

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20201109005

钢筋混凝土框架的多尺度抗火混合模拟*

蔡新江^{1,2}, 戚晨望^{1,2}, 毛小勇^{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: 针对整体结构火灾试验费用高昂、传统构件试验无法反映整体结构性能、全实体单元模型抗火计算效率不高等问题, 基于ABAQUS软件, 建立钢筋混凝土传统单柱、全实体单元平面框架、多尺度平面框架、多尺度空间框架、混合模拟平面框架5种模型, 进行了基于底层中柱受火工况下整体结构的抗火性能对比分析, 研究了不同建模方式的计算效率、约束对耐火极限的影响、混合模拟与常规数值模拟的差异, 结论证实: 缺少约束条件下的传统单柱的耐火极限相对整体结构偏低; 多尺度模型相对全实体建模其计算效率提高80%左右; 多尺度空间模型相对多尺度平面模型约束效应更强, 在保持相同承载力的情况下变形相对更小; 混合模拟模型与多尺度平面模型相比其力学性能具有较强相似性, 证实采用多尺度混合模拟能够较好地反映整体结构的抗火性能, 同时兼顾了计算效率和计算精度的统一。

关键词: 抗火; 钢筋混凝土框架; 多尺度; 混合模拟; 计算效率

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0383-08

Multi-scale Hybrid Simulation of Fire Resistance of Reinforced Concrete Frame

CAI Xinjiang^{1,2}, QI Chenwang^{1,2}, MAO Xiaoyong^{1,2}, TIAN Shizhu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China;

2. Jiangsu Province Key Laboratory of Structure Engineering, Suzhou 215011, China)

Abstract: In view of the problems including high cost of the fire test on a whole structure, the traditional component test cannot reflect the performance of a whole structure, and the low calculation efficiency on the fire resistance of the full solid element model, comparative analyses on fire resistance performance of a whole structure considering the fire at the bottom center column is carried out. Five models including traditional reinforced concrete single column, full solid element plane frame, multi-scale plane frame, multi-scale space frame and hybrid simulation plane frame are established, based on the ABAQUS software. The calculation efficiency of different modeling methods, the influence of constraints on the fire resistance limit and the difference between hybrid simulation and conventional numerical simulation are studied. The conclusions confirm that the fire resistance limit of the tradition-

* 收稿日期:2020-11-09;修回日期:2021-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778395)、江苏省自然科学基金项目(BK20171221)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJKY19_2343)、江苏高校“青蓝工程”(2018)、江苏省“333工程”(2018)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)资助

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

al single column without constraints is lower than the whole structure; the calculation efficiency of the multi-scale model increases about 80% compared with to the full-solid modeling; compared with the multi-scale plane model, the multi-scale space model has stronger restraint effect and relatively smaller deformation while maintaining the same bearing capacity; compared with the multi-scale plane model, the hybrid simulation model has a strong similarity in mechanical properties. It is proved that the use of multi-scale hybrid simulation can better reflect the fire resistance of the whole structure, and can take into account the unification of calculation efficiency and calculation accuracy.

Keywords: fire resistance; reinforced concrete frame; multiscale; hybrid simulation; calculation efficiency

引言

试验和数值模拟是研究结构抗火性能的重要研究手段,前者能够较为真实地反映出结构在火灾下的破坏损伤和内力变化,但成本较高、边界条件复杂,后者能够以较低成本模拟常规结构的抗火性能,但无法精确反映特殊结构或关键部位在火灾作用下真实受力情况。混合试验方法可以同时兼顾试验和数值模拟两种手段,其思想来源于子结构抗震拟动力试验。与地震作用相比,火灾往往仅发生在结构局部,可以将这一部分取为试验子结构,放置于火灾炉中进行火灾试验。称之为试验子结构;其余部分采用数值模拟进行抗火性能分析,称之为数值子结构,两者之间通过边界条件和数据交换来满足动力方程的力学平衡和位移协调^[1-3],形成抗火混合试验方法,该方法既可以研究区域火灾下整体结构的抗火性能,又可以评估与相邻构件交互作用下的单独构件抗火能力,有效利用现有抗火试验设备以较低成本实现更高可靠性的整体结构抗火分析。

