

# 双肋式波形钢腹板工字钢组合连续梁耐火性能研究

郑尚敏\*, 刘伟良

(华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013)

**摘要:** 为研究不同火灾场景下双肋式波形钢腹板工字钢组合连续梁的耐火性能, 本文以一连续双肋钢-混凝土组合梁的火灾试验为背景, 采用有限元软件 ANSYS 建立组合梁的热-力耦合数值模型, 分析其受火过程中的升温规律及不同受火区域下的结构变形和破坏模式, 并进一步研究荷载比、跨高比和腹板波折角变化对其耐火性能的影响。结果表明: 火灾作用下, 双肋式波形钢腹板工字钢组合连续梁沿梁高方向的升温速率不一致, 形成了显著的温度差; 不同受火区域组合梁的结构变形和耐火时间均存在较大差异, 受火区域越靠近中支点处, 组合梁的耐火时间越短; 中支点区域受火为组合梁更不利位置, 其耐火时间较短并出现了局部屈曲破坏; 荷载比变化对边支点区域受火的组合梁耐火性能影响较为显著, 荷载比从 0.3 增大到 0.5 时, 其耐火时间减少了 54.4%; 减小跨高比对边支点和跨中区域受火的组合梁耐火性能有明显提高, 但不同受火区域组合梁的耐火时间均较接近; 腹板波折角变化对不同受火区域组合梁的耐火性能影响均较小, 且耐火时间接近, 基本可以忽略不计。研究成果可为双肋式波形钢腹板工字钢组合连续梁的抗火设计提供参考。

**关键词:** 桥梁工程; 波形钢腹板; 组合梁; 有限元分析; 温度场; 耐火性能

中图分类号: U448.216

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)10-0059-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240516003

## Study on Fire Resistance of Double-Ribbed I-Steel Continuous Composite Girder with Corrugated Steel Webs

ZHENG Shangmin\*, LIU Weiliang

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

\*Corresponding author: lanxiaowenlin@126.com

**Abstract:** To investigate the fire resistance of double-ribbed I-steel continuous composite girder with corrugated steel webs under different fire scenarios, a fire test of a continuous double-ribbed steel-concrete composite girder is taken as a background, and the finite element software ANSYS is used to establish a coupled thermal-force numerical model of the composite girder. The temperature rise law of the composite girder under fire, and the structural deformation and failure modes under different fire scenarios are analyzed. Furthermore, the influence of load ratio, span-to-height ratio, and the variation of the web corrugation angle on the fire resistance of the composite girder is studied. The results show that when subjected to fire, the temperature rise rate of double-ribbed I-steel continuous composite girder with corrugated steel webs along the height of the cross section is not consistent, forming a significant temperature gradient. The structural deformation and fire resistance time of the composite girder subjected to different fire scenarios have large differences, and the closer the fire area is to the middle support, the shorter the fire resistance time of the composite girder will be. The fire in the middle support area is a more unfavourable condition for the girder, with shorter fire resistance time and local buckling damage. Load ratio has a significant effect on the fire resistance of the

收稿日期: 2024-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(52068025), 江西省自然科学基金项目(20242BAB25309), 江西省交通运输厅项目(2024YB021)

作者简介:

郑尚敏(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事组合结构桥梁抗火方面的研究。E-mail: lanxiaowenlin@126.com。(通信作者)

刘伟良(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事组合结构桥梁抗火方面的研究。

composite girder subjected to fire at the side support area, and the fire resistance time decreases by 54.4% when the load ratio is increased from 0.3 to 0.5. Reducing the span-to-height ratio significantly improves the fire resistance of the girder subjected to fire in the side support and mid-span areas, but the fire resistance times of the girder subjected to different fire scenarios are relatively close. The variation of the web corrugation angle has a smaller impact on the fire resistance of the composite girder subjected to different fire scenarios, and the fire resistance times are close, which is basically negligible. The research results can provide a certain reference for the fire-resistant design of double-ribbed I-steel continuous composite girder with corrugated steel webs.

**Keywords:** bridge engineering; corrugated steel web; composite girder; finite element analysis; temperature field; fire resistance

双肋式波形钢腹板工字钢组合梁将传统钢-混凝土组合梁中的平钢腹板替换为波形钢腹板,使得该结构在腹板厚度较薄且未布设加劲肋的情况下,仍可以保持较好的抗剪切屈曲能力及稳定性<sup>[1-2]</sup>,其主梁之间通过横梁连接以增强结构的横向刚度,减少了钢材用量,还可设计较宽的混凝土翼板,以满足实际工程需要<sup>[3-4]</sup>。目前,相关学者对波形钢腹板组合梁的力学性能开展了深入研究<sup>[5-12]</sup>,为该类组合梁在桥梁建设中的应用和发展奠定了基础。图1为该类组合梁在实际工程中的应用。

研究表明,由于钢材的热敏感性较强,火灾高温下钢-混凝土组合梁桥的承载性能会发生严重衰退,导致桥梁结构出现破坏甚至倒塌,最终带来巨大损失<sup>[13-15]</sup>。针对钢-混凝土组合梁的耐火性能,已有学者开展了相关研究。NASER等<sup>[16]</sup>通过试验和数值模拟分析了高温下钢-混凝土组合梁破坏模式的影响因素,结果表明当腹板宽厚比较大时,组合梁更容易发生剪切屈曲破坏。张岗等<sup>[17]</sup>制作了3根不同截面形式的钢-混凝土组合梁进行火灾试验,通过分析其火灾下的结构响应特点,揭示了截面形状对钢-混凝土组合梁抗火性能的影响机理。李徐阳等<sup>[18]</sup>基于有限元软件分析了不同荷载及受火位置下钢-混凝土组合连续箱梁的破坏行为,并提出了一种增强该类箱梁耐火性能的方法。周焕廷等<sup>[19-20]</sup>通过试验和数值模拟的方式开展了腹板开孔对钢-混凝土组合梁抗火性能的影响研究,得出腹板开孔后将导致组合梁的抗弯刚度降低,但提高了预应力拉索的效率。陈魏等<sup>[21]</sup>采用ANSYS软件建立了H型钢-混凝土组合梁的数值分析模型,并对组合梁耐火极限的影响因素进行了分析,研究表明外荷载和受火区域越大,组合梁的耐火时间越短。

综上所述,目前针对钢-混凝土组合梁耐火性能方面的研究主要是以普通平钢腹板钢-混凝土组合梁为研究对象,而本文研究的新型组合结构的截面形式和力学性能与传统钢-混凝土组合梁相比区别较明显,传统钢-混凝土组合梁的抗火性能研究成果无法直接应用于该新型结构。因此,为深入了解该新型组合结构火灾响应,本文以双肋式波形钢腹板工字钢组合连续梁为研究对象,采用有限元软件ANSYS建立热-力耦合分析模型,对该类新型组合结构进行耐火性能分析,研究成果可为该类组合梁的抗火设计提供参考。



