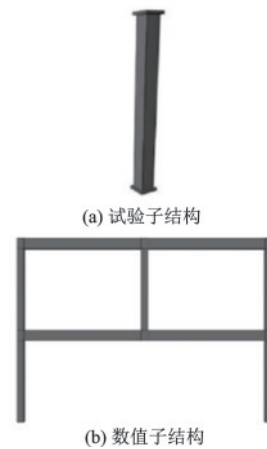


图 1 子结构模型

Fig.1 Sub-structure model

2 结果对比分析

2.1 恒载单柱

荷载比为0.4和0.6时,整体结构受火柱和恒载单柱的柱顶竖向位移随时间变化趋势较为接近,荷载比为0.2时,二者相差较大。荷载比为0.2、0.4和0.6时,整体结构的耐火极限分别为298、140、61 min,恒载单柱的耐火极限分别为427、163、76 min,二者耐火极限的差值分别为129、23、15 min,相对误差分别为43.3%、16.4%和24.6%,柱顶轴力最大差值分别为130 kN、73 kN和36 kN,即荷载比越小产生的附加轴力越大,如图2所示。

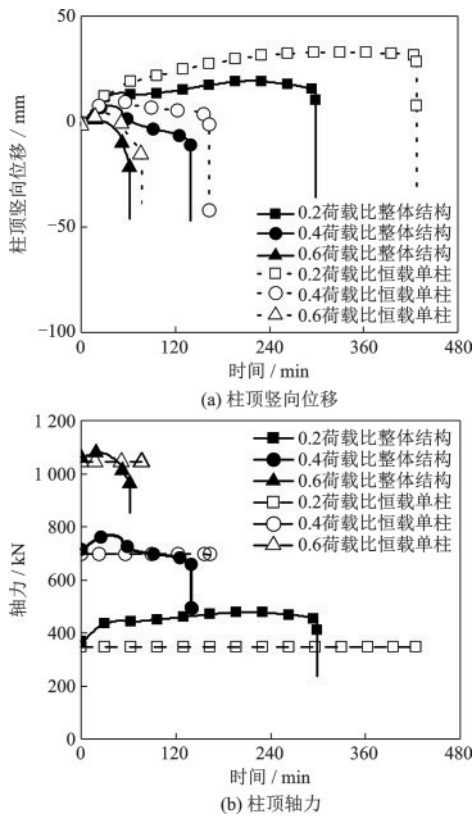


图2 恒载单柱及整体结构变形和内力
Fig.2 Deformation and internal force of the single column and the whole structure under constant loading

不同荷载比作用下受火柱的破坏模式主要分为两种:第一种为升温后强度退化导致的“承载力不足”,第二种为升温后刚度退化导致的“失稳”。破坏模式的判定标准是达到耐火极限时,受火柱的竖向变形是否沿横截面均匀分布。荷载比为0.2时,整体结构为承载力不足破坏,恒载单柱为失稳

破坏;荷载比为0.4时,二者皆为承载力不足破坏,所以耐火极限的相对误差最小;荷载比为0.6时,整体结构破坏模式变为失稳破坏,而恒载单柱仍为承载力不足破坏,如图3所示。

