

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210313002

钢筋桁架装配式密肋楼盖火灾行为试验研究*

谢群¹, 张守硕¹, 林明强¹, 薛松²

(1. 济南大学土木建筑学院, 山东 济南 250022; 2. 莒县审计局, 山东 日照 276500)

摘要:为适应当前装配式建筑发展需求,提出了一种新型装配式密肋楼盖体系,该楼盖由预制钢筋桁架现场拼装形成钢筋骨架,纵横向钢筋桁架节点处采用特制螺栓连接件形成整体,并利用预制物理发泡轻质混凝土块作为填充物,置于相邻桁架之间起到隔热保温效果,在钢筋桁架和泡沫混凝土块上方铺设预制钢筋网,现场浇筑高流动混凝土形成楼盖肋梁和面层结构。同时,研发了与该装配式楼盖匹配应用的条带式、可循环使用的铝合金模板,避免了满堂模板布设,该楼盖具有节省自重、轻质高强、装配便捷的特点。为掌握该楼盖在火灾(高温)下的性能,对两块该楼盖试件进行自然火灾试验,研究了不同区格条件下混凝土温度场分布、钢筋温度、裂缝模式等火灾行为,试验结果发现,两个试件在均布荷载下经历了2h的火灾作用后,楼盖结构未发生任何严重损伤,泡沫混凝土块未脱落,具有良好的抗火性能,能够满足现行规范对楼盖耐火极限要求。在火灾作用下沿肋板厚存在非线性温度场和较大的温度梯度,且越靠近板底温度梯度越大;与炉温相比,混凝土和钢筋均存在明显的温度滞后效应。采用有限元软件ABAQUS建立了该楼盖的温度场模型,模拟分析结果与试验进行对比,二者吻合较好,验证了温度场模型的有效性,能够为预测火灾(高温)下该楼盖的性能提供技术支持。

关键词: 钢筋桁架; 密肋楼盖; 泡沫混凝土; 自然火灾; 温度场; ABAQUS

中图分类号: TU375.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0372-11

Study on Fire Behavior of Steel Truss Assembled Waffle Slab

XIE Qun¹, ZHANG Shoushuo¹, LIN Mingqiang¹, XUE Song²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. Auditing Bureau of Juxian, Rizhao 276500, China)

Abstract: A new type of assembled waffle slab system consisted of steel truss, foamed concrete block, concrete rib and cast-in-situ concrete layer was proposed in order to meet the increasing requirement of prefabricated building. The orthogonal steel trusses which is connected at the cross joint by special bolts could be assembled to form reinforcing bar system. Precast foamed concrete blocks were arranged between adjacent trusses as filling materials with the function of heat insulation. There is steel bar mesh on the top of both trusses and foamed concrete block, and self-compact concrete would be cast for rib and top concrete layer. A specific formwork system composed of recycled aluminum alloy strips was also developed to adapt the construction of the slab system. Such waffle slab system is characterized by low self-weight, high strength and convenient assembly. In order to investigate the fire behavior of this type of slab, a test was carried out on two slabs with different compartment and

* 收稿日期:2021-03-13;修回日期:2021-08-15

基金项目:山东省重点研发计划项目(2017GSF22106,2017GSF216006)、建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室开放课题(MEKL202006)、山东省住房城乡建设科技计划项目(2020-K5-18)资助

作者简介:谢群(1979—),男,教授,硕导,博士。主要从事装配式结构方面的研究。E-mail:cea_xieq@ujn.edu.cn

different restraint type exposed to natural fire. The temperature field distribution of steel and concrete and crack pattern was studied. The experiment results showed that there was no obvious damage on slab surface after two-hour fire exposure and no spalling or bond failure of foamed concrete block occurred. The post-fire behavior of such slab system could meet the requirement of current fire code. The temperature field along the height of rib presented typically nonlinear distribution. The closer to slab bottom, the greater the temperature gradient was. There was temperature lag in the concrete and steel compared to the temperature development of furnace. The ABAQUS software was used to establish the temperature model of slab. The simulation result indicated a good agreement with the experimental data which verified its effectiveness in temperature prediction and the FE model could provide technical guidance for the fire performance analysis of this type of steel truss assembled waffle slab system.

Keywords: steel truss; waffle slab; foamed concrete block; nature fire; temperature field; ABAQUS

引 言

密肋楼盖以刚度大、整体性好、竖向承载力高等优势而广泛应用于大跨重载的建筑,在显著提高楼层使用高度的同时还可节省材料,但在火灾或高温作用下密肋楼盖较薄的混凝土面层易发生爆裂或损伤,因此近年来国内外学者针对钢筋混凝土密肋或空心楼盖的火灾行为开展了相关研究,并取得了一定的科研成果。朱崇绩等^[1]对钢筋混凝土平板无梁楼盖进行了抗火试验研究,结果表明混凝土的含水率太高时板会因混凝土的爆裂直接导致破坏。R.A. Hawileh等^[2]研究发现碳氢化合物火灾下钢筋混凝土楼盖的耐火性能降低。Y.Wang等^[3-4]分别对板角约束、单向面内约束和双向面内约束的钢筋混凝土楼盖以及多跨混凝土连续楼盖进行火灾试验研究,结果表明每跨炉温及板截面温度分布主要取决于跨内受火情况,通过增加配筋率能够提高板的抗火性能。

王新堂等^[5]进行的混凝土组合楼板火灾试验表明,楼盖的热响应温度沿楼盖板厚方向的变化呈现明显的非线性,且可近似为两个线性变化段。G.Q. Li等^[6]对压型钢板组合楼盖进行火灾试验,发现钢筋和钢板的最高温度发生于冷却阶段,表明楼盖在火灾衰弱阶段也会发生破坏。吴波等^[7]对再生混合组合楼板的耐火试验研究表明,防火涂料能有效提高组合楼盖的耐火极限。