图1 大庆—广州高速公路6号立交桥

Fig. 1 No. 6 overpass of Daqing-Guangzhou Expressway

## 1 计算模型

### 1.1 研究对象

本文以文献[17]中的双肋工字钢截面钢-混凝土组合试验梁为背景,将平钢腹板替换为波形钢腹板以组成的双肋式波形钢腹板工字钢组合梁(以下简称组合梁)为研究对象。该组合梁总长为6.10 m,单跨计算跨径2.85 m;混凝土板宽800 mm、厚100 mm;腹板高300 mm、厚度5 mm(图1b));钢梁上下翼缘板宽130 mm,厚度分别为6 mm和10 mm;在支座及跨中位置设置钢横隔板,厚度为6 mm,用以连接两主梁并增强其横向刚度;钢梁与混凝土板之间通过直径为13 mm、长50 mm的剪力钉实现组合作用,间距为沿梁纵向150 mm。组合梁中混凝土强度等级为C50,钢材采用Q345钢,普通钢筋采用直径为8 mm的HRB400钢筋。组合梁详细构造如图2所示。

### 1.2 火灾场景选取

该组合梁为两跨连续体系,边支座为滑动铰支,中支座为固定铰支,在两跨跨中位置设置两个加载点。组合梁的混凝土板顶面和侧面为不受火面,其余面均暴露在火灾下,其受火布置如图3所示。

由于桥梁发生火灾时,受火位置通常具有不确定性,使得火灾下结构的破坏模式及耐火性能有显著差异。因此,本文建立了四种不同火灾场景:沿梁纵向靠近边支点受火长度1.425 m为火灾场景1(FS1),沿梁纵向跨中受火长度1.425 m为火灾场景2(FS2),沿梁纵向靠近中支点受火长度1.425 m为火灾场景3(FS3),沿梁纵向中支

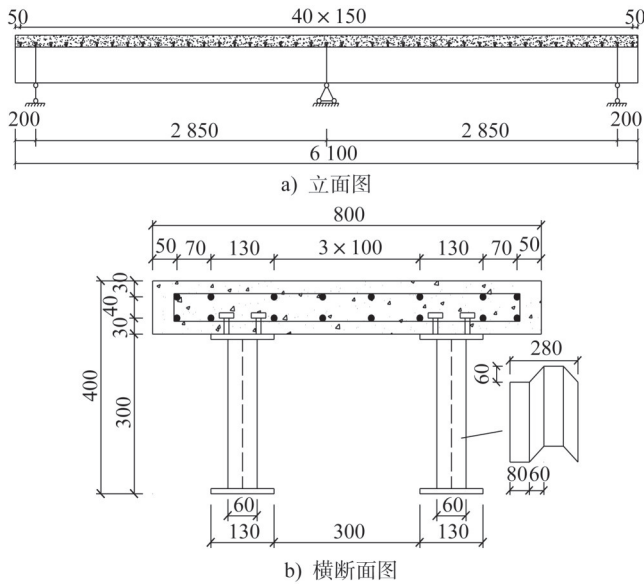


图2 组合梁详细构造图(单位:mm)

Fig. 2 Detailed structural diagram of composite girder (unit: mm)

点受火长度 1.425 m 为火灾场景 4(FS4), 四种火灾场景具体布置如图 4 所示。

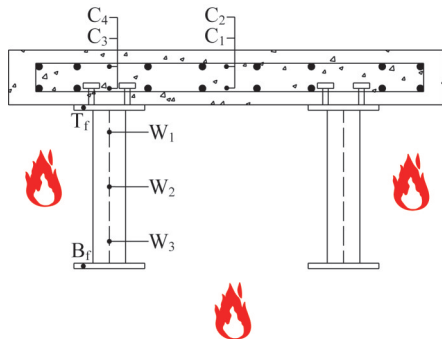


图3 组合梁受火布置图

Fig. 3 Fire arrangement of composite girder

### 1.3 有限元模型建立

采用有限元软件 ANSYS 建立组合梁热-力耦合有限元模型, 并以顺序耦合的方式对其进行耐火性能分析。首先, 对组合梁模型进行热分析, 以获取其火灾下的温度分布, 其中工字钢梁、钢横隔板均采用 Shell131 单元模拟, 混凝土板和普通钢筋分别采用 Solid70 和 Link33 单元模拟, 火源升温采用 ISO834 国际标准火灾曲线, 对流换热系数采用欧洲规范<sup>[22]</sup>中的推荐取  $25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ , 综合辐射系数取 0.7, Stefan-Boltzmann 常数为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}$ 。随后, 将热分析结果作为温度荷载施加在结构模型上进行热-力耦合分析, 并分别将 Shell131、Solid70 和 Link33 单元转换为 Shell181、Solid185 和 Link180 单元, 以模拟构件的真实应力状态。

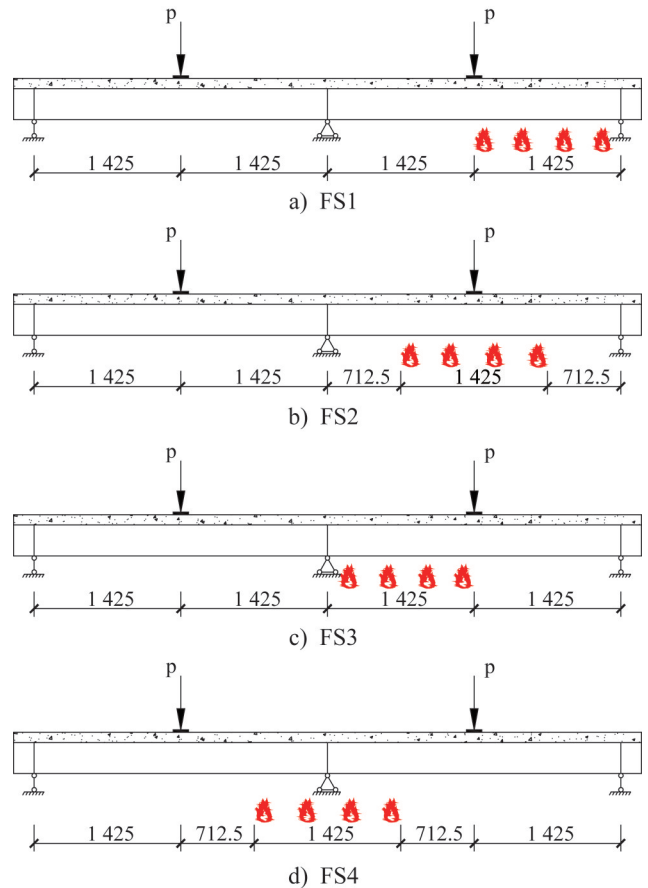


图4 不同火灾场景(单位:mm)

Fig. 4 Different fire scenarios (unit: mm)