M.Korzen等^[4-7]基于子结构方法研究单柱在高温约束效应影响下的力学性能,初步实现了第一个位移控制的抗火混合试验。H.Mostafaei等^[8-9]阐述了取底层柱和其余层任意柱为试验子结构时火灾混合试验的力学平衡和边界协调实现条件,利用荷载一位移矩阵关系,依据剪力等效原则,采用增加等效水平位移的方法来弥补试件的弯曲效应,来模拟其余构件对受火构件的约束作用。F.Rboret等^[10]进行了单层多跨预应力混凝土板的抗火混合试验,用多组加载装置模拟板面边界条件,实现了板构件的抗火混合试验。A.Sauca等^[11-12]通过研究高温下构件的刚度变化导致试验和数值模拟产生的误差,

提高了抗火混合试验的稳定性和准确度,进而研究出不依赖刚度比的抗火混合试验方法。王震等^[13]在试验子结构和数值子结构之间数据交互反馈时,对时间步长和数值增量的同步修正,并用构件的数值模拟代替试验,通过对模拟的试验子结构和数值子结构的交互,验证了抗火混合试验的正确性。

抗火混合试验的关键在于高温下试验子结构和数值子结构的混合交互,在试验子结构升温的过程中,对数值子结构与试验子结构进行实时数据交互的效率有较高的要求,数值模型的复杂程度和数据量的大小决定了混合试验的计算效率和精确性。常规有限元建模方法总体上分为基于梁单元的宏观模型和基于实体单元的微观模型,前者计算量小,单元简单,适用于复杂结构模型的建模,但是结构精细化程度相对较低;后者能弥补前者的不足,但计算复杂结构的运算量非常大,因此目前模型分析需要一个能够同时模拟结构局部微观破坏和整体宏观行为的建模方法,而多尺度建模就可以解决以上问题。多尺度建模分析是目前国际热点前沿领域,对于受力复杂的关键部位可以采用实体微观单元来描述其局部强烈非线性失效行为,而对于常规构件可采用宏观梁柱单元,通过选择合理的界面连接方式,保证宏观尺度模型和微观尺度模型协同工作,则可以在精度和代价之间找到平衡,更为深入地反映结构力学性能。李兆霞等^[14-17]阐述了大型土木工程结构从材料多尺度力学过渡到结构多尺度力学的关键科学问题,并将其应用于大跨度桥梁结构的损伤诊断与安全评估中。陆新征等^[18-19]阐述了不同尺度有限元模型间的界面连接方法,并将其应用于钢-混凝土混合框架结构的精细化建模分析当中。石永久等^[20]探讨了利用多尺度模型的方法解决钢框架抗震计算问题。陆兴锋

等^[21]研究了多尺度混合试验的单元选取和截面连接的方法。

综上所述,目前的抗火试验研究对象基本以某个单独构件的抗火分析或者材料性能为主,本文将多尺度建模和混合试验相结合,以局部火灾作用下四层四跨钢筋混凝土平面框架结构为主要研究对象,探究单柱子结构受火时对整体框架结构的影响,同时探讨多尺度建模与普通实体单元建模抗火性能分析的差异。

1 钢筋混凝土框架有限元设计

1.1 模型设计

计算模型为四层四跨钢筋混凝土平面框架,跨度为5.4 m,底层层高3.9 m,其余层层高3.3 m,混凝土强度等级柱为C40,梁为C30,钢筋采用HRB400,截面和配筋参数见表1,框架计算模型如图1所示。柱顶作用集中荷载 N_i ($N_1=1\ 080\text{ kN}$, $N_2=1\ 200\text{ kN}$),梁上均布荷载 $q=20\text{ kN/m}$ 。根据火灾发生的场景不同,选择了底层中柱受火的代表性火灾工况进行分析,如图2所示。

表1 梁柱尺寸及配筋

Table1 Size and reinforcement of beam and column

| 构件 | 截面尺寸/mm | 纵筋 | 箍筋 | 保护层厚度/mm |
|----|---------|------|-------------|----------|
| 梁 | 200×450 | 6C20 | A10@100/200 | 30 |
| 柱 | 300×300 | 8C20 | A10@75/150 | 30 |