董毓利等^[8-11]研究了有钢梁作用下的钢筋混凝土楼盖火灾行为,升温阶段混凝土楼盖温度滞后于钢梁温度,停止升温后钢梁温度迅速降低,沿混

土楼盖截面高度存在较大温度梯度,非受火面附近出现温度平台。B.Li等^[12]对一座足尺三层钢框架的6块(2×3)连续楼盖进行了火灾试验,结果表明楼盖顶面裂缝特征主要取决于加热楼盖的数量和位置。T.T.Nguyen等^[13-14]研究表明ABAQUS有限元软件分析模型能够有效地预测火灾作用下钢梁组合楼盖的热学行为。

A.M.Mazen^[15]发现混凝土孔隙水的蒸发会在预应力空心楼盖产生内部拉应力,最终导致裂缝产生。吕俊利等^[16-18]通过试验研究发现,相比混凝土实心楼盖,空心楼盖顶面具有更加明显的温度平台;空腔的阻热作用使混凝土空心楼盖沿厚度方向存在明显的温度滞后现象。韩重庆等^[19]进行了受约束预应力混凝土空心楼盖的耐火极限试验研究,发现孔洞温度明显高于相同深度混凝土的温度,持荷水平对温度场分布无明显影响。A.M. Shakya等^[20]的研究表明,火灾方案和持荷比对预制预应力混凝土空心楼盖耐火极限具有重要影响。

装配式建筑是当前国家大力推广的建造方式,其中装配式楼盖多采用PK预应力混凝土叠合板,周绪红等^[21]对预制混凝土叠合楼板足尺试件进行耐火试验,结果表明楼盖底面涂有粉刷层能够提高耐火性。B.Li等^[22]分别研究了明箱和暗箱两种装配整体式空心肋楼盖,发现暗箱楼盖具有更好的耐火性能。现代建筑对构件功能复合性提出更高要求,如楼盖等预制结构构件除保证安全外,尚应具备轻质、保温、隔热、隔声等使用功能,而PK预应力混凝土叠合板相对单一的承重属性已不能满足需求。

提出了一种新型钢筋桁架装配式密肋楼盖体

系,该楼板体系的钢筋骨架由纵横两个方向的预制钢筋桁架拼装而成,相邻钢筋桁架间距均为 600 mm,桁架间填充预制泡沫混凝土块,形成密肋楼盖结构,最后浇筑混凝土形成楼盖面层,楼盖构造如图 1 所示。该楼盖的特点是预制率高,自重轻,相较于传统密肋楼盖,还兼有保温隔热隔声功能,可以满足装配式建筑要求的工厂化预制、现场拼装方便、功能多样等特点,为进一步了解该楼盖在火灾下的温度变化规律,本文通过试验研究不同区格形式楼盖试件在自然火灾下的温度变化和损伤情况。

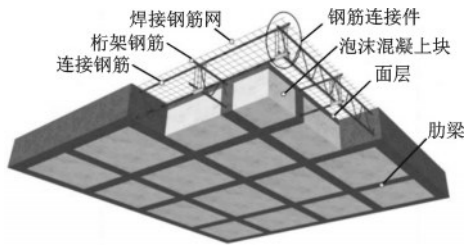


图 1 密肋楼盖结构示意图

Fig.1 Structure of waffle slab

1 试验概况

1.1 试件设计

试件共 2 个,分别命名为 NAWS-F1 和 NAWS-F2,考虑两种楼盖区格形式:3×3 和 2×2。三区格楼盖采用四边简支的约束条件,二区格楼盖采用四点简支的约束条件。横向桁架的上下弦钢筋直径均为 $\Phi 14$ mm,腹筋为 $\Phi 6$ mm,纵向桁架上下弦钢筋为 $\Phi 14$ mm,桁架间距为 600 mm;肋梁尺寸为 90 mm×170 mm(净高),现浇混凝土面层厚度为 50 mm,内设 $\Phi 6@150$ 钢筋网,保护层厚度均取为 20 mm。肋梁间预制泡沫混凝土块尺寸为 510 mm×510 mm×170 mm。边梁尺寸为 150 mm×220 mm。试件尺寸和配筋详细信息如图 2 所示。

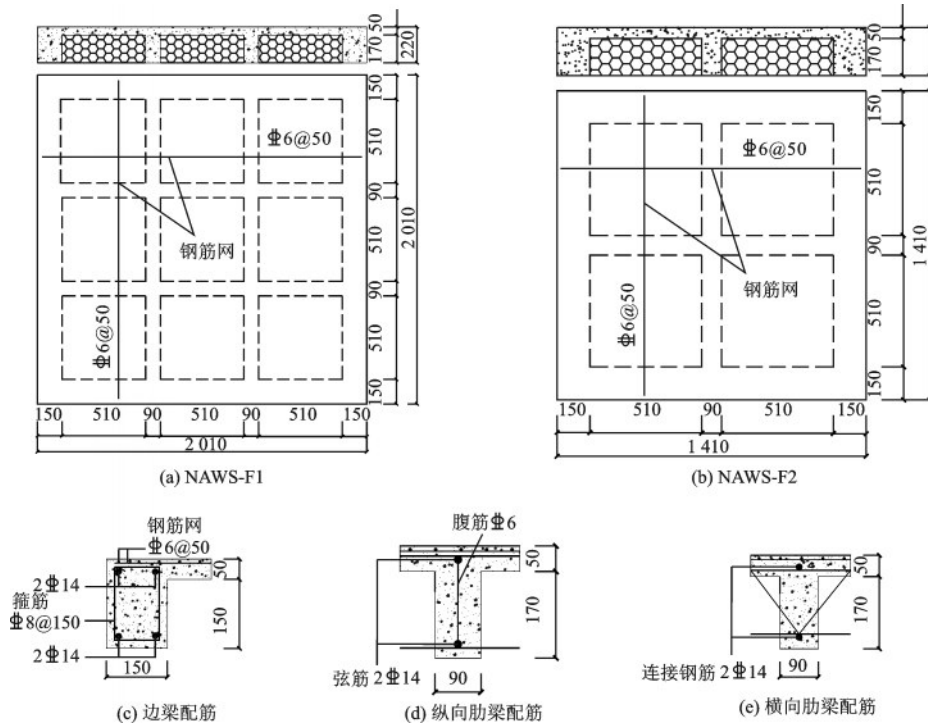


图 2 试件详图

Fig.2 Dimension and reinforcement arrangement of specimen

1.2 材料性能指标

试件所用钢筋均采用 HRB400,细石混凝土采用 C30。浇筑细石混凝土的同时预留三块边长 150 mm

的混凝土标准立方体试块,进行相同条件的 28 d 养护后,测量其极限抗压强度为 30 MPa;预留不同直径的钢筋各三根,长度 600 mm,测量其屈服强度与极限抗拉强度。钢筋的力学性能指标见表 1。