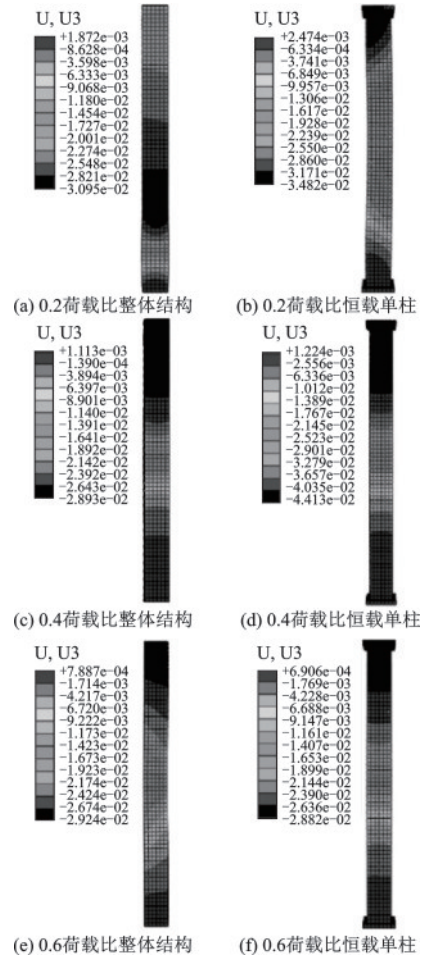


图3 恒载单柱与整体结构受火柱变形云图

Fig.3 Deformation contour of constant loading column and the whole structure

2.2 变位移加载单柱

荷载比为0.2、0.4和0.6时,变位移加载单柱和整体结构受火柱柱顶截面轴力的误差峰值皆出现在热膨胀变形峰值阶段(受火时间40~60 min),且最大差值皆在140 kN左右。荷载比为0.2时,二者轴力在受火100 min之后逐渐接近,在受火150 min之后基本一致。荷载比为0.4和0.6时,二者轴力在达到耐火极限前相差较大,如图4所示。

以荷载比为0.4时的变位移加载单柱和整体结构受火柱柱中截面的应力云图为例,其中正值为拉应力,负值为压应力。受火10 min时,二者应力分

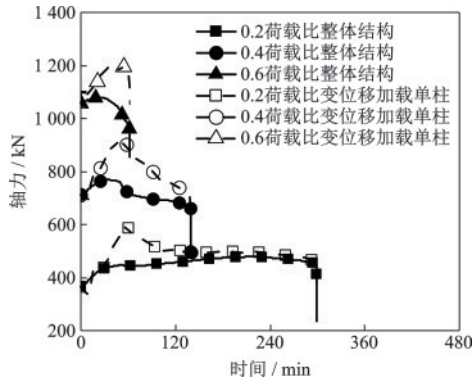


图4 变位移加载单柱和整体结构柱顶轴力

Fig.4 Vertical displacement of variable displacement loading column and the whole structure

布相似,内部有较大区域的混凝土处于受拉状态,由内到外拉应力逐渐减小,在某一临界区域拉应力

转变为压应力且压应力逐渐增大。受火 60 min 时,二者应力分布相似程度下降,变位移加载单柱横截面内部受拉区域的面积减少,而整体结构受火柱横截面仍有较大区域受拉。受火 120 min 时,二者应力分布差异较大,变位移加载单柱截面内部混凝土不再受拉,从外表面到核心混凝土的压应力呈现先增后减的趋势,而整体结构中受拉区域依旧存在,如图 5 所示。

在受火初期,外围混凝土升温快,热膨胀变形显著,压应力大。距离表面越远温度越低,热膨胀变形越小附加轴力也就越小,压应力逐渐减小,在达到某一临界距离时压应力消失,不再承受压力而是受拉。随着受火时间增加,外围混凝土达到抗压强度无法继续承载,此时荷载主要由内部混凝土承担,所以应力最大的区域向内部迁移。