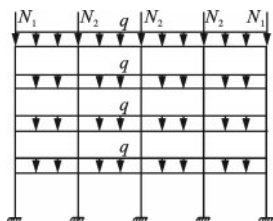


图1 框架荷载

Fig.1 Frame load

为了与基于单柱构件的抗火试验结果进行对比,假定火灾只发生在底层中柱四周局部区域内,其他区域均不受火,建模时将影响较大的受火柱设置为高温微观子结构模型,其余部分按重要性并考虑后续的震后火工况,将节点设置为常温微观模型,其余的梁、柱设置为常温宏观模型。模型采用

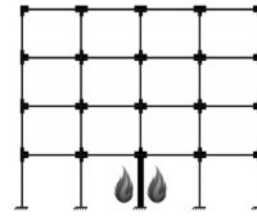


图2 火灾工况

Fig.2 Fire scenarios

的本构参数包括导热系数、比热容、热膨胀系数、高温下的弹塑性等,其中高温下弹塑性本构参照了T.T.Lie^[22-23]论文中的数据,导热系数、比热容、热膨胀系数等采用规范EC3^[24]和EC4^[25]中的取值。

1.2 温度场计算模型

温度场计算时,仅考虑底层受火柱的热传递,采用ISO834标准升温曲线,采用空间实体单元DC3D8进行建模;非受火梁柱采用DC1D2进行建模。受火面对流热系数取 $25\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$,综合辐射系数取0.5,非受火面综合换热系数为 $9\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 。混凝土与钢筋之间采用绑定约束,不考虑相对滑移。

图3为底层中柱和节点的有限元计算温度云图,由图可知,受火区温度沿柱长度方向均匀分布,在节点与受火区交界处存在一个温度过渡区,该处温度由高到低分布,温度向节点内部传递削减明显。

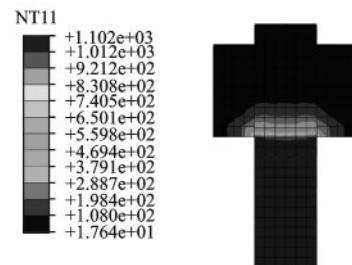


图3 受火节点温度云图

Fig.3 Temperature nephogram of joint in fire

中柱中部截面温度云图分布如图4所示,在四面受火的条件下,正方形钢筋混凝土柱截面温度分布呈双轴对称分布,由外向内温度递减,柱截面角温度较沿边温度高。取距柱中心50、100、150 mm