表1 钢筋的实测力学性能

Table 1 Mechanical properties of reinforcing steel

材料	直径/mm	弹性模量/ MPa	屈服强度/ MPa	极限抗拉 强度/MPa
钢材	14	2×10^5	448	550
	8	2×10^5	439	547
	6	2×10^5	451	561

1.3 试验装置

根据试件尺寸设计了两个火灾试验炉,尺寸分别为长1860 mm×宽1860 mm(炉壁轴线),炉壁高度为1100 mm。炉体采用耐火砖砌筑,炉壁厚240 mm,炉基高度300 mm,炉腔内壁全部覆盖岩棉防护。炉壁背面开设240 mm×200 mm排烟口。炉腔内放置焦炭和木材作为燃料以模拟自然火灾,根据《建筑设计防火规范》^[23]中对楼板耐火极限的规定,两个试件受火时间均不低于120 min,采用板底单面受火方式,试件顶面按照2.5 kN/m²活荷载放置砝码以模拟均布受力。火灾试验装置如图3所示。

1.4 测点布置

采用K型热电偶测量火灾下试件各部分的温

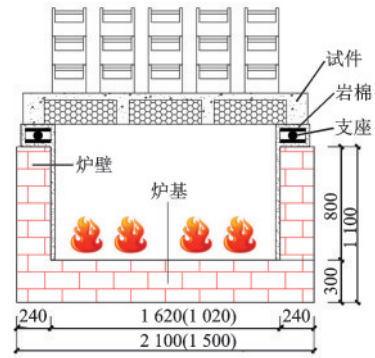


图3 NAWS-F1火灾试验装置

Fig. 3 Designed furnace of NAWS-F1

注:括号内为NAWS-F2试件尺寸

度变化。楼盖底部放置3个热电偶用于测量炉温,试件温度测点主要布置在肋梁跨中、肋梁节点、桁架钢筋、泡沫混凝土块中心等位置。NAWS-F1和NAWS-F2分别设置了13个和6个温度测点,每个测点均设置一组热力偶用于量测该位置试件不同高度处的温度,热电偶编号规则为CT/ST-X-Y,CT代表混凝土热电偶,ST代表钢筋热电偶,X代表测点编号,Y代表沿高度分布的热电偶编号。混凝土和钢筋的热电偶布置如图4所示。

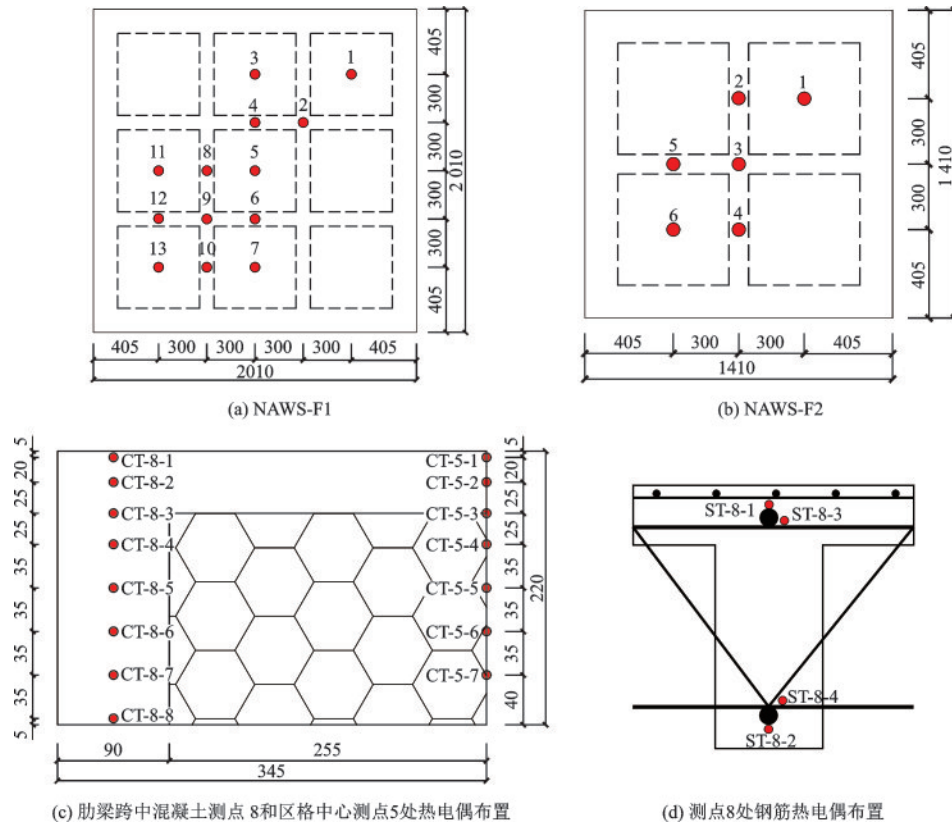


图4 热电偶布置

Fig.4 Thermocouple location for each tested waffle slabs

2 试验过程与现象

试件NAWS-F1在16 min时发出微响,板的四周侧壁出现少量水滴;17 min时,炉温出现持续下降;34 min时,四周边梁侧面出现裂缝;58 min时,边梁侧面裂缝向上发展;受火时间为170 min,此时边梁侧面裂缝数量明显增多,并沿梁高斜向上发展,之后停止燃烧,自然冷却至室温。在整个火灾试验过程中,板顶无水分溢出;边梁侧面出现较多细小斜裂缝,但未出现混凝土爆裂损伤。中间跨肋梁底部出现较多横向弯曲裂缝,边跨肋梁底部出现局部混凝土爆裂,试件中部泡沫混凝土块开裂较为严重。火灾后楼盖NAWS-F1如图5所示。