本文中混凝土、钢材和普通钢筋的热力性能参数均采用欧洲规范<sup>[22]</sup>中的取值。组合梁热-力耦合有限元模型如图 5 所示。

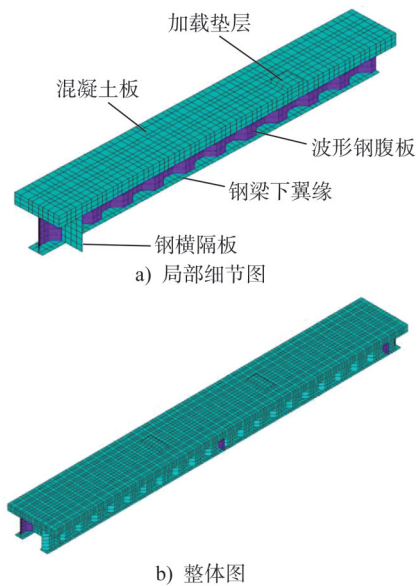


图5 组合梁热-力耦合有限元模型

Fig. 5 Thermal-force coupling finite element model of composite girder

### 1.4 有限元模型验证

为验证本文有限元模型的正确性及适用性,对文献[17]中的连续双肋工字钢截面试验梁建立有限元模型进行热-力耦合分析,试验梁尺寸、加载情况及材料特性见文献[17]。提取模型计算试验梁钢梁下翼缘(Tb1)、腹板中部(Tw2)、钢梁上翼缘(Tt1、Tt2)、加劲肋中部(Ts2)、沿内部混凝土板竖向(Tc1、Tc2、Tc3)、沿钢梁接触部位混凝土板竖向(Tc4、Tc5、Tc6)的温度和跨中挠度时程曲线,并与试验结果进行对比,如图6、图7所示。

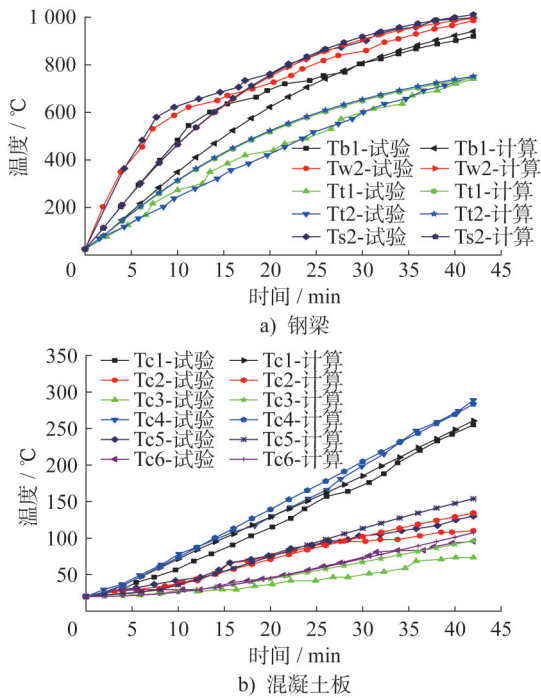


图6 试验梁温度时程曲线计算值与实测值对比

Fig. 6 Comparison between calculated and measured temperature time-history curves of the test girder

由图6、图7可知,通过对试验梁建立有限元模型进行热-力耦合分析得出的温度和跨中挠度结果与试验实测结果吻合较好,图中出现的误差主要是由于试验时非受火区域不能做到完全隔热,而数值分析是在完全理想状态下对该试验过程的模拟,且数值分析中的材料力学参数与实际的材料力学参数也存在差异。综上所述,采用本文的建模方法所建立的有限元模型能够较好地模拟双肋式波形钢腹板工字钢组合连续梁火灾下的响应。

## 2 火灾下组合梁的响应

### 2.1 温度响应

选取组合梁内部混凝土板(C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>)、钢梁接触部分混凝土板(C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>)、钢梁上翼缘板(T<sub>f</sub>)、波形钢腹板(W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>)、钢梁下翼缘板(B<sub>f</sub>)共9个位置进行温度测点布置(图3)。组合梁受火区域跨中截面的温度时程曲线如图8所示。

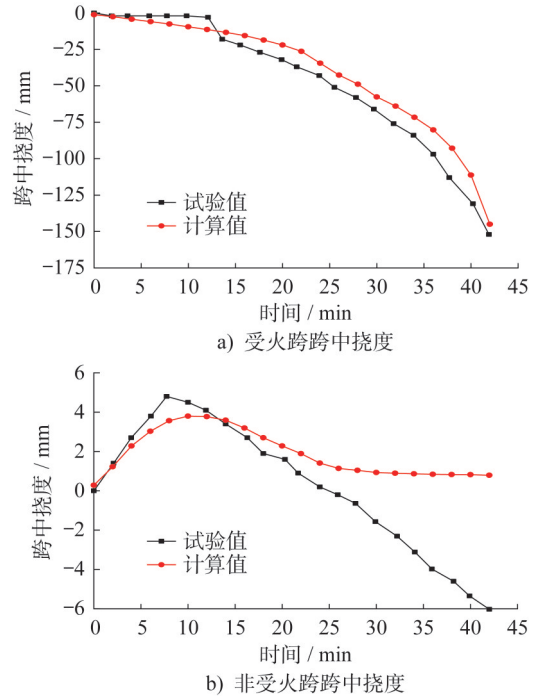


图7 试验梁跨中挠度时程曲线计算值与实测值对比  
Fig. 7 Comparison between calculated and measured mid-span deflection time-history curves of the test girder

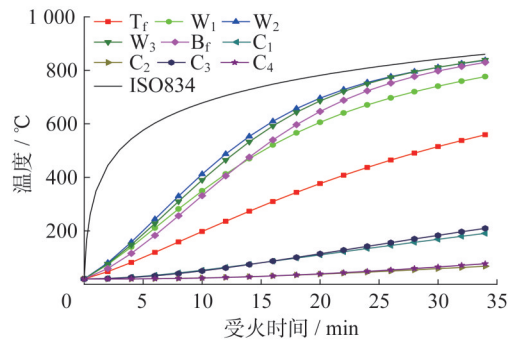


图8 组合梁跨中截面温度时程曲线

Fig. 8 Temperature time-history curves of mid-span section of composite girder

由图8可知,组合梁不同位置测点温度随受火时间延长不断升高,且受火初期升温速率较快,受火后期升温速率逐渐减缓。由于不同材料之间的热工参数差异,使得组合梁沿梁高方向的升温速率不一致,从而形成显著温度差,且受火时间越长,温差越大。其中,混凝土板的升温速率较慢,且下层的升温速率比上层快,这是由于混凝土的比热容较大以及导热性能较差,导致其热量传递效率变低。钢梁上翼缘由于和混凝土板直接接触,存在热量从钢板向混凝土板热传导的现象,从而使得上翼缘温度较钢梁其它位置温度低,同时也使得与钢梁接触部位的混凝土板比内部混凝土板的温度略高。由于腹板和钢梁下翼缘离火源较近,且直接暴露在火灾下,故该处两