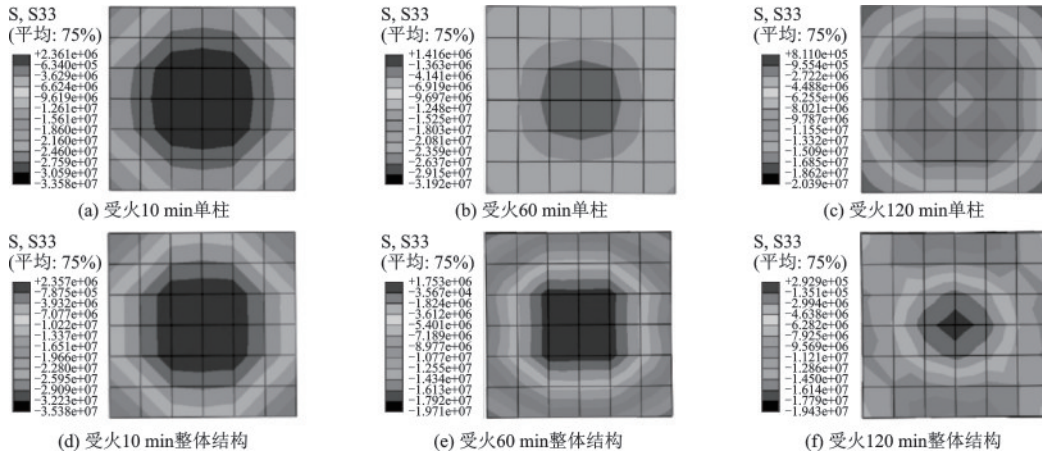


图5 变位移加载单柱和整体结构柱中横截面应力云图

Fig.5 The stress contour of the cross section in the variable displacement loading column and the whole structure

变位移加载保持了整个柱顶截面的位移一致,使得柱顶所受约束强于整体结构,这放大了上述热膨胀变形不均引起的应力分布不均,并且使附加轴力大小与整体结构产生差异。不能很好地还原整体结构中周围构件对受火柱的约束作用,使得荷载比为 0.4 和 0.6 时二者的轴力差异较大。

2.3 变力加载单柱

荷载比为 0.2 时,变力加载单柱与整体结构的位移变化趋势接近。在荷载比为 0.4 和 0.6 时,变力加载单柱与整体结构的位移变化趋势相差较大,与恒载的较为接近。变力加载单柱的耐火极限相对于整体结构偏大,得到的结果趋于危险,在荷载比为 0.4 和 0.6 时甚至大于恒载单柱,如图 6 所示。

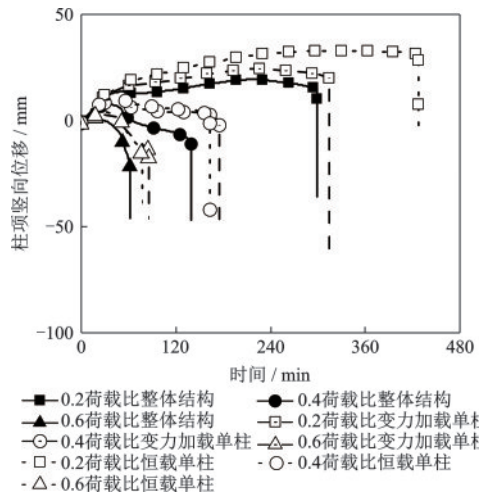


图6 变力加载单柱、恒载单柱和整体结构柱顶位移

Fig.6 Vertical displacement of variable displacement loading column, constant loadin column and the whole structure

统计三种荷载比下整体结构受火柱、变力加载单柱和恒载单柱的耐火极限与相对误差,发现随着荷载比增加,恒载单柱的耐火极限相对误差逐渐减小,而变力加载单柱的耐火极限相对误差逐渐增大,荷载比为0.6时达到了41%,见表2。

表2 耐火极限

Table 2 Fire resistance limit			
加载工况	荷载比	耐火极限/min	相对误差/%
整体结构	0.2	298	0
整体结构	0.4	140	0
整体结构	0.6	61	0
变力加载	0.2	314	5.4
变力加载	0.4	174	24.3
变力加载	0.6	86	41
恒载	0.2	427	43.3
恒载	0.4	163	16.4
恒载	0.6	76	24.6

以荷载比为0.4时的变力加载单柱柱中截面应力云图为例,与变位移加载单柱情况相似,在受火后期变力加载单柱的应力分布与整体结构存在较大差异。变力加载单柱的应力分布相对整体结构受火柱更加均匀,抗火性能更好,因此变力加载单