图5 火灾后楼盖NAWS-F1

Fig.5 Failure modes of post-fire NAWS-F1

试件NAWS-F2在13 min时四周侧壁出现水滴;27 min时边梁侧面出现竖向裂缝;37 min时边梁侧面出现沿裂缝分布的水线;77 min时,边梁侧面裂缝数量增加。整个火灾试验受火时间为120 min,之后停止燃烧,自然冷却至室温。板顶始终无水分溢出,仅边梁侧面出现细小竖向裂缝。火灾后板角形成交叉裂缝,泡沫混凝土块出现沿对角线的交叉裂缝。火灾后楼盖NAWS-F2如图6所示。



图6 火灾后楼盖NAWS-F2

Fig.6 Failure modes of post-fire NAWS-F2

3 温度分析

3.1 炉温分析

在整个火灾试验过程中炉腔温度发展经历了急剧升温、缓慢升温、完全燃烧、快速降温和缓慢降温五个阶段。采用木材和焦炭作为混合燃料模拟自然火灾,木材点火后炉内温度迅速升高,但由于焦炭燃点较高,待炉温升至600℃左右,木柴燃烧殆尽,焦炭还未充分燃烧,因此炉温增长速度变缓,温升曲线变缓,NAWS-F1由于炉腔较大,焦炭初始投放量偏少,甚至造成17 min时炉温出现一定时间下降段;当焦炭完全燃烧后炉温又开始快速上升,达到预期受火时间后停止燃料投放,然后待火焰熄灭后浇水降温,该阶段炉温急剧降低,当炉温降低到100℃左右时采取自然冷却,炉温下降变缓。两个试件的炉温随时间发展曲线如图7所示。

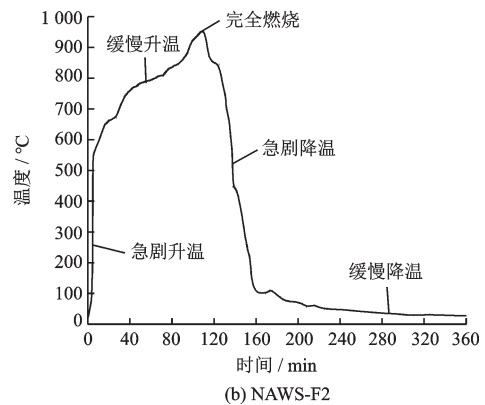
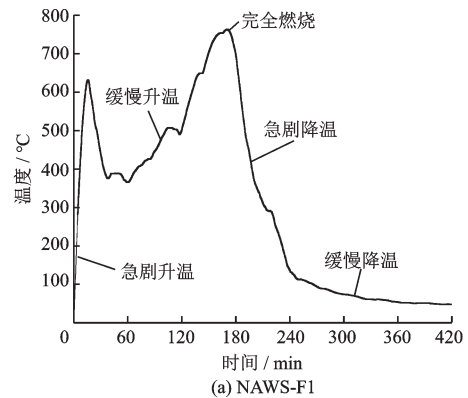


图7 炉温时程曲线

Fig.7 Time history curves of furnace temperature

3.2 混凝土温度分析

热电偶量测数据显示,楼盖混凝土温度沿肋梁

高度方向呈非线性分布,距离板底越近,温度梯度越大。由于楼板较厚,整个受火过程中仅在边梁外侧面发现混凝土毛细孔水和凝胶水等水分的蒸发,板顶未出现溢水蒸发现象,因此温度曲线中未出现普通楼板常见的100℃温度平台。NAWS-F1混凝土典型测点温度随时间发展曲线如图8(a)所示。板底温度变化较大,但较炉温仍存在显著滞后。当炉温在17 min达到600℃时,测点9最下层8号热电偶(距离板底5 mm)显示温度200℃以下,但此后混凝土温度呈现单调增长,未出现炉温的下降段,最高温度达630℃;7号热电偶距离板底40 mm,该点的混凝土温度发展曲线与8号相近,但增长速度较慢,且峰值温度不到300℃。其它位置处的温度变化规律基本一致,曲线较为平缓,峰值温度基本在100℃以内。