个位置测点的温度相对较高,然而腹板与钢梁下翼缘相比,厚度较薄且受火面积较大,故腹板的升温速率更快。腹板不同位置的升温速率有较大差异,其下部的升温速率要明显高于上部,这主要是由于腹板上部距离混凝土板较近,混凝土的热惰性导致腹板上部的升温速率降低<sup>[23]</sup>。

## 2.2 跨中挠度和腹板侧向位移

为获取不同火灾场景下组合梁的耐火性能及结构响应特点,对组合梁施加0.3倍的常温极限承载力进行热-力耦合分析,得到组合梁两跨跨中挠度及受火跨跨中腹板侧向位移时程曲线如图9所示。

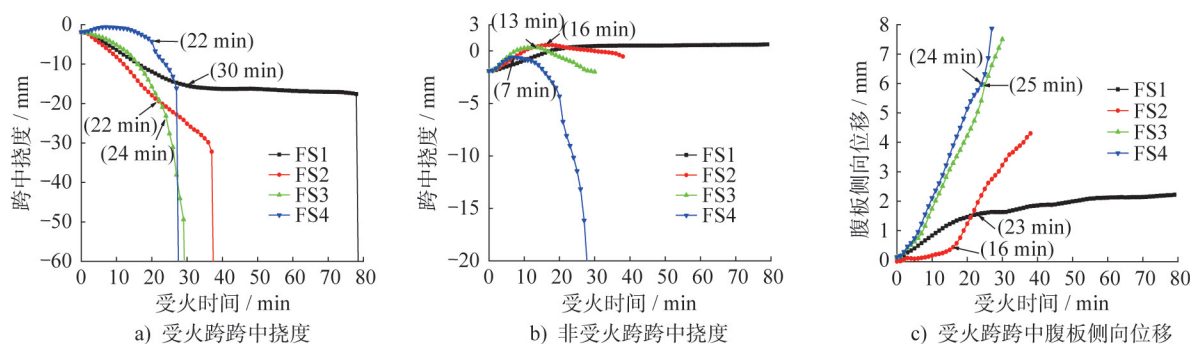


图9 组合梁跨中挠度及腹板侧向位移时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of mid-span deflection and web lateral displacement of composite girder

由图9可知,各火灾场景组合梁受火跨跨中及腹板侧向位移均随受火时间增加逐渐增大,非受火跨则近似呈现“拱形”,即挠度先增大后减小。这是因为受火后组合梁的材料力学性能发生退化,使得受火跨梁体下挠变形;而连续梁具有变形协调性,这种特性使得非受火跨相应出现上拱变形,随后由于在受火区域出现了局部屈曲,导致两跨之间的联系减弱,非受火跨挠度将继续增大,最终达到和受火前基本持平的状态。FS1中,组合梁受火跨挠度与腹板侧向位移均表现为迅速增大后保持平缓,而非受火跨挠度变化趋势则与其相反,且三者最终的变形均较小。这是由于该区段弯矩较小,受火前期组合梁的内力重分布使得该处正弯矩减小变为负弯矩,故组合梁迅速产生向下的变形并在腹板位置出现局部塑性变形,到受火后期,所受弯矩变为正值,组合梁的变形速率减缓。受火22 min前,FS2中受火跨跨中挠度大于另外三种火灾场景,这是因为跨中截面的荷载效应较大,使得位于该受火区域的组合梁挠度发展较快。FS2中腹板侧向位移在16 min后迅速增大,结合非受火跨挠度可知,这是由于此时钢材的刚度大幅降低,钢梁位置出现了局部屈曲。FS3和FS4受火跨跨中挠度发展趋势均可分为两阶段,分别在24 min和20 min前表现为缓慢增长,随后快速增长,且两者腹板侧向位移也基本一致。这是由于两种受火区域组合梁均在中支点处形成塑性铰,具有类似的破坏机理。横向比较组合梁挠度时程曲线可以看出,边支点区域受火的组合梁耐火时间较长,受火区域越靠近中支点,组合梁的耐火时间越短,表明组合梁的耐火性能受局部受火位置的影响较大。

## 2.3 破坏模式

不同火灾场景下组合梁的破坏形态如图10所示。

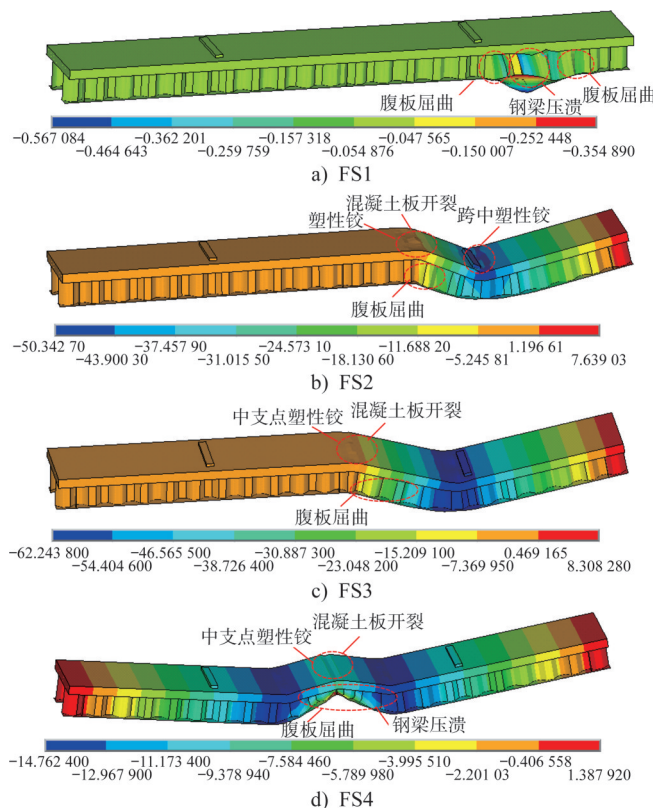


图10 不同火灾场景下组合梁破坏形态(单位:mm)

Fig. 10 Failure modes of composite girders under different fire scenarios (unit:mm)

由图可知,局部火灾作用下,组合梁受火跨的挠度变形要大于非受火跨,因此,火灾下组合梁的破坏主要体现

在受火跨。组合梁位于中支点一侧的受火区域边缘处腹板均出现了屈曲现象,这主要是由于受火区域边缘容易出现应力集中,且位于中支点一侧是组合梁的负弯矩区段以及会发生弯矩突变的地方。FS1受火区域位于组合梁边支点处,由于该区段弯矩较小,组合梁耐火时间较长,使得钢梁上翼缘与混凝土顶板之间存在较大温度差,并出现应力集中现象,且此时钢材强度和刚度基本丧失,最终钢梁无法继续承载,发生突然的局部压溃破坏。FS2受火区域位于组合梁跨中,由于中支点一侧受火区域边缘是组合梁正负弯矩突变的地方,故该位置先出现塑性铰,而跨中截面的荷载效应较大,火灾后期在跨中形成第二个塑性铰,组合梁发生了受火跨大变形破坏。FS3和FS4受火区域分别位于中支点附近及中支点,受火前期,由于组合梁的内力重分布,中支点位置将承担较大负弯矩作用,当超过截面的承载能力后,中支点处的钢梁受压屈曲,混凝土板

