

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202104059



两长边简支和两短边固支钢筋混凝土双向矩形板的火灾行为试验

朱三凡, 董毓利, 段进涛

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 进行两对边简支、两对边固支钢筋混凝土双向板在恒载-升温工况下火灾试验,研究板内混凝土和钢筋的温度场变化、板平面内的竖向变形、板平面外的水平位移,以及板边绕支承轴线转角变化的情况.描述和分析双向板在火灾下的宏观现象和破坏特征,并与同轴线尺寸的其他 3 种边界条件双向板进行对比.试验结果表明:板面裂缝整体成椭圆裂缝,板中区域沿长跨、短跨方向均存在多条较大裂缝,板面裂缝由固支边中部区域横向裂缝与固支边角部密集的环形斜裂缝组成;板内存在明显的温度梯度,形成非线性温度场;在升温过程中,板平面外位移整体呈现非线性趋势、板中部位移较大;而在降温过程中,板中位移回弹明显,板中竖向位移与炉温快速下降的变化趋势不一致,出现较长的水平段;整个升温过程中,混凝土板边持续向外膨胀,固支边位移较简支边位移变化小;简支边转角随着受火时间不断增大、整体较大.

关键词: 足尺抗火试验; 钢筋混凝土双向板; 两对边简支; 两对边固支; 破坏特征

中图分类号: TU 352.503; TU 375.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2022)04-0461-12

Fire Behaviorresearch of Rectangular Reinforced Concrete Two-Way Slabs Simply Supported on Two Long Sides and Fixed on Two Short Sides

ZHU Sanfan, DONG Yuli, DUAN Jintao

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The fire tests of reinforced concrete two-way slabs with simple supports, fixed supports on two opposite sides under dead load and temperature rise conditions were carried out. The variations of temperature field of concrete and reinforcement in the slab, the vertical deformation in the slab plane, horizontal displacement out of the slab plane and rotation angle of the slab side around the support axis were studied. The macroscopic phenomena and failure characteristics of two-way slabs under fire were described and analyzed, and compared with other three boundary conditions of the two-way slab with the same axial line size. The test results show that the slab surface cracks are elliptical as a whole, and there are many large cracks in the middle area of the slab along the long-span and short-span directions. On the slab surface, there exist transverse cracks in the middle area of the fixed support side and dense annular oblique cracks in the corners of the fixed support side; there is an obvious temperature gradient in the slab, forming a nonlinear temperature field; in the process of heating up, the out of plane displacement of the slab shows a nonlinear trend as a whole, and the displacement in the middle of the slab is large; and during the cooling process, the rebound of displacement in the slab is

收稿日期: 2021-04-27

通信作者: 董毓利(1965-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事混凝土结构抗火性能的研究. E-mial: dongyl@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778250)

obvious, and the change trend of vertical displacement in the slab is inconsistent with the rapid decline of furnace temperature, and a long horizontal section appears; during the whole heating process, the concrete slab side continues to expand outward, and the displacement of fixed support side is smaller than that of simple support side; the rotation angle of simply supported side increases with the fire time, and the whole value is large.

Keywords: full-scale fire resistance test; reinforced concrete two-way slab; simply support on two opposite sides; fixed support on two opposite sides; failure characteristics

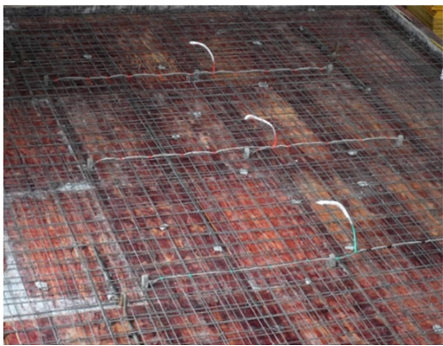
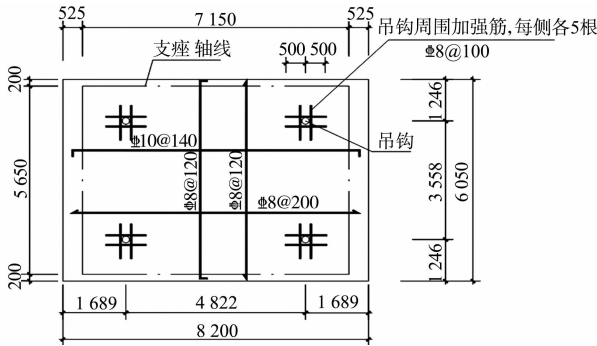
火灾时,钢筋混凝土板受到高温的作用,其变形发展较快,而且挠度一般是板厚的数倍,此时混凝土板的受拉薄膜效应对结构抗火性能有着重要的影响。王滨等^[1]对四边固支、四边简支的足尺双向板进行了结构抗火试验研究;文献[2-7]分别对两邻边固支,两邻边简支,三边简支、一边固支,三边固支、一边简支,以及两短边简支、两长边简支的足尺双向板进行了结构抗火试验研究,其中三边简支、一边固支双向板,三边固支、一边简支,以及两短边简支、两长边简支试验与本文中试验为相同支承轴线尺寸;朱崇绩等^[8]对柱支承的足尺无梁楼盖双向板进行了结构抗火试验。这些试验发现不同支承条件对混凝土的破坏形式、受拉薄膜效应及承载力等有显著影响。

鉴于此,本文通过对两长边简支、两短边固支的足尺双向板火灾试验,分析受火过程中双向板板内混凝土温度场分布规律、上下层钢筋温度变化情况、板平面内竖向变形情况、板平面外水平位移情况、板边绕支承轴线转角情况、板顶面裂缝开展与分布情况。

1 试验概况

1.1 试件设计

根据国家标准《混凝土结构设计规范:GB 50010—2010》要求^[9],设计了两块混凝土双向板(ES4-1和 ES4-2,混凝土强度为 C30)。试件尺寸为 8 200 mm×6 050 mm×120 mm,配筋情况如图 1 所示。



(a) 配筋图 (b) 钢筋配置实景
图 1 两长边简支和两短边固支混凝土板配筋(单位:mm)

Fig.1 Reinforcement of concrete slabs simply supported on two long sides and fixed on two short sides (unit: mm)

1.2 火灾试验炉

图 2 为火灾试验炉示意图。试验炉周边支承轴线尺寸为 7.15 m×5.65 m,燃烧空间尺寸长为 6.55 m、宽为 5.05 m、高为 1.5 m,可完成不同约束双向板的火灾试验。试验中不用配套反力架,由荷载块施加均布荷载。试验炉周边设有每延米 500 kN 的反力槽,利用拉杆和地槽可实现嵌固端约束。

1.3 加载方案

按照《混凝土结构试验方法标准:GB/T 50152—2012》^[10]进行支座设置及嵌固端装置设计,如图 3 所示。试验时,根据《建筑结构荷载规范:GB 50009—2012》^[11]的办公荷载,用标准荷载块施加 2.0 kPa 的均布活荷载;然后,根据《混凝土结构试验方法标准:GB/T 50152—2012》逐级施加荷载完毕,持荷 30 min 后开始进行火灾试验,试验曲线按国际标准 ISO-834 规定进行,升温过程由系统自动控制。