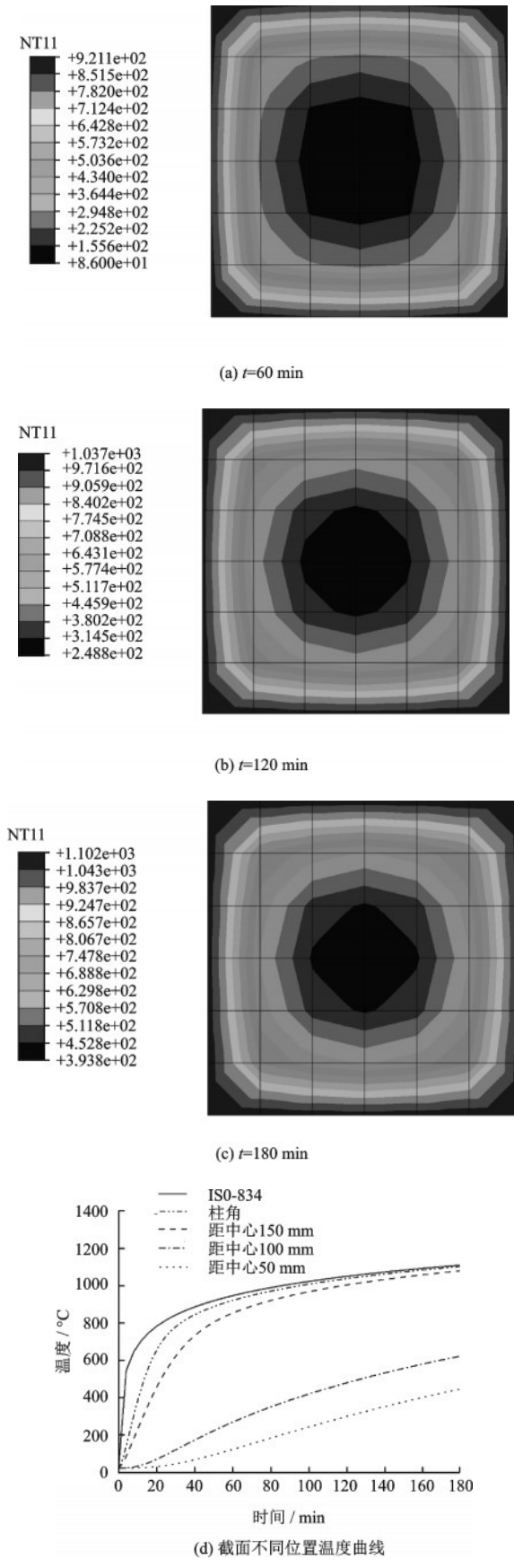


图4 受火柱截面温度云图

Fig.4 Cross section temperature of fire column

以及柱角处四个点的位置处温度与ISO834曲线进行对比,越靠近截面外缘温度曲线越贴近升温曲线,前30 min由于升温较快,混凝土内部温度传递梯度明显,随着升温速率降低,温度梯度差距逐渐减小。受火60 min时,截面处柱角温度最高为921℃,柱边为850℃,混凝土核心区域即距柱中心50 mm处为118℃;受火120 min时,截面处柱角温度最高为1 037℃,柱边为1 005℃,混凝土核心区域为300℃;受火180 min时,截面处柱角温度最高为1 101℃,柱边为1 078℃,混凝土核心区域为443℃,由此可知,随着受火时间加长,柱截面各个位置处的温度差距越来越小。

1.3 热力耦合计算模型

采用顺序耦合应力分析方法,先进行热传导分析,将计算得到各部件温度以预定义场形式转化成荷载导入应力场中进行热力耦合分析。

进行热力耦合分析建模时,钢筋混凝土平面框架模型采用多尺度建模,采用计算效率较高的宏观梁单元和计算精度较高的微观实体单元通过MPC Beam连接的方式,实现梁单元与实体单元的单元对多点的柔性耦合,在能达到更高精度的同时提升了计算效率。由于宏观B31梁单元无法定义截面内钢筋配筋,本文采用基于ABAQUS平台的钢与混凝土结构纤维模型软件(iFiberLUT),材料模型定义选用iConcrete03混凝土模型,为梁单元定义混凝土塑性损伤本构,纤维模型定义利用关键词*rebar在梁单元截面内添加钢纤维,同时定义横向剪切刚度*Transverse Shear Stiffness,通过修改积分点数目来控制截面的纤维数目;微观单元混凝土、钢筋分别采用C3D8R实体单元、T3D1桁架单元,并采用Embedded定义钢筋和混凝土之间约束,实现钢筋内置于混凝土。框架底层柱柱底采用固结,约束了水平位移和转角($U_1=U_2=U_3=U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$)。第一个分析步Step-1为对钢筋混凝土框架施加恒定的集中荷载和均布荷载,第二个分析步Step-2导入预先完成的温度场计算结果,当柱的轴向压缩变形速度超过3 h(mm/min)时,即判定结构失效而达到耐火极限,其中h为柱的受火高度(m)。

1.4 对比模型参数

选取4个对比模型,分别为传统单柱模型、全实

体单元平面框架模型、多尺度空间框架模型、混合模拟平面框架模型,在相同边界条件下与多尺度平面框架模型进行对比。

(1) 传统单柱模型:如图5(a)所示,选取高为3.25 m的单柱模型,柱顶施加1 270 kN的竖向荷载的条件下四面受火3 h。



(a) 传统单柱模型 (b) 全实体单元平面框架模型
图5 单柱模型和全实体单元平面框架模型

Fig.5 Single column model and solid element plane frame model

(2) 全实体单元平面框架模型:如图5(b)所示,将多尺度框架模型中的梁单元(B31)改为和节点单元相同的实体单元(C3D8R),并将连接方式改为绑定约束(Tie),其余边界条件保持不变。