则受拉开裂,最终在该处形成塑性铰。FS4受火区域是组合梁负弯矩最大的位置,受到负弯矩作用的影响程度大于FS3中组合梁受到负弯矩作用的影响,因此混凝土板的塑性变形也更严重,钢梁受压屈曲更大并最终发生局部压溃破坏。火灾下FS3和FS4的腹板侧向位移均较大,4种火灾场景下,组合梁均表现为局部屈曲破坏。

### 3 参数分析

#### 3.1 荷载比

为研究外荷载变化对组合梁耐火性能的影响,本节选取荷载比 $\alpha$ (组合梁受火施加荷载与常温极限荷载之比)分别为0.3、0.4和0.5,在两跨跨中位置施加集中荷载,通过开展热-力耦合分析,得到不同荷载比下各火灾场景组合梁受火跨跨中及腹板侧向位移时程曲线如图11所示,分析结果见表1。

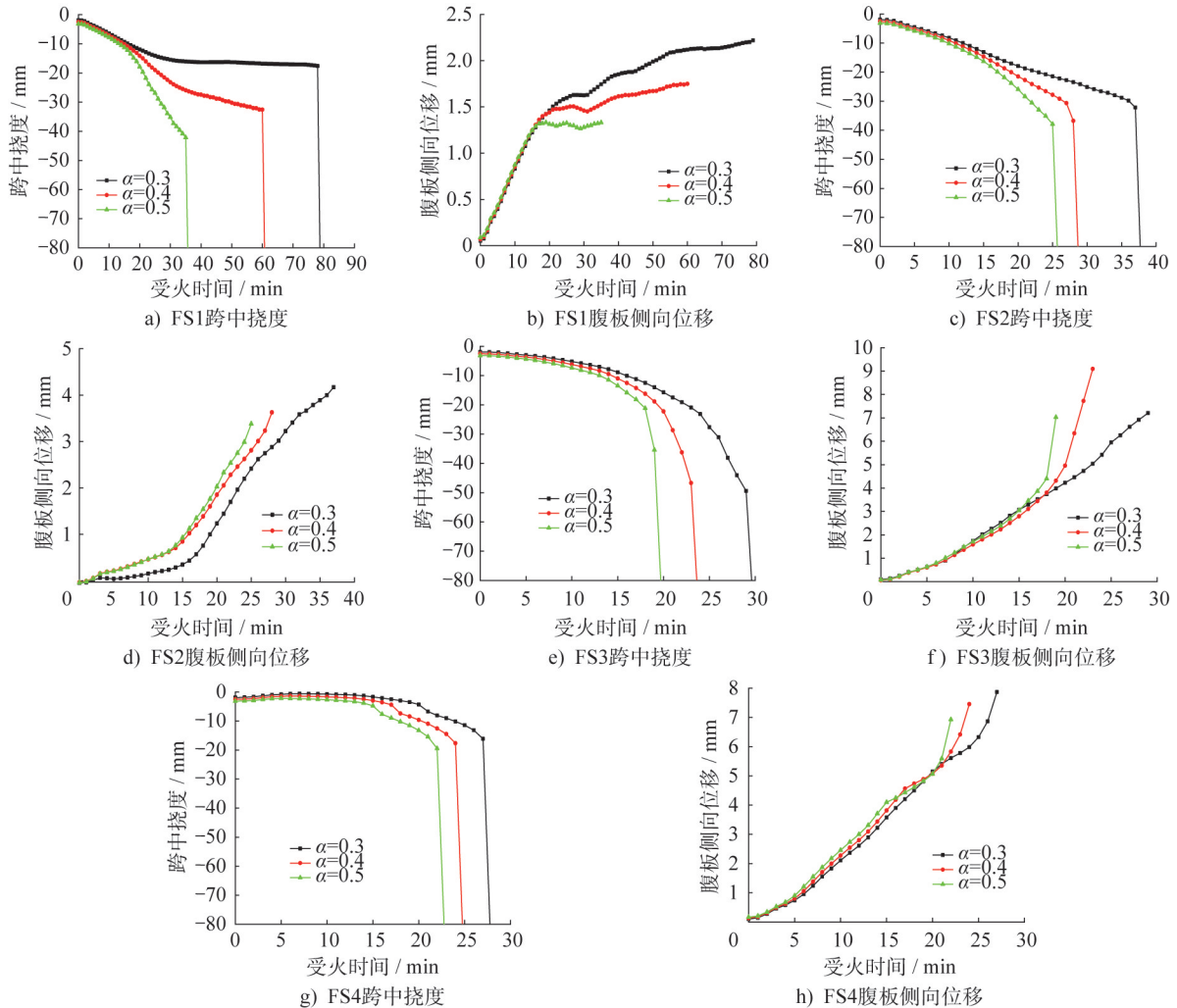


图 11 不同荷载比下组合梁跨中挠度及腹板侧向位移时程曲线

Fig. 11 Time-history curves of mid-span deflection and web lateral displacement of composite girders with different load ratios

由图 11 可知,受火 15 min 前,荷载比变化对不同火灾场景下组合梁的挠度影响均较小,而受火 15 min 后,荷

载比越大的组合梁,跨中挠度也越大,表明外荷载水平对组合梁耐火性能的影响主要体现在火灾后期。这是由于

表1 不同荷载比的组合梁分析结果对比

Table 1 Comparison of analysis results of composite girders with different load ratios

荷载比 $\alpha$	施加荷载/kN	FS1耐火时间/min	FS2耐火时间/min	FS3耐火时间/min	FS4耐火时间/min
0.3	523.5	78	37	29	27
0.4	698.0	60	28	23	24
0.5	872.5	35	25	19	22

组合梁受火前期的变形主要源于截面温度差引起的热膨胀效应,而受火后期组合梁的材料力学性能严重退化,对荷载的敏感性增大。荷载比变化时,位于边支点受火区域的组合梁,腹板侧向位移变化幅度小于其它受火区域组合梁的腹板侧向位移变化幅度。这是由于跨中及中支点区域受火时,组合梁先在受火区域边缘及中支点形成塑性铰,荷载越大腹板塑性变形发展越快,而边支点受火

区域组合梁腹板的塑性变形较小,荷载增大对腹板侧向位移的影响也随之减小。结合表1可知,不同受火区域组合梁的耐火性能受荷载比影响均较大,且耐火时间随荷载比增大而减小,但减小幅度有所差异。荷载比从0.3增大到0.5时,位于边支点受火区域的组合梁,耐火时间减小幅度较大,为54.4%,中支点受火区域的组合梁耐火时间减小幅度则较小,为17.9%。相同荷载比下,中支比比边支点区域受火的组合梁耐火时间更短,因此中支点区域受火是组合梁耐火性能分析中最为不利的位置。