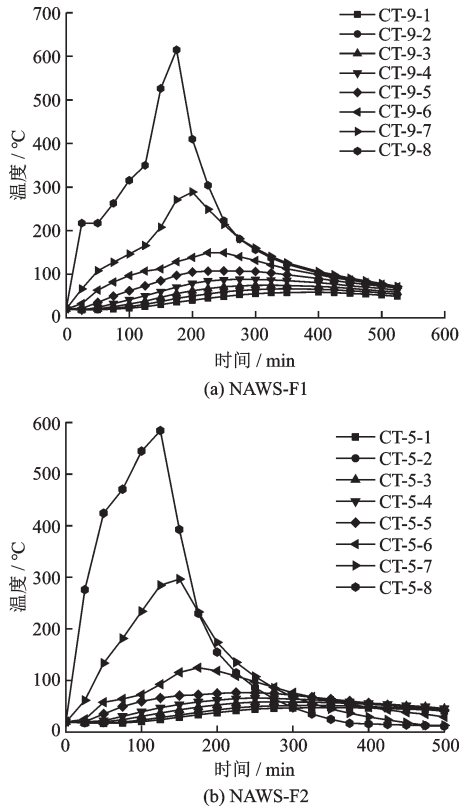


图8 混凝土温度

3.3 泡沫混凝土温度

泡沫混凝土块的温度—时间曲线如图9所示,由于泡沫混凝土的热惰性,在整个受热过程中泡沫混凝土块各位置温度较肋梁混凝土均低,沿泡沫块

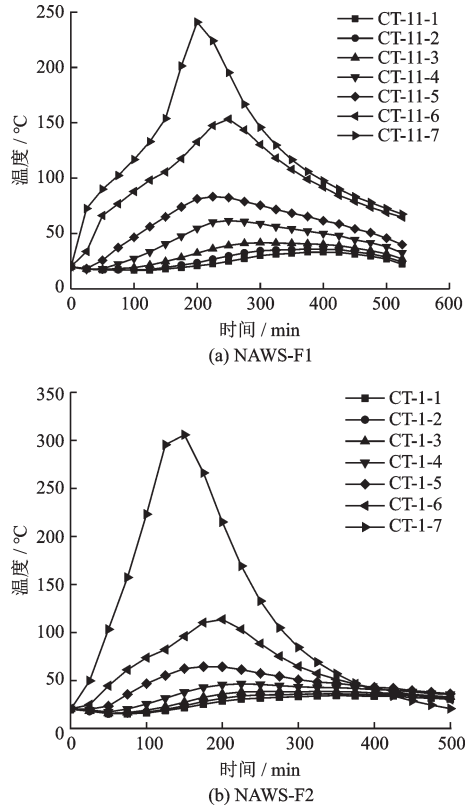


图9 泡沫混凝土温度

Fig.9 Time history curves of foamed concrete temperatures

厚度方向温度梯度较为明显,距板底75 mm以上部分泡沫块的温度稳定在100℃以下,泡沫块背火面温度保持在40℃以下,说明泡沫混凝土的隔热效果明显。

3.4 钢筋温度

钢筋温度随时间变化如图10所示,每个测点位置设有4个钢筋热电偶,分别量测桁架节点处双向上下弦钢筋的温度(图4(d)),从图中可以看出,下弦钢筋的温度明显高于上弦,且曲线变化规律与相同高度处混凝土的温度曲线较为接近,但温度值则较混凝土低很多。NAWS-F1在测点9处钢筋最高温度为380℃,而混凝土最高温度则达到630℃。上弦钢筋温度变化基本一致,在受火60 min前与混凝土的温度变化规律相似,温度滞后现象更明显,原因是混凝土具有热惰性,传导热量较慢,故而被其包裹的钢筋温度上升需要较长的过程;达到最高温度后停止受火,肋梁底部钢筋温度迅速下降,降温至100℃后速度变缓。

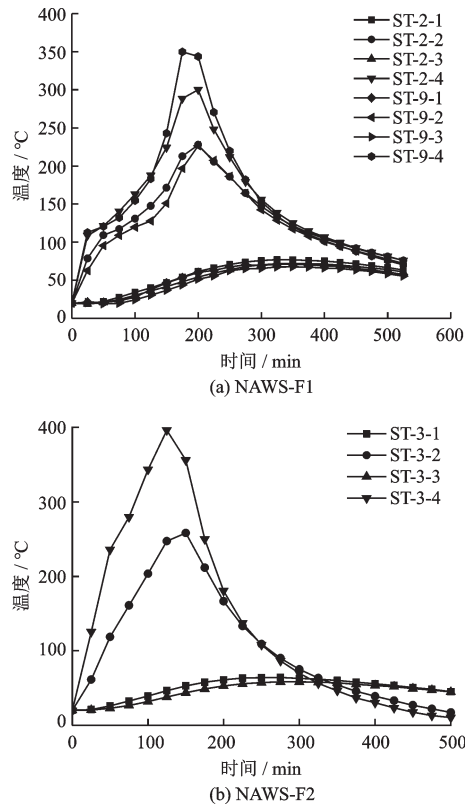


图10 钢筋温度

Fig.10 Time history curves of reinforcing steel temperatures

4 有限元模拟

为全面掌握该类楼盖在火灾作用下的温度变化规律,在实验的基础上利用 ABAQUS 软件建立温度场分析模型,开展数值分析。

4.1 模型建立

混凝土采用八结点三维实体热分析单元 DC3D8,钢筋采用热分析杆单元 DC1D2。将钢筋嵌入到混凝土中(Embedded)。采用试验实测得到的炉温曲线进行升温,受火形式为楼盖底面单面受火。热量传递主要考虑热辐射和热对流,定义受火面的对流系数为 $1\,500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,背火面的对流换热系数取 $540\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,热辐射系数取 0.5,绝对零度取为 $-273.15\text{ }^\circ\text{C}$ 。

在进行热模拟分析时,混凝土和钢材的热工性能参数参照欧洲规范^[24]进行计算;泡沫混凝土的热工性能参数根据《泡沫混凝土应用技术规程》^[25]进行计算,导热系数取为 $0.3\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,比热取为 $1500\text{ J}/(\text{C}\cdot\text{kg})$,密度取为 $800\text{ kg}/\text{m}^3$ 。材料热工性能详见表 2 和表 3。

表 2 混凝土热工参数

Table 2 Thermal parameters of concrete

热工参数	表达式
导热系数	$\lambda_c = 0.012\left(\frac{T}{120}\right)^2 - 0.24\left(\frac{T}{120}\right) + 2$ $20\text{ }^\circ\text{C} \leq T < 1\,200\text{ }^\circ\text{C}$
比热	$C_c = -4\left(\frac{T}{120}\right)^2 + 80\left(\frac{T}{120}\right) + 900$ $20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 1\,200\text{ }^\circ\text{C}$
密度	$\rho = 2\,400$

表 3 钢材热工参数

Table 3 Thermal parameter of reinforcing steels

热工参数	表达式
导热系数	$\lambda_s = \begin{cases} 54 - 3.33 \times 10^{-2}T & 20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 800\text{ }^\circ\text{C} \\ 27.3 & 800\text{ }^\circ\text{C} < T \leq 1\,200\text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$
比热	$C_s = \begin{cases} 425 + 7.73 \times 10^{-1}T - 1.69 \times 10^{-3}T^2 + 2.22 \times 10^{-6}T^3 & 20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 600\text{ }^\circ\text{C} \\ 666 - 13\,002/(T - 738) & 600\text{ }^\circ\text{C} < T \leq 735\text{ }^\circ\text{C} \\ 545 + 17\,820/(T - 731) & 735\text{ }^\circ\text{C} < T \leq 900\text{ }^\circ\text{C} \\ 650 & 900\text{ }^\circ\text{C} < T \leq 1\,200\text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$
密度	$\rho = 7\,850$

注: T 为温度, $^\circ\text{C}$; λ_s 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$; C_s 为比热, $\text{J}/(\text{C}\cdot\text{kg})$; ρ 为密度, kg/m^3