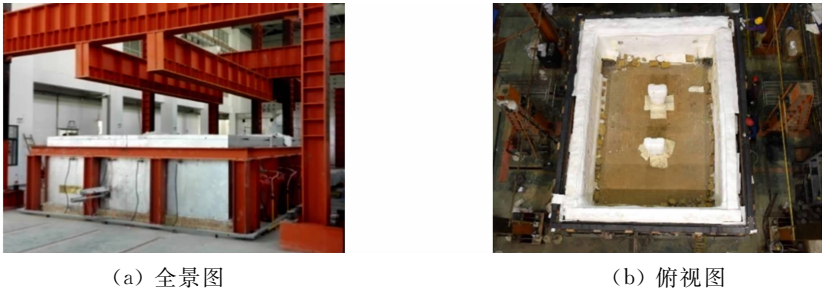


图 2 火灾试验炉照片
Fig. 2 Fire test furnace photo

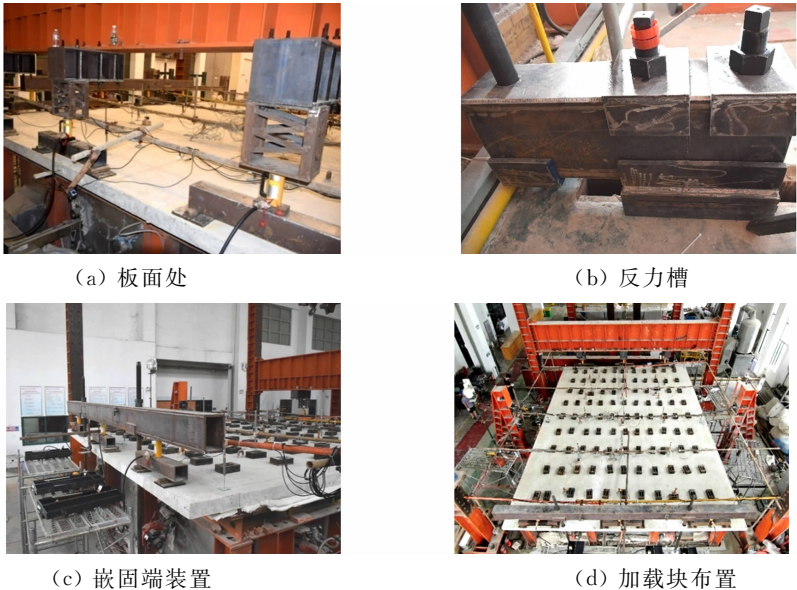


图 3 嵌固端装置图及加载块布置图
Fig. 3 Fixed side setup and loading block layout

1.4 温度测量

温度采集采用安捷伦数据采集仪,热电偶采用 K 型热电偶. 在混凝土板轴线范围内布置有 9 个温度测点,每测点处沿板截面厚度方向预埋 7 个热电偶;上下层钢筋各 1 个,共 2 个热电偶. 板内热电偶布置,如图 4 所示.

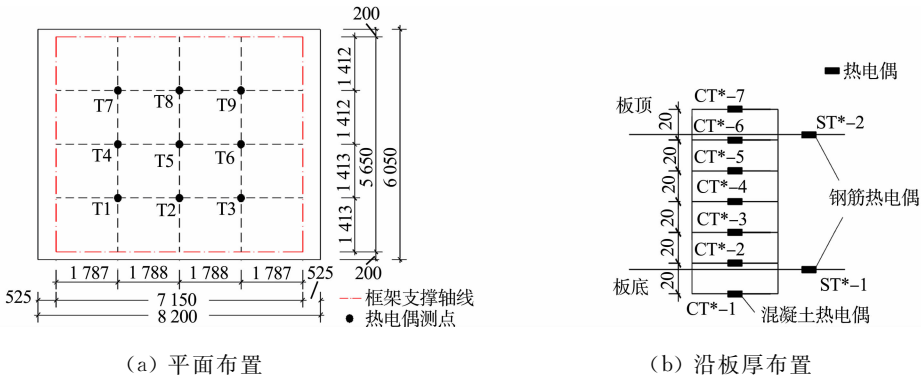


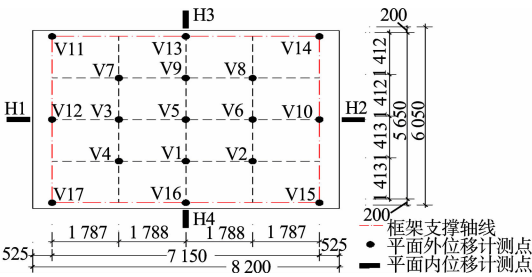
图 4 板内热电偶布置图(单位:mm)
Fig. 4 Layout of thermocouple in slab (unit: mm)

1.5 位移测量

混凝土板平面内(外)位移由差动式位移传感器和配套的 DH3816N 进行采集,每块板共布设 17 个平面外竖向位移测点、4 个平面内水平位移测点,如图 5 所示.

1.6 转角测量

转角测试采用高精度电子倾角仪,共 4 个测点(R1~R4),布置在各混凝土板支承轴线位置中点处,



(a) 布置图

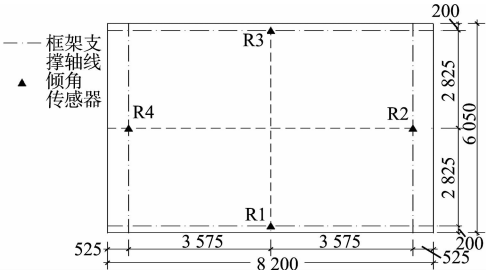


(b) 实景图

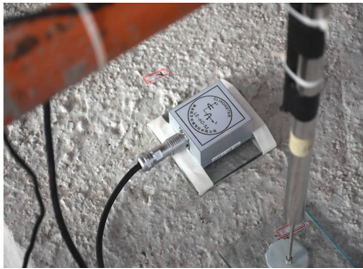
图 5 位移测点布置图(单位:mm)

Fig. 5 Displacement measuring points layout (unit: mm)

如图 6 所示.



(a) 布置图



(b) 实景图

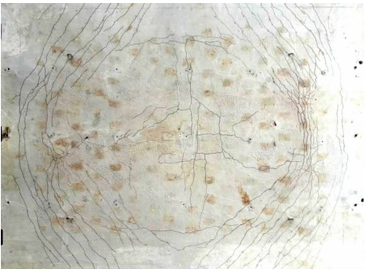
图 6 转角测点布置图(单位:mm)

Fig. 6 Angle measuring points (unit: mm)

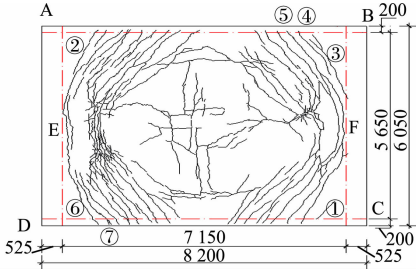
2 试验结果与分析

2.1 试验现象

受火后,ES4-1 板和 ES4-2 板的板面裂缝情况,分别如图 7,8 所示.