(3) 多尺度空间框架模型:如图6所示,将原多尺度平面框架模型改为四层四跨三榀的多尺度空间框架模型,仅使中榀中跨底层中柱和节点为实体单元(C3D8R),其余单元均为梁单元(B31),通过MPC Beam连接的方式,实现两者的单点对多点的柔性耦合。

(4) 混合模拟平面框架模型:如图7所示引入

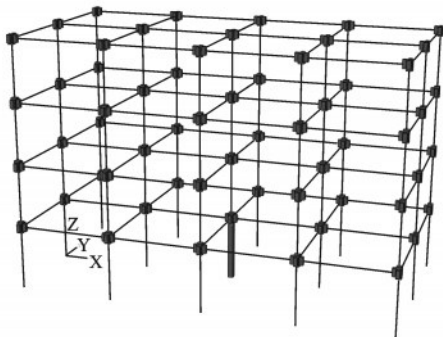
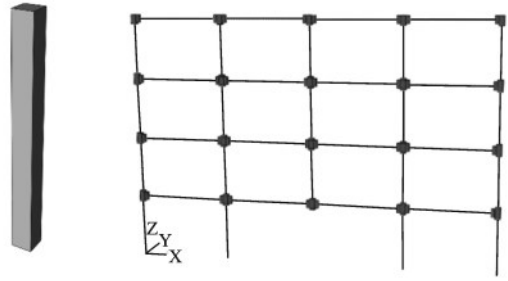


图6 多尺度空间框架模型

Fig.6 Multi-scale spatial frame model



(a) 试验子结构PS (b) 数值子结构NS

图7 多尺度混合模拟框架模型

Fig.7 Multi-scale hybrid test frame model

混合试验的方法,建立一个高为3.25 m的单柱子结构试验模型(PS)和一个对应的四层四跨去除中柱子结构的数值模型(NS),通过对PS施加相同的起始竖向荷载,在一个步长时间内产生的变形反馈到NS中,在相同的步长内NS反馈相应的轴力到PS中,以此往复交互3 h。

2 有限元结果对比分析

2.1 不同模型计算效率

由表2可知,在相同受火工况和边界条件下,温度场分析和热力耦合分析中,多尺度平面框架模型的计算时间相对全实体单元平面框架模型分别减少了75%和84%,计算效率提升明显。

表2 各模型计算时间

Table 2 Computational efficiency of different models

| 模型类型 | 计算时间/min | |
|-------|----------|------|
| | 温度场 | 热力耦合 |
| 全实体单元 | 12 | 158 |
| 多尺度 | 3 | 25 |
| R/% | 75 | 84 |

注:R为多尺度平面框架模型计算时间相对全实体单元平面框架模型减少的百分比

2.2 不同模型耐火性能分析

钢筋混凝土框架结构底层中柱恒载升温过程中,材料的应力应变在不同单元模型中,随温度升高增量步迭代计算方式是不同的。

在温度场分析中,提取五个模型受火柱柱中表面温度,如图8所示,可以看出不同的单元类型和交互方式对温度的影响不大,同一位置处升温速率近

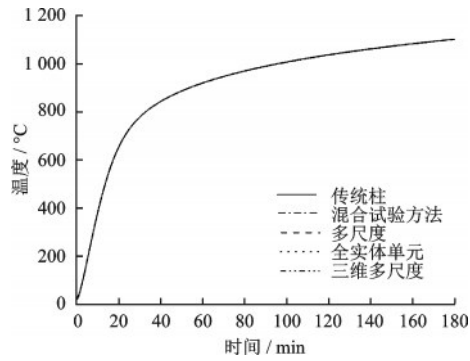


图8 不同模型受火柱柱中温度曲线

Fig.8 Temperature curves in fire columns of different models

似相同。

在热力耦合分析中,提取五个模型柱相同位置处的竖向位移与轴力,如图9和图10所示。在给定边界条件下,单柱未受到节点和梁的约束作用,在竖向荷载和温度应力的共同作用下耐火极限较短;多尺度空间框架模型则与之相反,与多尺度平面框架模型相比,节点受到四周梁的约束,在竖向荷载和温度应力的共同作用下,延长了耐火极限;除单柱和空间模型外,其余三组模型耐火极限相似,均在150 min左右。由于传统单柱模型以恒定轴力加载,轴力在整个受火过程中保持不变,其余模型由于在恒定荷载作用下,混凝土升温膨胀受到节点和梁柱约束影响,轴力均呈现为先增大后减小的趋势,到达耐火极限时,受火柱因破坏而失去承载能力,轴力迅速下降,结构发生倒塌。