4.2 截面温度场

温度场模拟结果如图 11 所示,从图中可以看出,火灾中楼盖具有非线性温度场和较大的温度梯度,且越靠近板底温度梯度越大;与试验结果基本一致。混凝土、钢筋、泡沫混凝土各部分的模拟温度变化与试验结果的对比分别见图 12,有限元模型

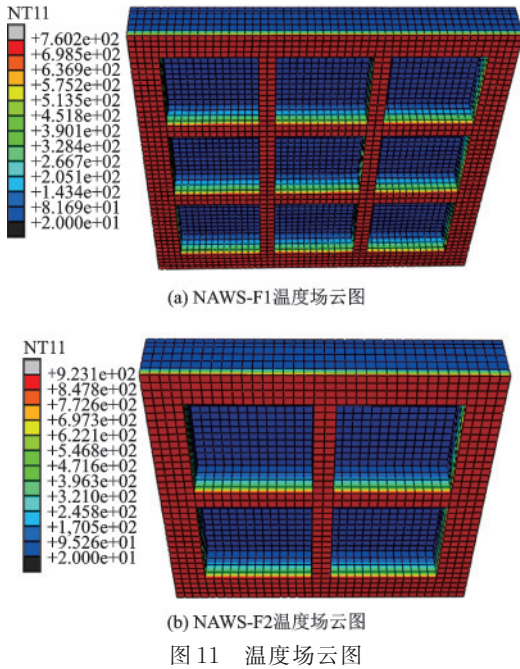


Fig.11 Temperature contour of FE models

与试验实测的温度变化规律基本吻合,说明了有限元模型的有效性,但二者仍有偏差,总体来看模拟数值高于试验温度,原因如下:(1)实际火灾试验炉难以达到完全理想的密封效果,试验过程中出现部分热量散失,导致部分位置温度偏低;(2)火灾试验中燃料主要集中在炉膛中间,燃料分批投放,投放数量和时间间隔不均匀,以上因素造成试验炉内存在一定程度的热量分布不均,而有限元模型中则认为炉内温度场均匀;(3)试验过程中使用人工控制的鼓风机以达到迅速升温效果,炉内气流不均匀也易导致热量分布不均,造成局部温度产生波动。

4.3 参数分析

为进一步分析不同结构形式和受火工况下该类楼盖的温度场分布和火灾响应,利用建立的火灾数值分析模型,按照 NAWS-F1 试件的基本信息,以下分别对不同楼盖厚度和受火时间开展参数化分析。

4.3.1 楼盖厚度

考虑三种楼盖厚度:190、220、250 mm,三种情况下楼盖现浇层厚度均为 50 mm,采用本次试验实测的升温曲线进行受火分析。分别选取肋梁跨中点 CT-4-1、CT-4-3 和泡沫混凝土块中心点 CT-11-1、CT-11-3 处等位置(如图 4 所示)进行温度时程分析。

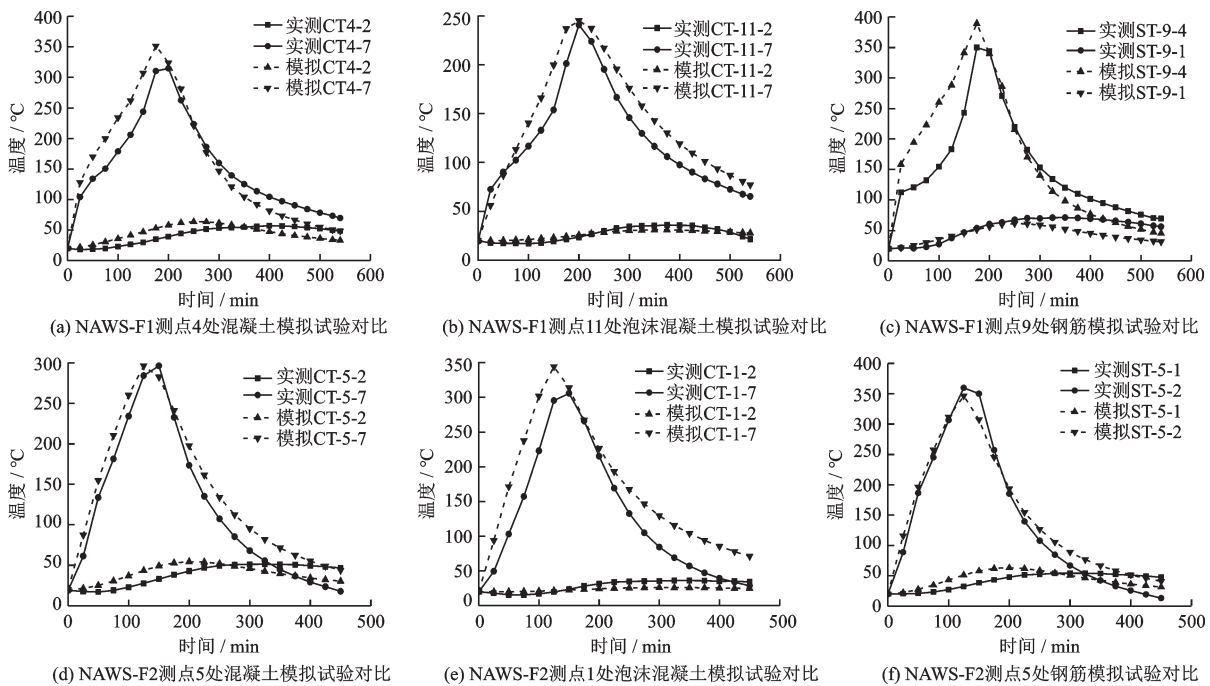


图 12 温度模拟与试验对比

Fig.12 Temperature comparison of simulation results and experiment data

三种楼盖厚度下上述位置温度变化对比如图 13 所示。从图 13(a)可以看出,楼盖厚度越大,距离楼盖顶部相同高度处的肋梁温度越低,达到温度峰值的时间越晚,在随后的熄火降温阶段温度下降相对缓慢。三种楼盖厚度下,楼盖现浇层顶部的温度相差不大,峰值温度基本都保持在 30℃以下,且在整个受火过程中变化很小。