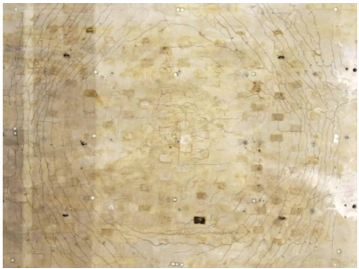
(a) 板面裂缝实景



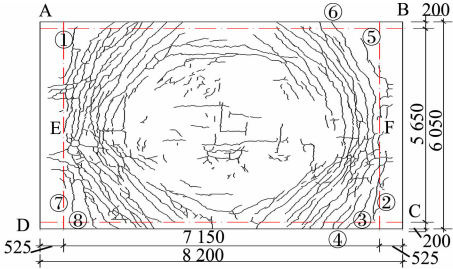
(b) 板面裂缝分布图(单位:mm)

图 7 受火后 ES4-1 板的板面裂缝变化情况

Fig. 7 Surface cracks of ES4-1 slab after fire



(a) 板面裂缝实景



(b) 板面裂缝分布图(单位:mm)

图 8 受火后 ES4-2 板的板面裂缝变化情况

Fig. 8 Surface cracks of ES4-2 slab after fire

从图 7 可知:受火 7 min 时,在 ES4-1 板的板角 C 出现第 1 条斜裂缝(图 7 中①,最大缝宽 0.31

mm);受火 8 min 时,板角 A 处出现 1 条斜裂缝(图 7 中②,最大缝宽 0.24 mm);受火 9 min 时,试验板开始出现持续的爆裂声;受火 10 min 时,板角 B 处出现 3 条斜裂缝(图 7 中③,④,⑤,最大缝宽依次为 0.23,0.28,0.20 mm),裂缝处开始向外冒水蒸汽;受火 11 min 时,板角 D 处出现 2 条斜裂缝(图 7 中⑥,⑦,最大缝宽依次为 0.24,0.20 mm),板角斜裂缝逐渐延伸与固支边轴线处裂缝贯通;受火 15 min 时,裂缝(图 7 中③,④,⑤,⑦)开始向外渗水,同时伴有水蒸气;随着板温度升高,已有裂缝宽度逐渐增大、发展并出现一些新裂缝;受火 22 min 时,在试验板板中出现大范围出水,板中部范围出现明显下挠,水向板中心聚集,此时不断出现爆裂声;受火 27 min 时,试验板板中出水范围进一步扩大,有少量大团气冒出;受火 30 min 时,试验板四角出现翘曲,板各侧面均出现板底向上开展的竖向裂缝、但均尚未开展至板面;受火 35 min 时,试验板板中水汽逐渐增多,板侧裂缝沿厚度均已贯通;受火 120 min 时,试验板四周水分蒸干,仅有中心处有积水;当受火 210 min 时停火,板中心仍有积水未被蒸干;此时两固支边轴线处 E 点裂缝宽度为 3.4 mm、F 点裂缝宽度为 4.1 mm. 停火 4 h 后,板中心积水已蒸干,板面有水渍;与受火时相比,此时板顶面裂缝宽度、板中竖向位移均变小. 从图 7 可知:在试验板彻底冷却后,板面裂缝整体主要形成椭圆型,板中区域沿长跨、短跨方向均存在多条较大裂缝.

从图 8 可知:受火 6 min 时,在 ES4-2 板板角 A 出现第 1 条斜裂缝(图 8 中①,最大缝宽 0.12 mm);受火 7 min 时,试验板开始出现小的爆裂声,且密集出现;受火 8 min 时,板角 C 出现 3 条斜裂缝(图 8 中②,③,④,最大缝宽依次为 0.31,0.09,0.27 mm)、板角 B 出现 2 条斜裂缝(图 8 中⑤,⑥,最大缝宽依次为 0.40,0.20 mm);受火 10 min 时,板角 D 出现两条斜裂缝(图 8 中⑦,⑧,最大缝宽依次为 0.27,0.29 mm),板角斜裂缝逐渐延伸与固支边轴线处裂缝贯通;受火 12 min 时,在试验板板中裂缝处开始向外冒水;受火 18 min 时,试验板板面出水量增大,并伴有气泡;受火 23 min 时,板中部范围出现明显下挠,板面裂缝处出现较多水蒸气,板裂缝处出水向板中心聚集、汇集成片;受火 28 min 时,试验板中部出现较多积水,试验板爆裂声不如之前密集、但声音较大,大部分长斜裂缝均已贯通至板边;受火 33 min 时,试验板各板角均出现翘起、且侧面均出现竖向贯通裂缝;受火 33 min 时,出现一次较大的爆裂声;受火 38 min 时,试验板板角处水蒸气明显增加;受火 120 min 时,试验板四周水分蒸干,仅有中心处有积水. 当受火 210 min 时停火及停火 4 h 后,与 ES4-1 板的试验现象基本一致. 此时,两固支边轴线处 E 点裂缝宽度为 4.4 mm、F 点裂缝宽度为 3.8 mm. 从图 8 可知:待板冷却后,板面裂缝整体主要形成椭圆型,板中区域沿长跨、短跨方向均存在多条裂缝.

分析裂缝产生原因,可能是简支边在施加荷载及温度荷载作用下向上翘曲,受到固支边的约束作用后,在每个固支边与简支边的交接处出现斜向开裂;两固支边的负弯矩较大,双向板受火后,支承轴线位置板混凝土的上表面承受较大拉力导致开裂;在两固支边轴线处的混凝土出现开裂以后,板内力进行了重分布,其轴线内侧位置负弯矩增大,并导致相应位置出现开裂.

同轴线尺寸的 4 种不同边界条件双向板受火宏观现象及破坏特征对比^[5-7],如表 1 所示. 表 1 中:*l*

表 1 实验构件受火后宏观现象及破坏特征
Tab. 1 Macroscopic phenomena and failure characteristics of experimental components after fire

编号	边界类型	构件尺寸 $l \times b \times h /$ mm \times mm \times mm	板面	板底	板角
ES1 ^[5]	一长边固支、 三边简支	7 550 \times 6 375 \times 120	板面裂缝整体成 U 型(开口为固支对应的简支边),板中沿短跨方向存在多条横向主裂缝 ^[5]		
ES2 ^[6]	两长边固支、 两短边简支	7 550 \times 6 700 \times 120	板面裂缝整体成椭圆形裂缝,板中沿短跨方向存在多条横向主裂缝 ^[6]	1. 板面裂缝均由固支边中部区域横向裂缝与固支边角部密集的环形斜裂缝组成; 2. 板面向下凹陷成盆状	1. 板底未受火区出现放射状裂缝; 2. 板底多处区域发生严重爆裂,钢筋已露出
ES3 ^[7]	三边固支、 一短边简支	7 875 \times 6 700 \times 120	板面裂缝整体成 U 型(开口为简支边),板中沿短跨方向存在多条横向主裂缝 ^[7]		四角出现翘曲
ES4	两短边固支、 两长边简支	8 200 \times 6 050 \times 120	板面裂缝整体成椭圆裂缝,板中区域沿长跨、短跨方向均存在多条较大裂缝		

为长; b 为宽; h 为高. 从表 1 可知:边界条件是影响双向板受火破坏特征的决定因素. 温度升高致使混凝土板混凝土膨胀,固支边的约束作用较大,简支边并未存在约束,各种不同边界双向板板面所有裂缝均集中出现在固支边侧.