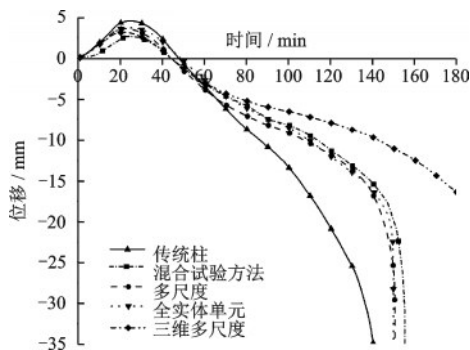


图9 不同模型受火柱柱顶竖向位移曲线

Fig.9 Relationship between axial deformation and time

由图11可知,多尺度平面框架模型底层中柱四面受火工况下,框架达到耐火极限时,受火柱发生了明显的竖向变形,并伴随着倒塌的趋势,同时高温作用下也产生了较大的热膨胀变形,引起与之相连的节点的转动变形以及与该节点相连的梁产生类似悬臂柱的变形。各构件之间的相互作用使得

框架在单个构件受火破坏后会产生多个构件的共同破坏。

(1) 如图12所示,对于传统单柱模型来说,恒定不变的竖向轴力导致了其耐火极限在所有模型中最小,在前43 min内轴力较其余模型小,因此前期产生较大的膨胀,随着后期其余模型受温度应力影响,轴力的减小,相对较大的单柱轴力会导致产生较大的位移变形,混凝土提前开裂并达到耐火极限。

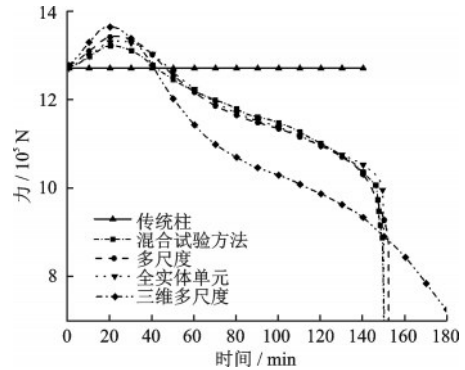


图10 不同模型受火柱柱顶竖向轴力曲线

Fig.10 Relationship between axial force and time

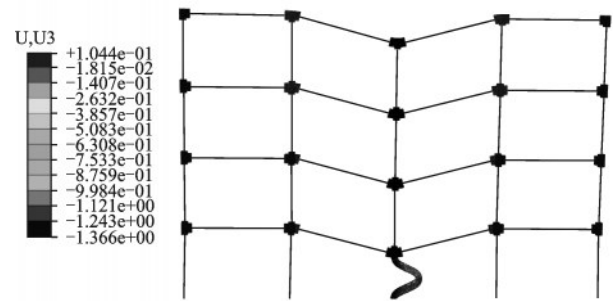


图11 多尺度平面框架模型破坏形态

Fig.11 Progressive collapse of multi-scale frame model in fire

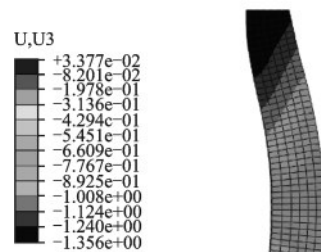


图12 传统柱模型破坏形态

Fig.12 Progressive collapse of conventional test in fire

(2) 如图 13 所示,以全实体单元建模的平面框架模型位移曲线和轴力曲线与采用 MPC 处理后的多尺度平面框架模型差距很小,多尺度模型在提高了计算效率的同时,也同样保证了计算的精度。