柱不能很好地还原整体结构中约束作用的影响,如图7所示。

2.4 交互加载单柱

荷载比相同时,交互加载单柱和整体结构受火柱的柱顶竖向位移趋势较为接近。交互加载单柱与整体结构耐火极限的差值和相对误差皆随荷载比增大而增大,荷载比为0.2、0.3、0.4、0.5和0.6时的相对误差都小于20%,且小于恒载单柱的误差,如图8所示。交互加载单柱能较好地考虑整体结构中的约束作用。

交互加载单柱达到耐火极限时的变形云图,如图9所示。可以发现破坏模式都偏于承载力不足破坏。与图3对比,荷载比为0.2和0.4时,整体结构受火柱与交互加载单柱破坏模式相似。荷载比为0.6时,整体结构受火柱是失稳破坏,而交互加载单柱依旧是承载力不足导致破坏,所以此时二者耐火极限相对误差最大。

以荷载比为0.4时的交互加载单柱柱中截面应力云图为例,与变力加载单柱情况相似,在受火后期变力加载单柱的应力分布与整体结构存在较大差异,如图10所示。

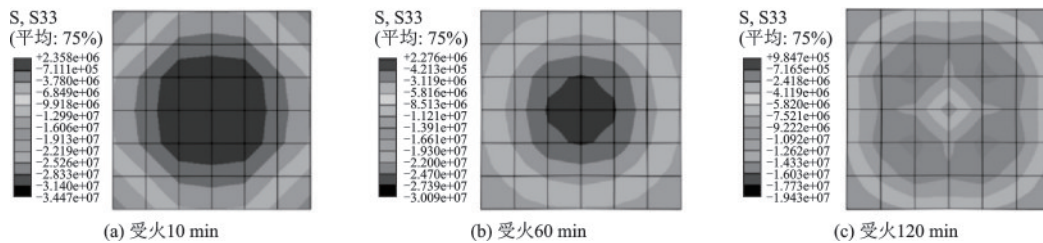


图7 变力加载单柱柱中横截面应力云图

Fig.7 The stress contour of cross section in variable force loading column

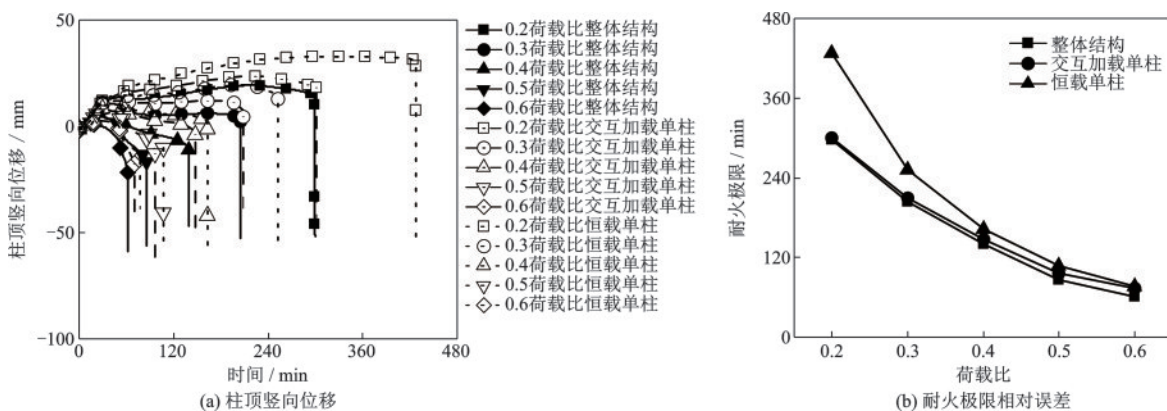


图8 柱顶竖向位移及耐火极限相对误差

Fig.8 Vertical displacement of column top and relative error of fire resistance limit