试验结束且试件彻底冷却后,将两块板吊起,板底裂缝及爆裂情况如图 9 所示. 由图 9 可知:板底中心区域未见明显裂缝,板底多处区域发生较严重爆裂,钢筋已露出. 此外,ES4-1 板底的最大爆裂深度达到 7 cm;而 ES4-2 板底的最大爆裂深度达到 6 cm.



图 9 双向板板底爆裂实景图
Fig. 9 Picture of bottom burst of two-way slab

2.2 炉温

ES4-1 板和 ES4-2 板在试验时的平均炉温曲线,如图 10 所示. 图 10 中: θ_F 为炉温; t 为时间. 由图 10 可知:在受火初期,炉内平均温度快速上升,约 10 min 时平均炉温达到 630 ℃ (586 ℃, 括号中为 ES4-2 板,下同);随后,由于炉内空间较大和部分燃烧器工作异常,炉温上升速率减缓,到 20 min 时平均炉温达到 767 ℃ (647 ℃);在经历了 190 min 的升温阶段后,最终平均炉温达到 1 133 ℃ (1 058 ℃). 说明,前 20 min 平均炉温与 ISO-834 标准升温曲线大体一致;在 20 min 至停火时间段平均炉温低于 ISO-834 标准升温曲线,最大偏差为 174 ℃;停火后 5 min 内,炉温快速下降 311 ℃ (320 ℃);停火后 5 min 后,炉内温度下降趋于平缓;停止采集时炉温为 146 ℃ (390 min),192 ℃ (320 min).

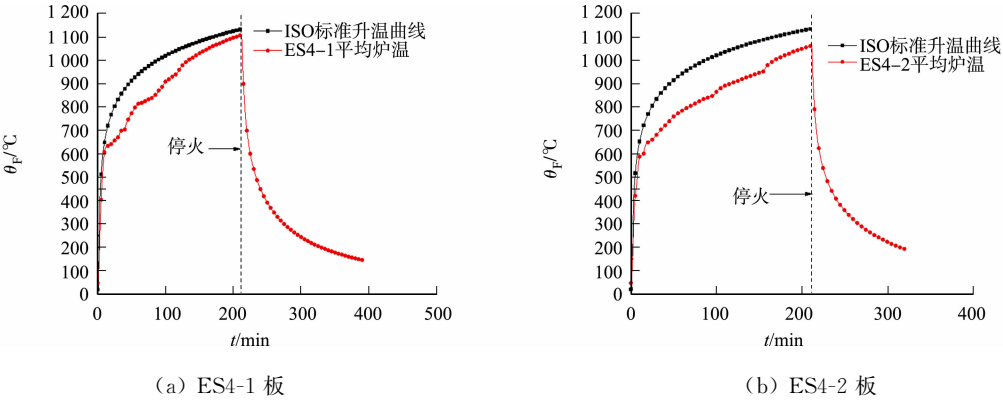


图 10 双向板的平均炉温曲线
Fig. 10 Average furnace temperature curve of two-way slab

2.3 板内温度测点

ES4-1 板和 ES4-2 板沿厚度方向的温度-时间曲线,如图 11,12 所示. 图 11,12 中: θ_F 为炉温; t 为时间; $CT * -1 \sim CT * -7$ 表示温度测点沿厚度方向由板底到板面顺序. 由图 11,12 可知:混凝土内部温度达到 100 ℃ 时,除板底面温度外,依次出现不同平缓阶段,持续时间依次增加;在停火降温阶段,靠近板底位置温度下降较快,竖向截面其他位置温度均有不尽相同提升后,逐渐开始降温;此规律与同轴线尺寸另外 3 种不同边界条件双向板一致^[5-7].

沿混凝土板厚度方向各测点温度-时间曲线,如图 13,14 所示. 图 13,14 中: θ_F 为炉温; t 为时间; b 为混凝土板厚度. 由图 13 可知:温度梯度随着时间增长不断加大,曲线整体呈现凹状,沿板厚方向升温速率逐渐降低,呈非线性变化. 在 30,90,150,210 min 时,ES4-1 板顶温度分别为 33.3,85.8,90.9,93.7

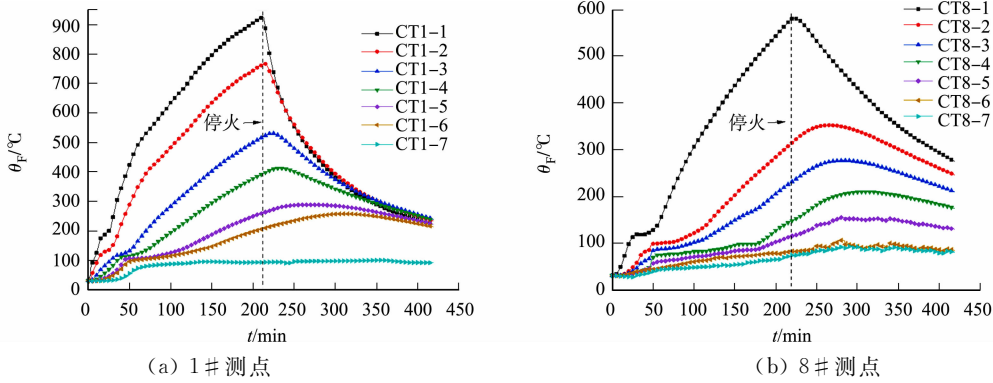


图 11 ES4-1 板内不同测点的厚度-温度-时间曲线

Fig. 11 Thickness-temperature-time curve of different measuring points in ES4-1 slab

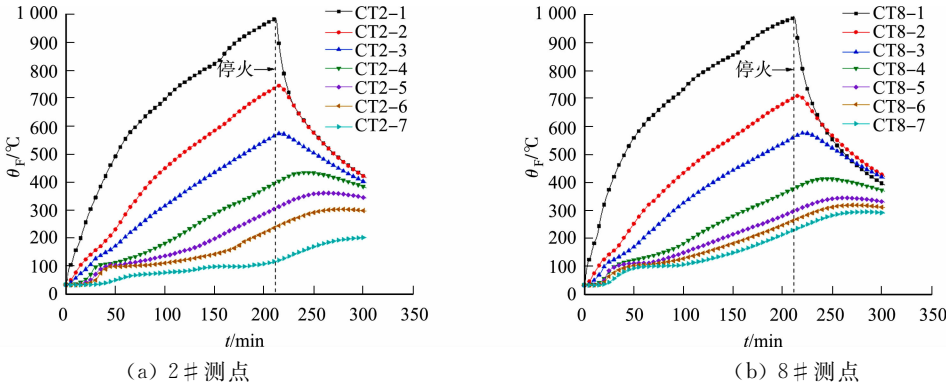


图 12 ES4-2 板内不同测点的厚度-温度-时间曲线

Fig. 12 Thickness-temperature-time curve of different measuring points in ES4-2 slab