### 3.2 跨高比

为研究跨高比变化对组合梁耐火性能的影响,分别取波形钢腹板高度为300 mm、400 mm和500 mm,使得跨高比 $\lambda$ 分别为7.13、5.70和4.75,并以荷载比为0.3对组合梁进行热-力耦合分析,得到不同跨高比下各火灾场景组合梁受火跨中挠度及腹板侧向位移时程曲线如图12所示,分析结果见表2。

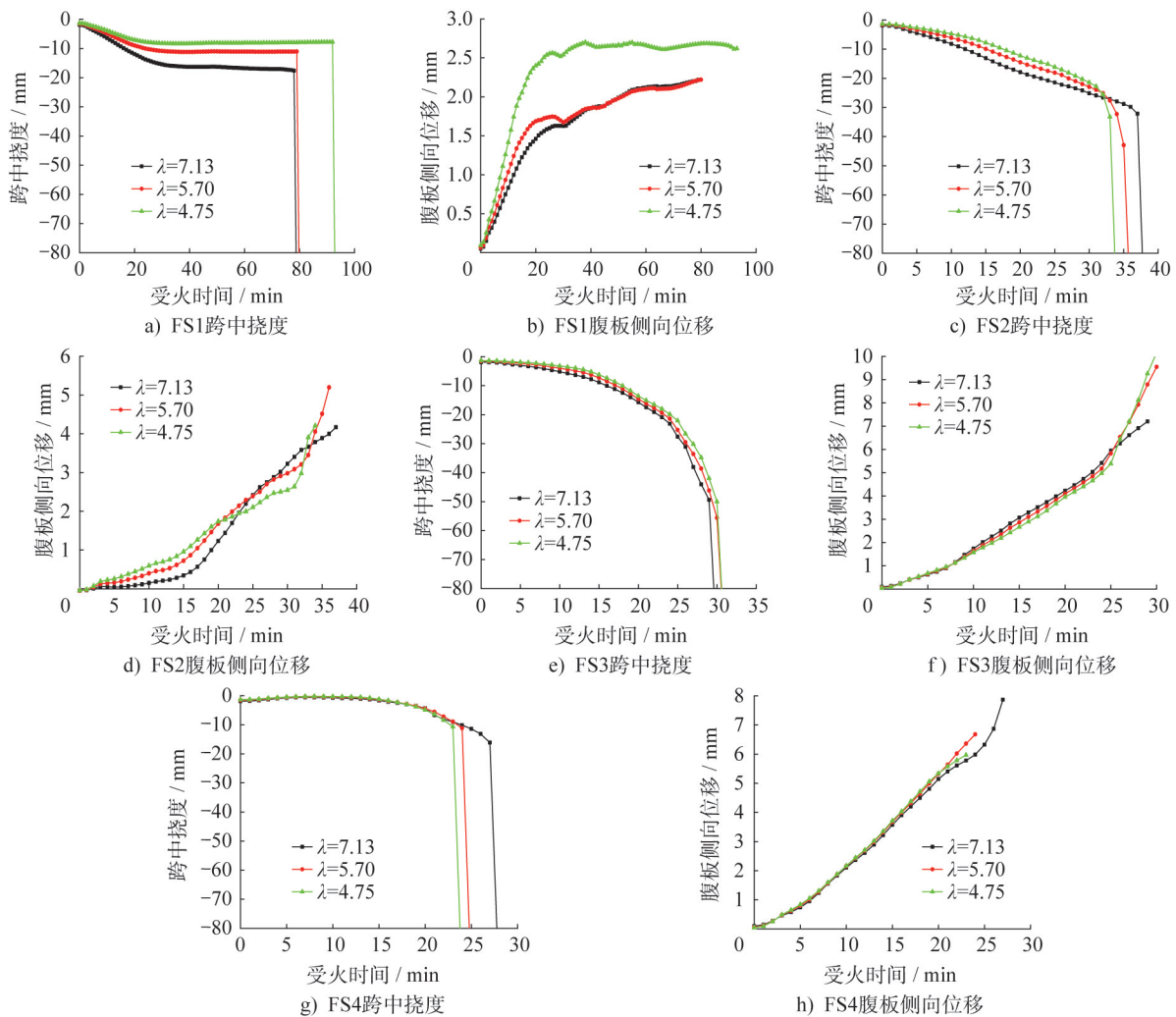


图12 不同跨高比下组合梁跨中挠度及腹板侧向位移时程曲线

Fig. 12 Time-history curves of mid-span deflection and web lateral displacement of composite girders with different span-to-height ratios

表2 不同跨高比的组合梁分析结果对比

Table 2 Comparison of analysis results of composite girders with different span-to-height ratios

跨高比 $\lambda$	施加荷载/kN	FS1耐火 时间/min	FS2耐火 时间/min	FS3耐火 时间/min	FS4耐火 时间/min
7.13	523.5	78	37	29	27
5.70	585.9	79	35	30	24
4.75	645.9	92	32	30	23

由图12可知,位于边支点和跨中区域受火的组合梁,当跨高比变化时,其跨中挠度和腹板侧向位移变化幅度均大于另外两种受火区域组合梁的跨中挠度和腹板侧向位移变化幅度,且跨高比较小的组合梁变形较小,而腹板侧向位移较大。这是由于跨高比小的组合梁其抗弯刚度相对较大,使得在相同火灾作用下,抵抗变形能力更强,但由于荷载比相同,跨高比小的组合梁施加的荷载值更大,因此腹板变形更严重。FS2位于组合梁弯矩较大区段,受火后期组合梁的抗弯刚度严重退化,较小跨高比的组合梁由于受到较大弯矩作用,将导致其跨中挠度和腹板侧向位移迅速增加。位于中支点及附近区域受火的组合梁,跨中挠度和腹板侧向位移受跨高比的影响较小,这主要是由于中支点区域为组合梁的负弯矩区段,火灾下组合梁的内力重分布使得该位置的负弯矩增大,使得中支点处出现严重塑性变形,而组合梁跨高比变化对此效应基本没有影响。结合表1可知,跨高比变化时,边支点区域受火的组合梁耐火时间最大相差14 min,而其它受火区域下组合梁耐火时间均较接近,但与中支点区域受火相比,边支点和跨中区域受火的组合梁耐火性能受荷载比的影响较大。

### 3.3 腹板波折角

为研究腹板波折角变化对组合梁耐火性能的影响,本节分析了三种不同腹板波折角组合梁的耐火性能并进行了比较。腹板尺寸如图13所示,不同腹板波折角下各火灾场景组合梁受火跨中挠度及腹板侧向位移时程曲线如图14所示,分析结果见表3。