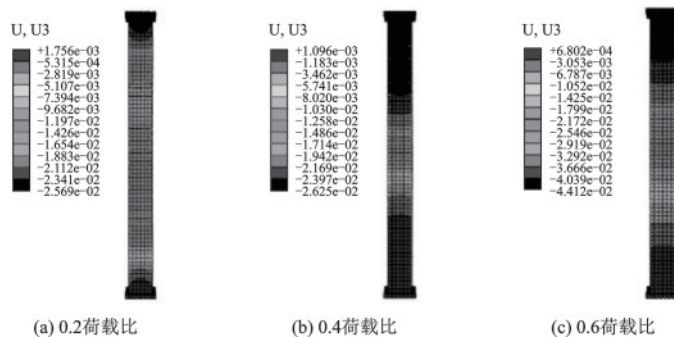


图9 交互加载单柱变形云图

Fig.9 The deformation contour of the interactive loading column

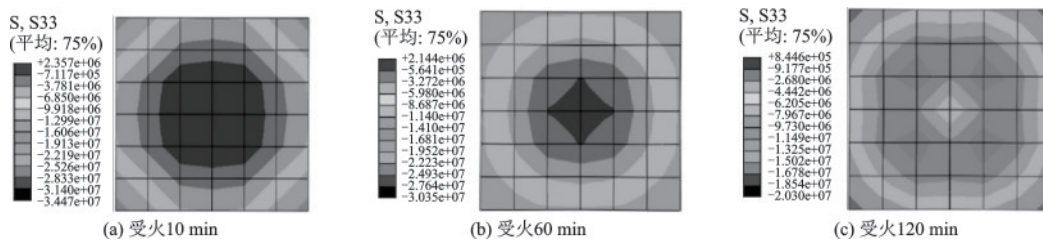


图10 交互加载单柱柱中横截面应力云图

Fig.10 The stress contour of cross section in the interactive loading column

交互加载的横截面应力分布与整体结构也存在差异,但是每隔10 min进行一次交互,能够有效避免误差积累,减小了二者横截面应力分布差异引起的误差,因此交互加载方式能够较好地反映整体结构的抗火性能。

3 结论

通过有限元分析研究了恒载、变位移加载、变力加载和交互加载情况下,受火单柱与整体结构中受火柱变形、内力、耐火极限和破坏模式的差异,得到以下结论:

(1)由于没有考虑约束作用的影响,在荷载比为0.2时,恒载单柱与整体结构的抗火性能相差较大,耐火极限的差值为129 min,相对误差为43.3%。在荷载比为0.4和0.6时,二者的抗火性能相差相对较小,耐火极限的差值分别为23 min和15 min,相对误差分别为16.4%和24.6%。

(2)在受火后期,变位移加载和变力加载单柱的截面应力分布与整体结构有较大差异。三种荷载比情况下,变位移加载单柱与整体结构的内力最大差值皆为140 kN,变力加载单柱与整体结构的耐火极限相对误差分别为5.4%、24.3%和41%。

(3)交互加载避免了误差积累,能较为准确的反映整体结构的变形、内力、耐火极限和破坏模式。

其中耐火极限的相对误差随荷载比增大而增大,在荷载比为0.6时相对误差也小于20%。

参考文献:

- [1] 徐玉野,吴波.高温下端部受约束的混凝土异形柱抗火性能研究[J].工程力学,2008,25(9):134-142.
Xu Y Y, Wu B. Fire resistance of end constrained columns with special-shaped cross section [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(9): 134-142. (in Chinese)
- [2] 吴波,陈书良.约束钢筋混凝土十字形柱的高温轴力分析[J].防灾减灾工程学报,2009,29(6):676-683.
Wu B, Chen S L. Analysis on axial force of restrained cross shaped reinforced concrete columns under high temperature [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(6): 676-683. (in Chinese)
- [3] 吴波,陈书良,张海燕.轴向约束钢筋混凝土异形柱的高温试验研究[J].土木工程学报,2009,42(8):67-74.
Wu B, Chen S L, Zhang H Y. Experimental study on axially restrained reinforced concrete columns with special shaped cross sections under fire [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(8): 67-74. (in Chinese)
- [4] Wu B, Li Y H, Chen S L. Effect of heating and cooling on axially restrained RC columns with special-shaped cross section [J]. Fire Technology, 2010, 46(1):