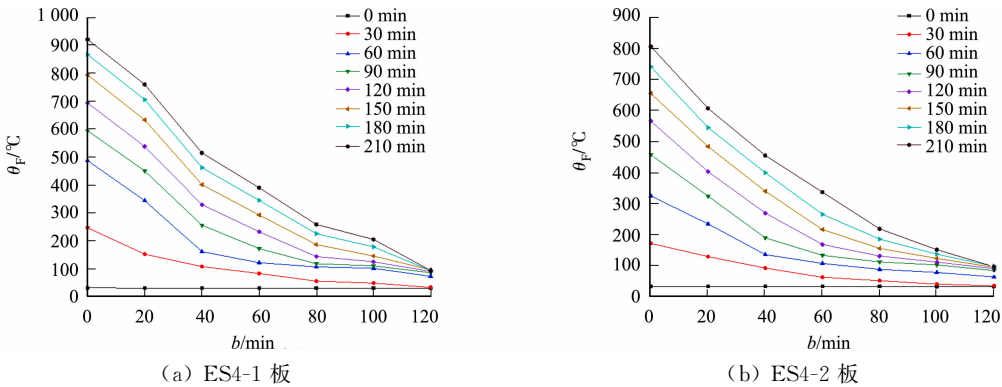


图 13 双向板板内 5# 测点的温度-厚度-时间曲线(升温阶段)

Fig. 13 Temperature-thickness-time curve of 5# measuring point in two-way slab (heating stage)

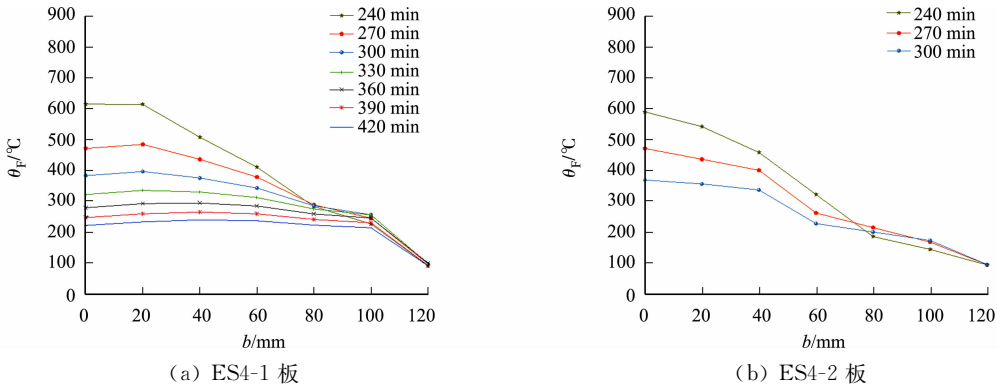


图 14 双向板板内 5# 测点的温度-厚度-时间曲线(降温阶段)

Fig. 14 Temperature-thickness-time curve of 5# measuring point in two-way slab (cooling stage)

℃,板底温度分别为 246.8,594.3,794.2,921.2℃,温差分别达到 213.5,508.5,703.3,827.5℃;ES4-2 板顶温度分别为 34.9,84.3,94.6,96.7℃,板底温度分别为 171.5,457.5,654.7,806.1℃,温差则分别达到 136.6,373.2,560.1,709.4℃.温度梯度伴着试验实际火灾时间增长不断加大,如此大的温差在板混凝土截面高度内必然产生很大的温度应力^[1,12].

由图 14 可知:降温段曲线有部分呈现凸状.这是因为板面、板中、板底这三部分因热工性能不同导致温度下降的速率不同,从而出现板中部温度高于板底和板面的现象.

2.4 钢筋温度测点

ES4-1 板和 ES4-2 板中 6#测点的钢筋温度-时间曲线,如图 15 所示.图 15 中: θ_R 为钢筋温度; t 为时间.由图 15 可知:随着受火时间增加,板中下层钢筋(ST6-1)温度持续上升,但增长速率逐步下降;板中上层钢筋(ST6-2)温度达到 100℃后,出现一个水平段.这是因为温度上升导致板内水分向温度较低的板上半部分迁移,上部水分增多;在上部钢筋周边水分迁移并蒸干后,上层钢筋温度增长迅速.在停火时,ES4-1 板和 ES4-2 板在 6#测点的钢筋温度分别达到 419.9,763.5℃,上下层钢筋的温差分别达到 230.4,374.5℃.待停火后,下层钢筋温度快速下降,而上层钢筋出现温度滞后现象,继续上升一段时间后缓慢下降.

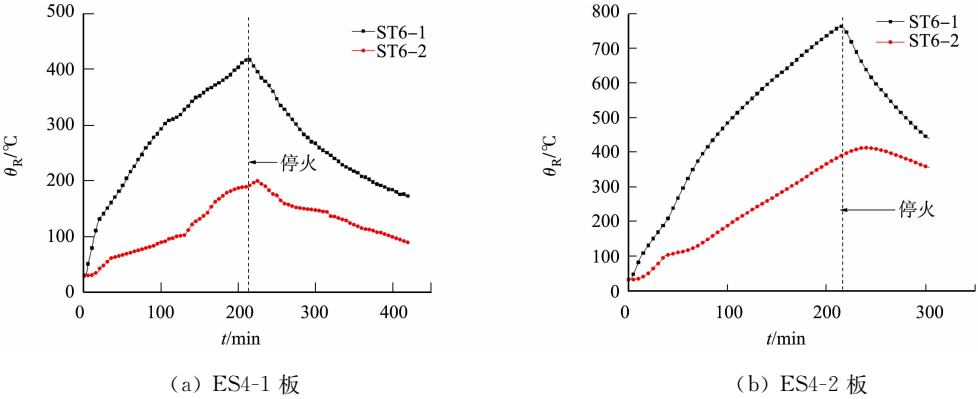


图 15 双向板板中 6#测点的钢筋温度-时间曲线

Fig. 15 Rebar temperature-time curve at measuring point 6# in two-way slab

ES4-1 板和 ES4-2 板中 6#测点的钢筋温度-炉温曲线,如图 16 所示.图 16 中: θ_R 为钢筋温度; θ_F 为炉温.由图 16 可知:炉温以 600 和 1 100℃为两分界线,炉温在 600℃时,下层钢筋温度提高速度急剧提高,上层增长相对缓慢;炉温在 1 100℃以上时,上下两层钢筋温度上升速率基本相同;炉温在 1 100℃以上时,上层钢筋便不会受到板内部水分影响;此现象与文献[5-7]中所述相同.