由图14可知,不同腹板波折角的组合梁跨中挠度及腹板侧向位移发展趋势类似,但增长幅度略有不同。

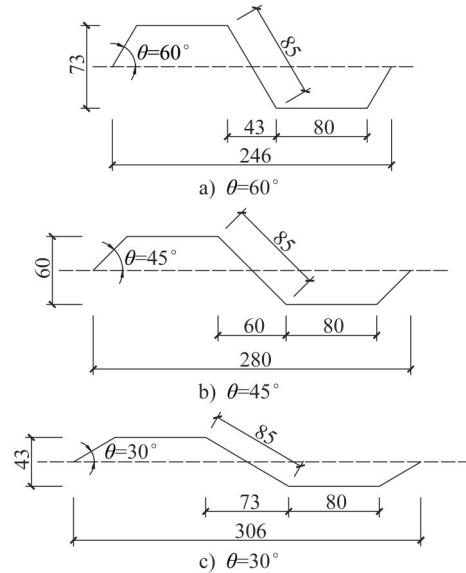


图13 不同腹板波折角

Fig. 13 Different web corrugation angles

受火区域位于边支点时,腹板波折角较大的组合梁挠度较大,而另外三种受火区域中,受火后期波折角较小的组合梁挠度变形较大。这是由于腹板波折角较大时,其褶皱效应更为明显,对组合梁抗弯性能的贡献较小,相应的组合梁其跨中挠度较大。位于跨中及中支点附近区域受火的组合梁,腹板均出现了较大塑性变形,使得受火后期组合梁处于弯剪共同作用下,在腹板波折角较小时,由于腹板平面外刚度较小,其抗剪性能较差,相应的跨中挠度较大。分析腹板侧向位移可知,波折角小的组合梁腹板侧向位移较大,并且受火后期的变形速率也较快,这是由于波折角较小时,腹板抵抗剪切变形能力较差,且受火后期其力学性能退化较严重。跨中区域受火的组合梁,在波折角为45°时,受火后期的跨中挠度和腹板侧向位移均小于另外两种腹板波折角组合梁的跨中挠度和腹板侧向位移,这是因为腹板波折角为45°的组合梁力学性能较好,既能抵抗一定的弯曲应力,又具有较好的抗剪切能力,而跨中位置所受的弯矩和荷载均较大,因此跨中受火时上述效应更为显著。结合表3可知,不同火灾场景下组合梁的耐火性能受腹板波折角变化的影响均较小,且耐火时间接近,基本可以忽略不计。

表3 不同腹板波折角组合梁分析结果对比

Table 3 Comparison of analysis results of composite girders with different web corrugation angles

腹板波折角 $\theta$	施加荷载/kN	FS1耐火时间/min	FS2耐火时间/min	FS3耐火时间/min	FS4耐火时间/min
60°	506.7	78	37	29	27
45°	523.5	78	35	29	27
30°	520.8	79	33	28	26

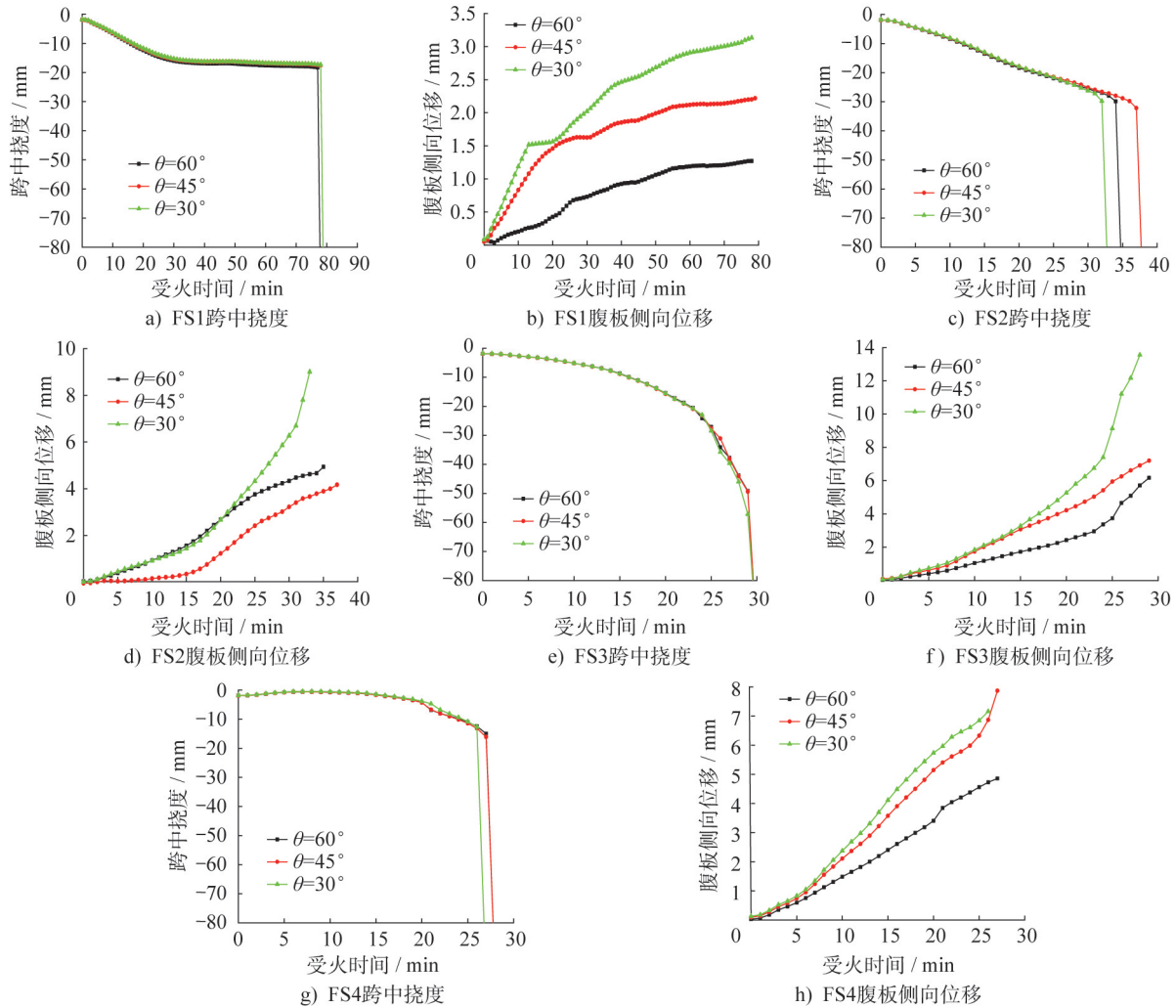


图 14 不同腹板波折角下组合梁跨中挠度及腹板侧向位移时程曲线

Fig. 14 Time-history curves of mid-span deflection and web lateral displacement of composite girders with different web corrugation angles

### 4 结论

通过对不同火灾场景下的双肋式波形钢腹板工字钢组合连续梁的耐火性能及其影响因素进行分析,可以得到以下结论:

(1) 火灾下双肋式波形钢腹板工字钢组合连续梁沿梁高方向的升温速率存在明显差异。边支点区域受火时,组合梁挠度变形较小且耐火时间较长,结构破坏形式为钢梁局部压溃;跨中位置受火的组合梁挠度变形较大,并在受火跨跨中形成塑性铰,其耐火时间小于边支点受火区域的组合梁;中支点及附近区域受火时,组合梁受火跨挠度发展趋势表现为两阶段,且腹板侧向位移较大,两种受火场景下组合梁均在中支点位置形成塑性铰,且耐火时间接近,结构表现为局部屈曲破坏。