图 13 全实体单元平面框架模型破坏形态

Fig.13 Progressive collapse solid element frame in fire

(3) 如图 14 所示,多尺度空间框架模型中间楣框架较二维平面框架模型各节点多一组梁单元梁的约束,该约束效果在整个受火变形过程中均起到较大作用,约束了受火柱膨胀的同时也约束了压缩,延长了到达耐火极限的时间,同时也更加真实的模拟出其余梁柱构件参与约束后,单柱受火变形对整体框架破坏形态的影响。

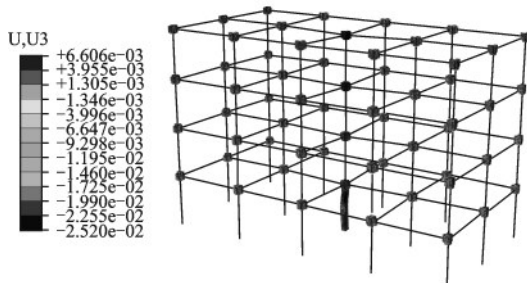
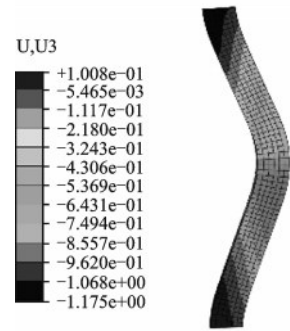


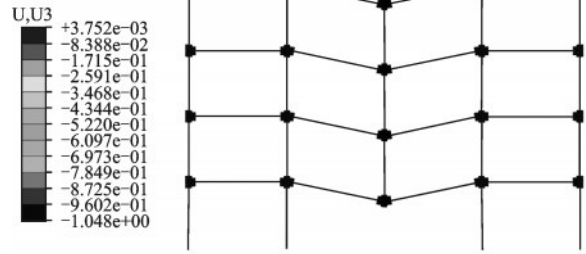
图 14 多尺度空间框架模型破坏形态

Fig.14 Progressive collapse of multi-scale spatial frame in fire

(4) 如图 15 所示,引入混合试验方法后,通过交互 PS 与 NS 间的轴力与位移,近似的模拟出在单柱受火的工况下整体结构的变化。交互的时间步长设置为 1 min,即 1 min 交互一次 PS 的位移与 NS 的轴力,在实际过程中,受步长的限制,在膨胀段单位时间交互的轴力会较多尺度整体框架计算轴力偏小,导致膨胀位移偏大;而在塌缩段交互的轴力反而会偏大,导致变形位移偏大。总体趋势和多尺度整体结构较为吻合,由此可见,仅以 PS 受火,将变化的边界条件反馈到 NS 中,通过混合交互的方式,也能较为准确的反映整体结构的破坏形态和变形规律。



(a) 试验子结构 PS



(b) 数值子结构 NS

图 15 混合模拟平面框架破坏形态

Fig.15 Progressive collapse of multi-scale hybrid test frame in fire

4 结 论

基于以上 5 种模型的对比分析,可以得出以下结论:

(1) 传统柱在缺少其他构件对其约束的条件下,相对整体结构耐火极限偏低,使其产生了较大的位移变形。

(2) 多尺度模型与全实体单元模型相比,火灾下的力学性能基本接近,表明多尺度在显著提高模型计算效率的同时可以有效保证模型的计算精度。

(3) 多尺度空间模型与平面框架模型相比存在更多的节点约束,在发生同等变形时,较强的约束效果使得结构仍然保留较高的承载能力,证实了约束的存在对框架耐火极限有着较大的影响。

(4) 采用多尺度混合模拟的方法,能得到和整体结构相似的耐火极限和结构变形,以较低的成本就能近似得到整体结构的在火灾作用下相近的力学性能,兼顾了计算效率和计算精度,为试验的进行奠定了基础。

(5) 本文分析的单柱四面受火火灾工况与真实火灾具有一定的差异,所得出的结论仅针对以上工况有效,这是本文分析的局限性,之后会展开对近

似真实火灾工况的分析,充分证明多尺度混合试验方法的可行性。

参考文献:

- [1] Zaixian C, Guoshan X, Bin W, et al. Equivalent force control method for substructure pseudo-dynamic test of a full-scale masonry structure [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014, 43: 969-983.
- [2] Hussam N M, Amr S E, Billie F S, et al. Hybrid simulation for earthquake response of semirigid partial-strength steel frames [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(7): 1134-1148.
- [3] 杨格, 王贞, 吴斌, 等. 建筑结构混合试验平台HyTest开发研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(11): 149-156. Yang G, Wang Z, Wu B, et al. Development of HyTest for structural hybrid simulation [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(11): 149-156. (in Chinese)
- [4] Korzen M, Magonette G, Buchet P. Mechanical loading of columns in fire tests by means of the substructuring method [J]. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1999, 79(Sup 2): 617-618.
- [5] Korzen M, Ziener K U, Riemen S, et al. Some remarks on the substructuring method applied to fire resistance tests of columns [C] //30th IAHS World Congress on Housing: Housing Construction. Coimbra, Portugal: International Association for Housing Science, 2002, 3: 1601-1607.
- [6] Korzen M, Rodrigues J P C, Correia A M. Thermal restraint effects on the fire resistance of steel and composite steel and concrete columns [C] //Application of Structural Fire Engineering. Prague: Czech Republic, 2009: 512-517.
- [7] Korzen M, Rodrigues J P C, Correia A M. Composite columns made of partially encased steel sections subjected to fire [C] //Proceedings of the Sixth International Conference on Structures in Fire. Lancaster, PA, USA: DEStech Publications, 2010: 341-348.
- [8] Mostafaei H. Hybrid fire testing for assessing performance of structures in fire—application [J]. *Fire Safety Journal*, 2013, 56: 30-38.
- [9] Mostafaei H. Hybrid fire testing for assessing performance of structures in fire—methodology [J]. *Fire Safety Journal*, 2013, 58: 170-179.
- [10] Robert F, Rimlinger S, Collignon C. Fire resistance facility taking into account the surrounding structure [C] //1st International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure. Leipzig, Germany: [s.n.], 2009: 3-5.
- [11] Sauca A, Gernay T, Robert F, et al. A Novel methodology for hybrid fire testing [C] //Proceedings of the EACS 2016-6th European Conference on Structural Control. Sheffield, England: [s.n.], 2016: 11-13.
- [12] Sauca A, Gernay T, Robert F, et al. Stability in hybrid Fire testing [C] //Proceedings of the 9th International Conference on Structures in Fire. New Jersey, USA: Princeton University, 2016: 836-843.
- [13] 王震, 李国强. 整体结构混合火灾试验原理及数值仿真分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(3): 409-414. Wang Z, Li G Q. Methodology and numerical analysis of hybrid fire test for whole structure [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(3): 409-414. (in Chinese)
- [14] 郭彤, 李爱群, 李兆霞, 等. 大跨桥梁结构状态评估方法研究进展[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(5): 699-704. Guo T, Li A Q, Li Z X, et al. Progress in condition assessment methods for long span bridges [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2004, 34(5): 699-704. (in Chinese)
- [15] 李兆霞, 孙正华, 郭力, 等. 结构损伤一致多尺度模拟和分析方法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2007, 37(2): 251-260. Li Z X, Sun Z H, Guo L, et al. Concurrent multi-scale modeling of structures and damage analyses [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2007, 37(2): 251-260. (in Chinese)
- [16] 吴佰建, 李兆霞, 汤可可. 大型土木结构多尺度模拟与损伤分析—从材料多尺度力学到结构多尺度力学[J]. *力学进展*, 2007, 37(3): 321-336. Wu B J, Li Z X, Tang K K. Multi-scale modeling and damage analysis of large civil structure - multi-scale mechanics from material to structure [J]. *Advances in Mechanics*, 2007, 37(3): 321-336. (in Chinese)
- [17] 李兆霞. 大型土木结构多尺度损伤预后的现状、研究思路与前景 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(5): 1111-1121. Li Z X. State of the art in multi-scale damage prognosis for major infrastructures [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2013, 43(5): 1111-1121. (in Chinese)
- [18] 陆新征, 林旭川, 叶列平. 多尺度有限元建模方法及其应用[J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2008, 25(4): 76-80.

(本文责编:周小潭)

(下转第 410 页)