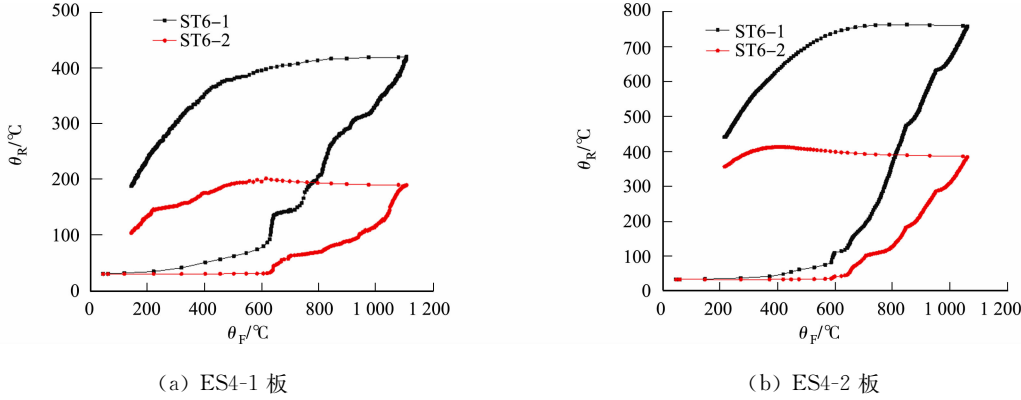


图 16 双向板 6#测点的钢筋温度-炉温曲线

Fig. 16 Rebar temperature-furnace temperature curve at measuring point 6# in two-way slab

2.5 竖向位移

ES4-1 板和 ES4-2 板中、板角、板边部分测点竖向位移曲线(根据结构对称性选取部分测点进行展示),如图 17~19 所示.图 17~19 中: Δ 为平面外位移; t 为时间.

由图 17 可知:板中下凹、整体呈盆状,板中竖向位移最大;在升温阶段 0~10 min,此阶段板中竖向

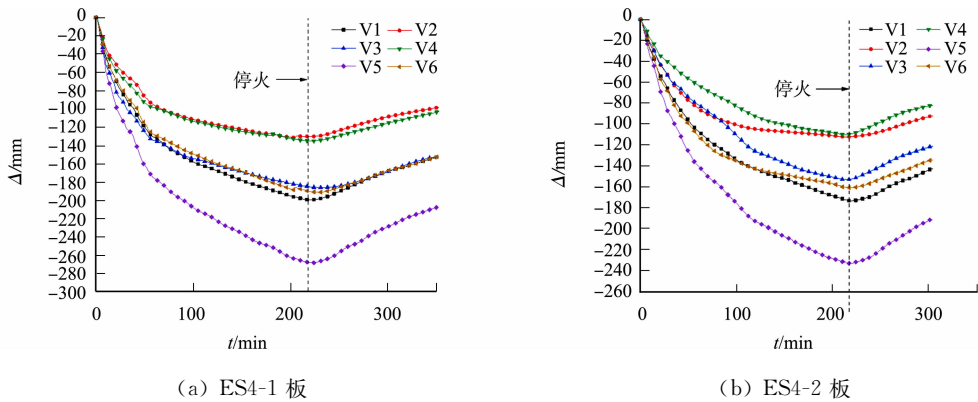


图 17 双向板板中测点竖向位移曲线

Fig. 17 Vertical displacement curve of measuring point on corner of two-way slab

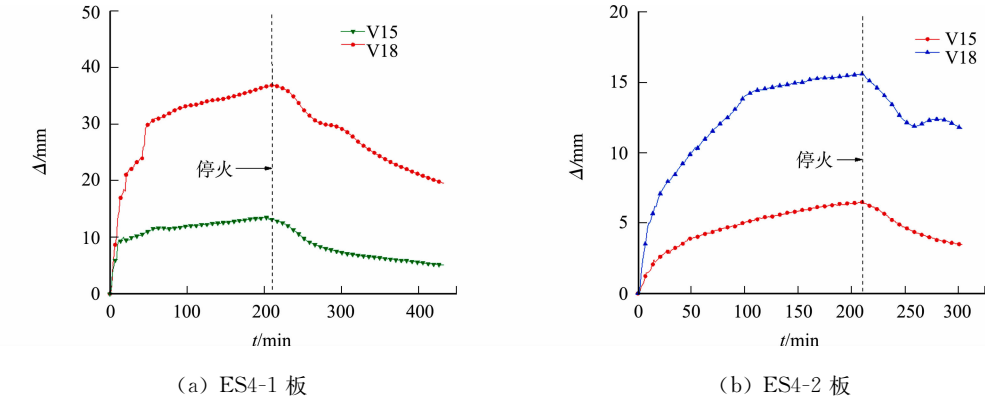


图 18 双向板板角测点竖向位移曲线

Fig. 18 Vertical displacement curve of angle measuring point of two-way slab

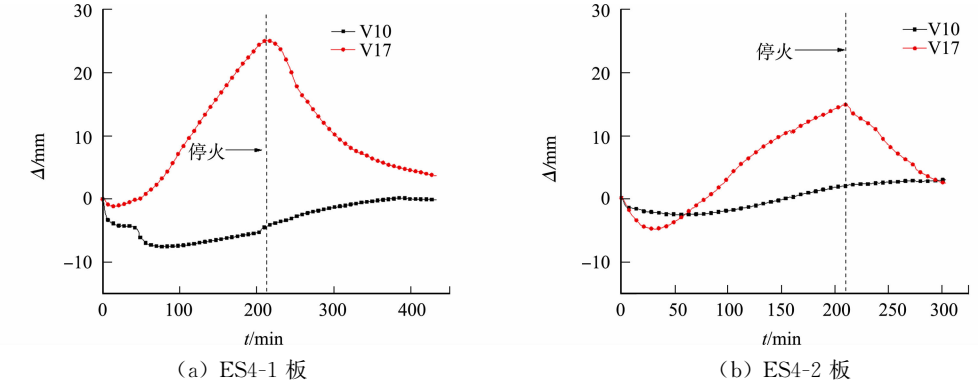


图 19 双向板板边测点竖向位移曲线

Fig. 19 Vertical displacement curve of measuring point on side of two-way slab

位移为线性发展,位移增长较快(ES4-1 板与 ES4-2 板位移速率分别为 $5.8, 3.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$);在 10 min 时板中最大位移,ES4-1 板与 ES4-2 板分别达到 58.6,35.4 mm,相应平均炉温为 606,586 $^{\circ}\text{C}$;在升温阶段 10~60 min,位移仍呈线性发展,但增长速率略为降低(ES4-1 板与 ES4-2 板位移速率分别为分别为 $2.3, 2.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$);在 60 min 时,ES4-1 板与 ES4-2 板的板中最大位移分别达到 175.7,140.0 mm,增长速率趋于稳定;在升温阶段 60~210 min,试验板受拉薄膜效应显现,尽管位移继续增加,但位移增长速率进一步放缓(均为 $0.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$);在 210 min 时,ES4-1 板和 ES4-2 板跨中最大位移分别达到 265.4,230.9 mm;停火后,ES4-1 板和 ES4-2 板位移达到最大值分别为 268.3,232.9 mm.