(2) 荷载比变化对不同火灾场景下组合梁耐火性能的影响主要体现在受火后期,荷载比从0.3增大到0.5时,在边支点区域受火和在中支点处受火组合梁的耐火时间减小幅度分别为54.4%和17.9%,可见在边支点区域受

火时组合梁的耐火时间减小幅度更大。但相同荷载比下,位于中支点受火区域的组合梁耐火时间较小,因此中支点区域为组合梁耐火性能分析的最不利位置。

(3) 受火区域位于边支点及跨中时,组合梁的耐火性能受跨高比变化的影响要大于受火区域位于中支点及附近区域时的情况;受火区域位于边支点时,不同跨高比下组合梁的耐火时间最大相差14 min,而其它受火区域的组合梁在不同跨高比下耐火时间均较为接近。

(4) 不同火灾场景下组合梁的耐火性能受腹板波折角变化的影响均较小,且耐火时间接近,表明在双肋式波形钢腹板工字钢组合连续梁的抗火设计中基本可以忽略腹板波折角变化的影响。

### 参考文献:

[1] 林梦凯,冀伟,李海莲,等. 波形钢腹板工字型钢梁的手风琴效应研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(2): 283-288. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.2016.02.013.  
LIN Mengkai, JI Wei, LI Hailian, et al. Study on accordion effect

- of corrugated steel webs i-shaped steel girde [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(2): 283-288. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2016.02.013. (in Chinese)
- [ 2 ] LIN X, FAR H, SALEH A. Structural behaviour and mechanical properties of welded steel I-girders with corrugated webs[J]. International Journal of Steel Structures, 2019, 19(4): 1342-1352. DOI: 10.1007/s13296-019-00209-3.
- [ 3 ] DENG W Q, LIU D, XIONG Y Q, et al. Experimental study on asynchronous construction for composite bridges with corrugated steel webs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 157: 93-102. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019. 02.028.
- [ 4 ] 查上, 邓文琴, 刘朵, 等. 波形钢腹板工字钢-混凝土结合板梁桥设计参数分析[J]. 桥梁建设, 2023, 53(1): 87-93. DOI: 10.20051/j.issn.1003-4722.2023.01.012.  
ZHA Shang, DENG Wenqin, LIU Duo, et al. Analysis of design parameters of composite girder bridge with I steel girders, concrete slabs and corrugated steel webs[J]. Bridge Construction, 2023, 53 (1) : 87-93. DOI: 10.20051/j.issn.1003-4722.2023.01.012. (in Chinese)
- [ 5 ] 冀伟, 胡世浩, 齐振峰, 等. 波形钢腹板钢箱-混凝土组合梁桥的动力特性分析[J]. 振动测试与诊断, 2022, 42(5): 886-892, 1031-1032. DOI: 10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2022.05.007.  
JI Wei, HU Shihao, QI Zhenfeng, et al. Dynamic characteristics analysis of box girder bridges with corrugated steel webs [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(5): 886-892, 1031-1032. DOI: 10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2022.05.007. (in Chinese)
- [ 6 ] CHEN Y Y, DONG J C, XU T H, et al. The shear-lag effect of composite box girder bridges with corrugated steel webs and trusses [J]. Engineering Structures, 2019, 181: 617-628. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.12.048.
- [ 7 ] 秦翔翔, 刘世忠, 冀伟, 等. 单箱双室钢底板波形钢腹板组合箱梁扭转性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(5): 740-746. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-0505.2021.05.002.  
QIN Aoao, LIU Shizhong, JI Wei, et al. Analysis on torsion performance of single-box twin-cell composite box girder with corrugated steel webs and steel bottom plates[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(5): 740-746. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-0505.2021.05.002. (in Chinese)
- [ 8 ] 陈东亮, 张元海, 刘泽翔. 基于板元框架法的钢底板波形钢腹板组合箱梁畸变效应分析[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(12): 30-38. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.12.004.  
CHEN Dongliang, ZHANG Yuanhai, LIU Zexiang. Analysis on distortion effect of trapezoidal composite box girders with corrugated steel webs and steel bottom plates based on plate element frame method [J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(12) : 30-38. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.12.004. (in Chinese)
- [ 9 ] ZHANG Z, TANG Y, LI J, et al. Torsional behavior of box-girder with corrugated web and steel bottom flange [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 167: 105855. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105855.
- [ 10 ] DENG W Q, LIU D, PENG Z Q, et al. Behavior of cantilever composite girder bridges with CSWs under eccentric loading [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(10): 3925-3939. DOI: 10.1007/s12205-021-2328-3.
- [ 11 ] 李立峰, 蒋启昊, 王连华, 等. 变截面波形钢腹板-UHPC组合箱梁剪应力试验[J]. 中国公路学报, 2023, 36(5): 150-162. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.05.013.  
LI Lifeng, JIANG Qihao, WANG Lianhua, et al. Shear stress test of non-prismatic composite box girders with corrugated steel webs and UHPC [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36 (5) : 150-162. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.05.013. (in Chinese)
- [ 12 ] 赵品, 韩恒涛, 荣学亮, 等. 变截面波形钢腹板连续梁的抗弯性能试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(3): 425-433. DOI: 10.11990/jheu.202112003.  
ZHAO Pin, HAN Hengtao, RONG Xueliang, et al. Experimental study on the flexural performance of a continuous beam with variable section corrugated steel webs [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(3) : 425-433. DOI: 10.11990/jheu.202112003. (in Chinese)
- [ 13 ] 张岗, 贺拴海, 宋超杰, 等. 钢结构桥梁抗火研究综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(1): 1-11. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.01.001.  
ZHANG Gang, HE Shuanhai, SONG Chaojie, et al. Review on fire resistance of steel structural bridge girders [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(1) : 1-11. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.01.001. (in Chinese)
- [ 14 ] KODUR V, YAHYAI M, REZAEIAN A, et al. Residual mechanical properties of high strength steel bolts subjected to heating-cooling cycle [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 131: 122-131. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2017. 01.007.
- [ 15 ] NASER M Z, KODUR V K R. Comparative fire behavior of composite girders under flexural and shear loading [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 116: 82-90. DOI: 10.1016/j.tws.2017.03.003.
- [ 16 ] NASER M, KODUR V. Response of fire exposed composite girders under dominant flexural and shear loading [J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2017, 9(2) : 108-125. DOI: 10.1108/JSFE-01-2017-0022.
- [ 17 ] 张岗, 宋超杰, 李徐阳, 等. 碳氢火灾下钢-混组合梁破坏试验研究 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(6) : 135-146. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.06.011.  
ZHANG Gang, SONG Chaojie, LI Xuyang, et al. Experimental study on failure of steel-concrete composite bridge girders under hydrocarbon fire exposure conditions [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(6) : 135-146. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.06.011. (in Chinese)