- 231-249.
- [5] Tan K H, Nguyen T T. Experimental behaviour of restrained reinforced concrete columns subjected to equal biaxial bending at elevated temperatures [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56: 823-836.
- [6] 王冠, 毛小勇, 杨才千, 等. 轴向约束高强(纤维)混凝土柱抗火性能试验研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(11): 174-182.
- Wang G, Mao X Y, Yang C Q, et al. Experimental study on fire resistance of axially restrained HSC & FRHSC columns [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(11): 174-182. (in Chinese)
- [7] 郑蝉蝉, 李引擎, 王广勇. 型钢混凝土约束柱耐火性能研究[J]. *建筑科学*, 2016, 32(3): 81-88.
- Zheng C C, Li Y Q, Wang G Y. Fire performance study of steel reinforced concrete restrained columns [J]. *Building Science*, 2016, 32(3): 81-88. (in Chinese)
- [8] 郑蝉蝉, 王广勇. 型钢高强混凝土约束柱耐火性能模拟研究[J]. *建筑科学*, 2020, 36(11): 132-137.
- Zheng C C, Wang G Y. Study on fire performance of steel reinforced high-strength concrete columns [J]. *Building Science*, 2020, 36(11): 132-137. (in Chinese)
- [9] 李国强, 贺军利, 蒋首超. 约束钢梁的抗火试验与验算[J]. *土木工程学报*, 2000, 33(4): 23-26.
- Li G Q, He J L, Jiang S C. Fire-resistant experiment and theoretical calculation of a restrained steel beam [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(4): 23-26. (in Chinese)
- [10] 李国强, 王银志, 郝坤超. 约束组合梁抗火性能试验研究[J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(6): 93-98.
- Li G Q, Wang Y Z, Hao K C. Experiment investigation on fire-resistant behavior of restrained composite beams [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2007, 16(6): 93-98. (in Chinese)
- [11] 李国强, 缪嘉荣, 宋林昕. 约束高强钢柱受火后轴压剩余承载力影响参数研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(1): 87-94.
- Li G Q, Miao J R, Song L X. Parametric study on residual capacities of axially restrained high strength steel columns after fire [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(1): 87-94. (in Chinese)
- [12] 李国强, 宋林昕, 缪嘉荣. 约束高强钢柱受火后轴压剩余承载力试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(1): 79-86.
- Li G Q, Song L X, Miao J R. Experimental study on residual capacities of axially restrained high strength steel columns after fire [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(1): 79-86. (in Chinese)
- [13] Couto C, Vila R P, Lopes N, et al. Local buckling in laterally restrained steel beam-columns in case of fire [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 122: 543-556.
- [14] 陈俊, 吴金梁, 谭清华, 等. 不同约束方式下钢筋混凝土短柱火灾后(下)力学性能的试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(9): 412-420.
- Chen J, Wu J L, Tan Q H, et al. Experimental study on mechanical performance of reinforced concrete stub columns under and after fire with different restraints [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(9): 412-420. (in Chinese)
- [15] Eurocode 2: Design of concrete structures-part 1-2: general rules-structural fire design: EN 1992-1-2 (2004) [S]. UK: European Committee for Standardization, 2004.
- [16] Lie T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. *Journal of Structural and Engineering*, 1994, 122(5): 1489-1509.
- [17] Lie T T, Chabot M. A method to predict the fire resistance of circular hollow steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. *Journal of Fire Protection Engineering*, 1990, 2(4): 111-126.
- [18] 姚亚雄, 朱伯龙. 钢筋混凝土框架结构抗火试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 1996, 24(6): 619-624.
- Yao Y X, Zhu B L. Experimental studies on fire-resistance of reinforced concrete frames [J]. *Journal of Tongji University (Natural science)*, 1996, 24(6): 619-624. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)