由图 17 还可知:在降温阶段,位移出现反弹趋势,ES4-1 板和 ES4-2 板的板中残余竖向位移 185,191 mm,位移恢复率为 31%,18%. 板中竖向位移规律与文献[5-7]基本一致.

不同边界双向板受火后竖向位移情况对比,如表 2 所示. 从表 2 可知:一长边固支、三边简支双向板在前 10 min 竖向位移增长最快,10 min 以后,各边界条件下双向板竖向位移增长情况无明显规律.

表 2 不同边界双向板受火后竖向位移情况对比
Tab.2 Comparison of vertical displacement of two-way slab
with different boundaries after being fire (mm • min⁻¹)

编号	边界类型	0~10 min	10~60 min	60~180 min	180~210 min
ES1-1	一长边固支、三边简支	6.3	1.6	0.85	—
ES1-1		6.7	2.6	0.47	0.34
ES2-1	两长边固支、两短边简支	3.9	1.9	0.64	0.44
ES2-1		4.4	0.84	—	—
ES3-1	三边固支、一短边简支	4.4	0.71	0.30(60~115)	—
ES3-2		5.2	2.3	0.73	0.57
ES4-1	两短边固支、两长边简支	5.8	2.3	0.62	0.49
ES4-2		3.5	2.1	0.68	0.34

由图 18~19 可知:板边在受火的前 50 min 为竖直向下位移,在 50 min 直至试验结束板边均为向上位移.这是因为试件受火初期,板中部受热膨胀,故板边向下位移;但随着板中竖向位移的增加,板边均为向上位移;试件受火后,板中部向下凹陷,板角翘曲明显.待停火时,ES4-1 板和 ES4-2 板在 V10(短固支边跨中)分别达到 21.25,23.56 mm;在 V16(长简支边跨中)达到-0.95,1.47 mm.

ES4-1 板和 ES4-2 板板中位移-炉温变化曲线,如图 20 所示.图 20 中: Δ 为平面外位移; θ_F 为炉温.由图 20 可知:在平均炉温达到 650 ℃前,板中竖向位移增长速率较低;当平均炉温超过 650 ℃后,竖向位移增长速率显著增大.在停火后,板中竖向位移与炉温快速下降的变化趋势不一致,出现了较长的水平段.这与混凝土的热惰性材料属性有关,炉温快速下降,但板内温度下降缓慢,远离受火面处的温度反而有所上升(图 11~12).这导致了板中炉温-竖向位移曲线出现水平段^[13];待炉温低于 650 ℃后,位移上升回弹速率加快;此现象与文献[5-7]中所述基本相同.

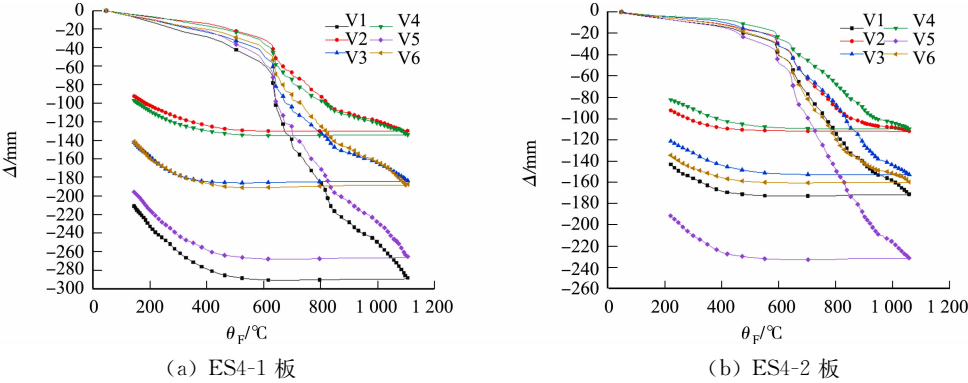


图 20 双向板各测点竖向位移-炉温曲线

Fig. 20 Vertical displacement-furnace temperature curve of each measuring point of two-way slab

ES4-1 板和 ES4-2 板各测点竖向位移最大值及残余变形值,分别如表 3 所示.表 3 中:变形恢复=最大位移-残余变形.从表 3 可知:ES4-1 板与 ES4-2 板在最大位移 V5 处分别回弹 31.03%,17.99%.

表 3 双向板各测点竖向位移情况表

Tab. 3 Vertical displacements of each measuring point of two-way slab							(mm)
构件测点	ES4-1 板			ES4-2 板			备注
	最大位移	残余变形	变形恢复	最大位移	残余变形	变形恢复	
V1	—199.33	—135.74	—63.59	—173.08	—142.77	—30.31	板中
V2	—131.21	—88.02	—43.19	—112.34	—92.17	—20.17	
V3	—185.89	—134.00	—51.89	—153.15	—121.09	—32.06	
V4	—134.98	—92.41	—42.57	—110.22	—82.15	—28.07	
V5	—268.25	—185.01	—83.24	—232.89	—191.00	—41.89	
V6	—190.90	—133.10	—57.80	—160.70	—134.31	—26.39	
V8	—150.05	—104.96	—45.09	—106.33	—88.91	—17.42	
V9	—193.23	—137.43	—55.80	—179.16	—148.24	—30.92	

续表

Continue table

(mm)

构件测点	ES4-1 板			ES4-2 板			备注
	最大位移	残余变形	变形恢复	最大位移	残余变形	变形恢复	
V15	24.14	11.20	12.94	17.22	10.14	7.08	板角
V17	36.96	19.57	17.39	16.63	12.76	3.87	
V16	25.25	3.69	21.56	14.83	2.38	12.45	板边

2.6 水平位移

本试验固端装置仅约束板的竖向变形与转动,未完全约束板在水平方向上的变形,在试验中固支端会存在一定水平位移. ES4-1 板和 ES4-2 板水平位移-时间曲线,如图 21 所示. 图 21 中: Δ 为平面外位移; t 为时间;H1,H2 为短固支边测点;H3,H4 为长简支边测点,板向板中区域偏移为正. 由图可知:升温段,混凝土板边呈现向外膨胀趋势,简支边膨胀速度较快,固支边位移较简支边位移变化小;降温后,各混凝土板边均开始收缩.