由于泡沫混凝土良好的隔热性能,从图 13(b)可以看出,三种楼盖厚度下泡沫混凝土块顶部的温度均较小,在经受高温 300 min 后才由室温 20℃升高到峰值 30℃左右,存在较为明显的温升滞后现象。尽管图中曲线差异较为明显,但三种情况下顶部温度的绝对值差别没有超过 10℃。三种厚度下泡沫混凝土块上部的面层温度变化更小,在整个受热过程中基本保持在 23℃以内。楼盖厚度对泡沫混凝土块区域的温度变化影响基本可以忽略。

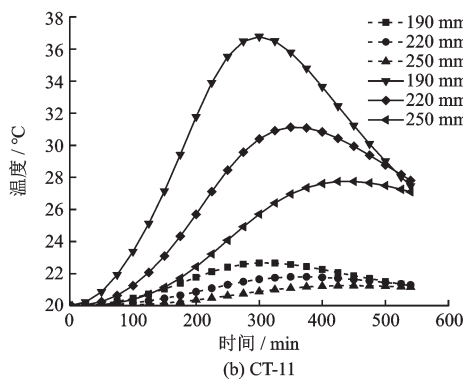
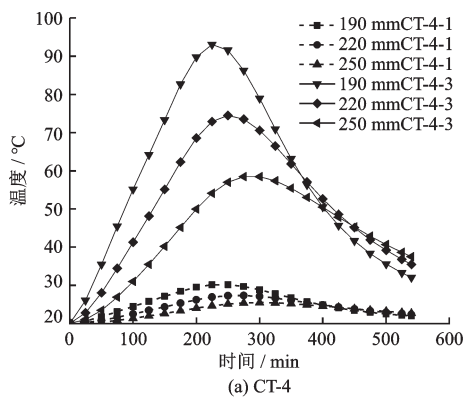


图 13 楼板厚度影响

Fig.13 Effect of slab height on time-history temperatures

4.3.2 受火时间

根据《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014 (2018 版))^[23] 的相关规定,考虑不同耐火极限下该类楼盖受火时间分别为 1 h 和 1.5 h,模型楼盖厚度为 220 mm。为便于比较,在本参数分析中采用

ISO834 升温曲线进行受热分析,考查不同受火时间对楼盖温度场的影响,测点位置选取肋梁跨中点 CT-4 和泡沫混凝土块中点 CT-11,分别考察距离板底 110 mm 和 170 mm 高度处的温度变化。

两类受火时间下上述位置的温度对比曲线见图 14。肋梁距离板底 110 mm 高度处在受火 60 min 时的温度为 77℃,而受火 90 min 时升至 119℃,增幅 55%;而距离板底 170 mm 高度处则由 33℃升至 48℃,说明越靠近板底温升越快,且两处的温度随受火时间基本呈线性发展。泡沫混凝土块距离板底 110 mm 高度处的温度与肋梁距离板底 170 mm 高度处的温度变化基本一致,而 170 mm 高度处的温度基本保持在室温,说明该点温度不受过火时间影响。

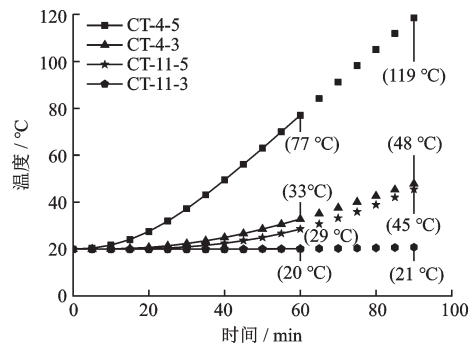


图 14 受火时间影响

Fig.14 Effect of fire duration on time-history temperatures

5 结论

本文针对一种钢筋桁架装配式密肋楼盖,进行了自然火灾下的试验研究和温度场数值分析,掌握了该类楼盖的火灾行为,并得出以下结论:

(1) 在经历了 2 h 自然火灾作用后,楼盖结构未发生严重损伤和过大变形,泡沫混凝土块未脱落,具有良好的抗火性能。

(2) 相比较于炉温,混凝土和钢筋的温度存在明显的温升滞后效应,火灾下肋梁混凝土温度场呈非线性变化规律,沿楼板高度出现明显的温度梯度,且越靠近板底温度梯度越大。

(3) 通过与对比试验结果比较,有限元热分析模型具有良好的适用性,能够较准确地预测该类楼盖在火灾作用下的温度场变化规律。

参考文献:

- [1] 朱崇绩,董毓利,朱崇钊.足尺平板无梁楼盖抗火性能试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(3):12-19.
Zhu C J, Dong Y L, Zhu C Z. Experimental study on fire resistance properties of full-scale flat-plate floor subjected to fire[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(3):12-19. (in Chinese)
- [2] Hawileh R A, Kodur V K R. Performance of reinforced concrete slabs under hydrocarbon fire exposure[J]. Tunneling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2018, 77: 177-187.
- [3] Wang Y, Yuan G L, Huang Z H, et al. Experimental study on the fire behaviour of reinforced concrete slabs under combined uni-axial in-plane and out-of-plane loads [J]. Engineering Structures, 2016, 128:316-332.
- [4] Wang Y, Duan Y K, Ma Sh, et al. Behaviour of continuous reinforced concrete floor slabs subjected to different compartment fires [J]. Engineering Structures, 2019, 197:109445.
- [5] 王新堂,周明,王万祯.轻骨料混凝土组合楼板的火灾响应及火灾后性能研究[J].自然灾害学报,2012,21(2):200-206.
Wang X T, Zhou M, Wang W Z. Study on fire response and post-fire behavior of lightweight aggregate concrete composite floor [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(2):200-206. (in Chinese)
- [6] Li G Q, Zhang N S, Jiang J. Experimental investigation on thermal and mechanical behaviour of composite floors exposed to standard fire [J]. Fire Safety Journal, 2017, 89:63-76.
- [7] 吴波,段静,文波.新型防火涂料的研制及再生混合组合楼板的耐火性能试验[J].土木工程学报,2014,47(2):82-92.
Wu B, Duan J, Wen B. Preparations of new fireproof coating and fire-resistance tests on composite slabs filled with demolished concrete blocks and fresh concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(2):82-92. (in Chinese)
- [8] 吕俊利,董毓利,杨志年.整体结构中两跨钢梁火灾变形性能的试验研究[J].工程力学,2012,29(3):110-114.
Lyu J L, Dong Y L, Yang Z N. Experimental study on the deformation of a two-span steel beam in a structural system subjected to fire [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3):110-114. (in Chinese)
- [9] 王勇,董毓利,彭普维,等.足尺钢框架结构中楼板受火试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(8):1-11.
Wang Y, Dong Y L, Peng P W, et al. Fire test on floor of full-scale steel-framed structure [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(8):1-11. (in Chinese)
- [10] 杨志年,董毓利.钢框架结构中钢筋混凝土双向板火灾试验研究[J].工程力学,2013,30(4):337-344.
Yang Z N, Dong Y L. Experimental study of two-way reinforced concrete slab subjected to fire in a steel-framed building [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4):337-344. (in Chinese)
- [11] 李兵,董毓利,姜永杰,等.足尺钢框架中连续板格火灾实验研究[J].工程力学,2015,32(1):145-153.
Li B, Dong Y L, Lou Y J, et al. A fire test of continuous panels in a full-scale steel-framed structure [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(1):145-153. (in Chinese)
- [12] Li B, Dong Y L, Zhang D S. Fire behaviour of continuous reinforced concrete slabs in a full-scale multi-storey steel-framed building [J]. Fire Safety Journal, 2015, 71: 226-237.
- [13] Nguyen T T, Tan K H, Burgess I W. Behaviour of composite slab-beam systems at elevated temperatures: Experimental and numerical investigation [J]. Engineering Structures, 2015, 82:199-213.
- [14] Tan K H, Nguyen T T. Experimental and numerical evaluation of composite floor systems under fire conditions [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 105:86-96.
- [15] Mazen A M. A case study on fire damage assessment of a two-story building with precast pretensioned hollow core slabs [J]. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 2020, 32(8):501-509.
- [16] 吕俊利,仲崇强,赵考重,等.四边简支现浇混凝土空心楼盖火灾试验研究[J].山东建筑大学学报,2017,32(5):421-425,441.
Lyu J L, Zhong C Q, Zhao K Z, et al. Study on test of fire resistance of simply supported on four sides of cast-in-place concrete hollow floor [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2017, 32(5):421-425,441. (in Chinese)
- [17] 吕俊利,仲崇强,赵考重,等.柱支承现浇混凝土空心楼盖抗火性能试验研究[J].山东建筑大学学报,2018,33(5):36-41.
Lyu J L, Zhong C Q, Zhao K Z, et al. Experimental

- study on fire resistance of column supported cast-in-situ concrete hollow floor[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2018, 33(5):36-41. (in Chinese)
- [18] Lyu J L, Wang Y, Van CoileRuben, et al. Experimental investigation on the fire resistance of cast-in-situ hollow core concrete slabs constructed using filler boxes and an assembly box system[J]. Structural Concrete, 2019, 20:144-163.
- [19] 韩重庆,许清风,李梦南,等.受约束预应力混凝土空心板整浇楼面耐火极限试验研究[J].建筑结构学报, 2018, 39(5):52-62.
Han C Q, Xu Q F, Li M N, et al. Experimental research on fire endurance of PC hollow-core slab integrated floor with constraints[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5):52-62. (in Chinese)
- [20] Shakya A M, Kodur V K R. Response of precast prestressed concrete hollow-core slabs under fire conditions [J]. Engineering Structures, 2015, 87: 126-138.
- [21] 周绪红,邓利斌,吴方伯,等.预制混凝土叠合楼板耐火性能试验研究及有限元分析[J].建筑结构学报, 2015, 36(12):82-90.
Zhou X H, Deng L B, Wu F B, et al. Experimental research and FEA on fire resistance performance of precast concrete composite slabs [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12):82-90. (in Chinese)
- [22] Li B, Lin Y Q, Zhang H L, et al. Fire behavior of the assembled monolithic hollow-ribbed slabs[J]. Advances in Civil Engineering, 2019(1):1-10.
- [23] 建筑设计防火规范:GB 50016—2014[S].北京:中国建筑工业出版社, 2018.
- [24] BS ENV 1991-1-2: 2002, Eurocode 1: Actions on structures-Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire[S].
- [25] 泡沫混凝土应用技术规程:JGJ/T 341—2014[S].北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- (本文责编:周小潭)



(上接第 361 页)

- Yu Y, Luo Y Z. Structural collapse analysis based on finite particle method II: key problems and numerical examples [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 27-35. (in Chinese)
- [17] Wood G S, Kwok K C S, Motteram N A, et al. Physical and numerical modelling of thunderstorm downbursts [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(6): 535-552.
- [18] Holmes J D, Oliver S E. An empirical model of a downburst[J]. Engineering Structures, 2000, 22(9): 1167-1172.
- [19] Chen L Z, Letchford C W. A deterministic - stochastic hybrid model of downbursts and its impact on a cantilevered structure [J]. Engineering Structures, 2004, 26(5): 619-629.
- [20] Chay M T, Albermani F, Wilson R. Numerical and analytical simulation of downburst wind loads [J]. Engineering Structures, 2006, 28(2): 240-254.
- [21] 李士锋,李宏男,张卓群,等.强风荷载作用下输电线路的连续倒塌破坏分析[J].防灾减灾工程学报, 2017, 37(5): 835-841.
Li S F, Li H N, Zhang Z Q, et al. Power transmission line progressive collapsed analysis under strong wind load [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(5): 835-841. (in Chinese)
- [22] 张文福,计静.下击暴流空间相关性风场模拟[J].振动与冲击, 2013, 32(10): 12-16, 35.
Zhang W F, Ji J. Simulation of downburst wind field with spatial correlation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(10): 12-16, 35. (in Chinese)
- [23] 喻莹,谭长波,金林,等.基于有限质点法的单层球面网壳强震作用下连续倒塌破坏研究[J].工程力学, 2016, 33(5): 134-141.
Yu Y, Tan C B, Jin L, et al. Research on seismic progressive collapse of single-layer reticulated dome using the finite particle method [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 134-141. (in Chinese)