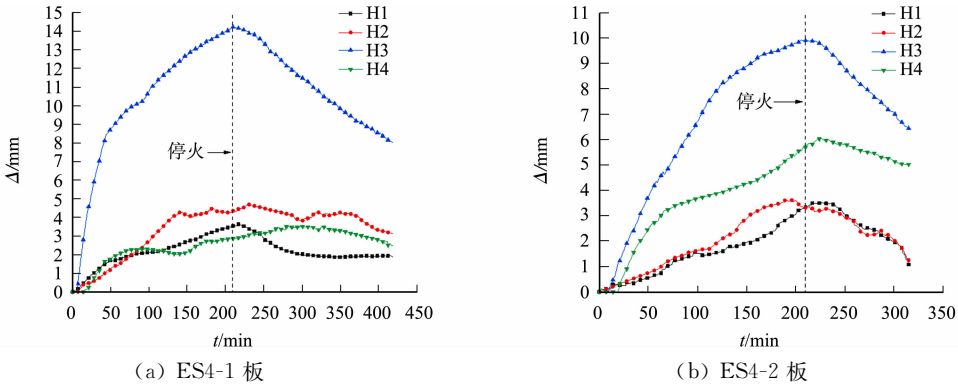


图 21 双向板的水平位移-时间曲线

Fig. 21 Horizontal displacement-time curves of two-way slab

2.7 板边转角

ES4-1 板和 ES4-2 板的板边转角-时间曲线,如图 22 所示. 图 22 中: ω 为转角; t 为时间. ES4-1 板和 ES4-2 板的板边各转角测点情况,如表 4 所示. 表 4 中: ω 为转角;回弹转角=最大转角-残余转角;

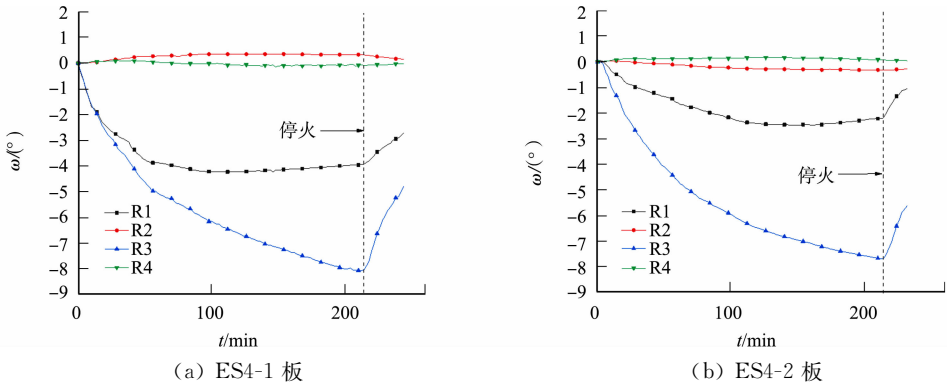


图 22 双向板板边的转角-时间曲线

Fig. 22 Side rotation-time curve of two-way slab

表 4 双向板板边转角测点情况表

Tab. 4 Measuring points for side corners of two-way slab

构件测点	$\omega_{\text{ES4-1}} / (^{\circ})$			$\omega_{\text{ES4-2}} / (^{\circ})$		
	测量值	最大值	残余值	测量值	最大值	残余值
R1	-4.23	-2.71	-1.52	-2.48	-1.05	-1.43
R2	0.36	0.14	0.22	-0.33	-0.29	-0.04
R3	-8.07	-4.79	-3.28	-7.70	-5.62	-2.08
R4	-0.15	-0.03	-0.12	0.16	0.04	0.12

R1,R3 为简支边测点;R2,R4 为固支边测点 .

由图 22 可知:固支边转角 R2,R4 随着受火时间变化仅有轻微的变化 . ES4-1 板和 ES4-2 板最大分别为 0.36° , -0.33° ;简支边转角 R1,R3 变化较明显、且随着受火时间持续变大,ES4-1 板和 ES4-2 板最大分别为 -8.07° , -7.70° ;停火后,简支边转角有明显回弹, ES4-1 板中 R1,R3 的转角回弹为 -1.52° , -3.28° ,ES4-2 板中 R1,R3 的转角回弹为 -1.43° , -2.08° .

4 结 论

1) 火灾下,在温度与恒荷载耦合作用的板面裂缝整体主要形成椭圆型,由固支边中部区域横向裂缝与固支边角部密集的环形斜裂缝组成. 板面整体沿塑性绞线凹陷,板底未受火区出现放射状裂缝.

2) 板内存在明显的温度梯度,形成非线性温度场;板内部测点在 100°C 左右均存在一个水平段. 钢筋与混凝土升温趋势一致,同等位置混凝土与钢筋温差不大. 炉温处于 $650\sim1\,100^{\circ}\text{C}$,钢筋温度增长较为迅速;炉温超过 $1\,100^{\circ}\text{C}$,板内上层钢筋受板内部水分影响较小.

3) 升温过程中,板平面外位移整体呈现非线性趋势,板中部位移较大,最大位移分别达到 268.3 , 232.9 mm ,靠近固支边位移低于同等位置简支边位移;降温过程中,板中位移回弹明显,板中竖向位移与炉温快速下降的变化趋势不一致,出现较长的水平段.

4) 整个升温过程中,混凝土板边持续向外膨胀,简支边膨胀速度较快,固支边位移较简支边位移变化小;降温后,各混凝土板边均开始收缩.

5) 固支边转角随着受火时间增加有缓慢变化,但整体变化较小;简支边转角随着受火时间增加不断增大,整体变化较大.

参考文献:

[1] 王滨,董毓利. 钢筋混凝土双向板火灾试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(4):53-62.

[2] YANG Z N,DONG Yuli,XU W J. Fire tests on two-way concrete slabs in a full-scale multi-story steel-framed building[J]. Fire Safety Journal,2013,58:38-48. DOI:10. 1016/j. firesaf. 2013. 01. 023.

[3] WANG Y,DONG Yuli,LI B, *et al.* A fire test on continuous reinforced concrete slabs in a full-scale multi-story steel-framed building[J]. Fire Safety Journal,2016,61:232-242. DOI:10. 1016/j. firesaf. 2013. 08. 005.

[4] LI B,DONG Yuli,ZHANG D S. Fire behaviour of continuous reinforced concrete slabs in a full-scale multi-story steel-framed building[J]. Fire Safety Journal,2015,71:226-237. DOI:10. 1016/j. firesaf. 2014. 11. 021.

[5] 叶森贵. 三边简支一边固支混凝土双向板火灾性能研究[D]. 厦门:华侨大学,2019.

[6] 李胜赋. 三边固支一边简支边界下钢筋混凝土双向板的火灾行为研究[D]. 厦门:华侨大学,2020.

[7] 谢戈. 两短边简支、两长边简支边界下钢筋混凝土双向板的火灾行为研究[D]. 厦门:华侨大学,2020.

[8] 朱崇绩,董毓利,朱崇钊,等. 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. DOI:10. 14006/j. jzjgxb. 2013. 03. 002.

[9] 中国建筑科学研究院,清华大学,同济大学,等. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[10] 中国建筑科学研究院,中建国际建设有限公司,国家建筑工程检测中心,等. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[11] 中国建筑科学研究院,同济大学,中国建筑设计研究院,等. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[12] 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. DOI:10. 6052/j. issn. 1000-4750. 2011. 12. 0898 .

[13] 王勇,王腾焱,袁广林,等. 板角约束混凝土双向板抗火性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2017,38(5):125-132. DOI:10. 14006/j. jzjgxb. 2017. 05. 016.

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)