

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.008

预应力耐火钢-混凝土连续组合梁抗火性能研究*

周焕廷¹, 郑志远², 伍先兴¹, 秦 晗¹, 张苏鹏¹

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430100)

摘要: 采用有限元软件对耐火钢预应力连续组合梁在高温下的抗弯性能进行参数研究, 引入了材料非线性、几何非线性以及钢梁初始几何缺陷, 考察了预应力组合梁在高温下的破坏形态, 耐火极限, 跨中挠度随温度及时间变化的曲线, 分别得到了不同受火工况与耐火钢使用截面位置对组合梁高温下抗弯性能的影响规律。结果表明: 不同受火工况对普通组合梁和耐火钢组合梁的抗火性能有较大影响, 组合梁在双侧受火工况下其挠度下降的幅度明显大于单侧受火工况下挠度下降的幅度, 耐火时间也明显减短; 在同一受火工况下, 其他部分使用普通钢条件下, 钢梁下翼缘使用耐火钢比腹板使用耐火钢更能有效提高组合梁在高温下的抗弯能力和耐火极限; 当组合梁中钢梁下翼缘与腹板同时使用耐火钢时能显著提高组合梁的抗火性能, 并达到与钢梁全截面使用耐火钢时同样的效果; 仅在钢梁跨中区段内下翼缘和腹板上使用耐火钢时, 耐火钢布置区段越长, 则组合梁跨中挠度下降幅度越小, 临界温度也越高。

关键词: 结构工程; 抗火性能; 有限元法; 预应力连续组合梁; 耐火钢; 受火工况

中图分类号: TU331.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0902-08

Investigation on Fire Resistance of Prestressed Fire-resistant Steel-concrete Continuous Composite Beams

ZHOU Huanting¹, ZHENG Zhiyuan², WU Xianxing¹, QIN Han¹, ZHANG Supeng¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co., Ltd., Wuhan 430100, China)

Abstract: Flexural properties of fire-resistant steel-concrete prestressed continuous composite beams at high temperatures were numerically investigated. Material nonlinearity, geometric nonlinearity and initial geometric defect of the composite beam were introduced. Effects of fire condition cases and distributed location of fire-resistant steel along the longitudinal axis of composite beams were obtained, by analyzing failure modes, fire resistance, and the variation of mid-span deflection with temperature or with time. The results show that: different fire scenarios have great influence on the fire resistance performance of both regular and fire-resistant steel-concrete composite beams, the mid-span deflection of composite beams under a combination of fire condition decreases faster than the beams under one-sided fire conditions, and the critical time is significantly shortened; Under the same fire scenario, it is found that composite beams with refractory steel flanges and regular steel webs have excellent flexural capacity and larger critical duration than composite beams with regular steel webs and flanges under

* 收稿日期: 2018-09-26; 修回日期: 2018-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878528)资助

作者简介: 周焕廷(1969-), 男, 教授, 博导。主要从事结构抗火研究。Email: zhouht@whut.edu.cn

high temperature; Composite beams made of refractory steel bottom flanges and webs and regular steel upper flanges have the same fire resistance as composite beams made of refractory steel; When refractory steel is used only as the lower flange and web in the vicinity of mid-span of the steel beam, the longer the distribution region of refractory is, the smaller the deflection is and the higher the critical temperature is.

Keywords: structural engineering; fire resistance; finite element method; prestressed continuous composite beam; fire-resistant steel; fire condition

引言

钢-混凝土组合梁具有承载力高、刚度大、抗震性能和动力性能好、构件截面尺寸小、施工快速方便等优点^[1-2]。同时随着预应力技术的出现缓解了普通钢-混凝土组合梁负弯矩区开裂和刚度不足的问题,体外预应力能减小或抵消在外荷载作用下产生的应力,达到提高负弯矩区截面开裂弯矩、改善混凝土的收缩开裂徐变、正弯矩区提高梁的承载力、减轻梁自重、提高梁刚度的效果,因其多方面性能优势,预应力连续组合梁已在高层建筑结构和大型桥梁结构中得到广泛应用^[2-3]。

钢材抗火性能不佳,在高温下普通钢的强度和弹性模量会迅速下降,进而导致建筑结构很容易遭到破坏甚至倒塌。国内外学者对组合梁的抗火性能进行了相关试验研究,并取得了一定成果^[4-6]。如 E. C. Fischer 等^[7-8]对带约束下的简支组合梁进行了试验研究与有限元非线性分析,考察了混凝土开裂和破碎,钢材的屈服和断裂,以及各种结构之间的相互作用,认为端部链接、混凝土板和钢筋的连续性对提高组合梁的抗火性能有显著作用。陈玲珠等^[9-10]通过对比中国规范与欧洲规范中组合梁抗火设计方法,认为不管高温下部分还是完全抗剪连接的组合梁,都应该进一步验算高温下剪力连接件的受剪能力。H. T. Zhou 等^[11]对预应力简支组合梁在高温下的抗弯性能进行了试验研究与数值分析,提出了经试验验证的预应力简支组合梁高温受火分析模型,认为荷载比、拉锁布置方式对组合梁的耐火性能有一定影响。

然而,以上研究中,钢梁皆为普通钢,普通钢材的力学性能指标和弹性模量在高温下迅速下降,350℃时普通钢的屈服强度降至其室温屈服强度的2/3。部分研究表明^[12-15]:对钢梁使用耐火钢能够有效提高普通钢构件的抗火能力,同时可减少保护层

涂料的厚度,增加建筑使用面积,是建筑结构防火通常采取的重要手段与措施。但耐火钢的造价十分昂贵,整个钢梁截面使用耐火钢十分不经济,会造成较大的材料浪费,若能够在组合梁受力最合理的地方使用耐火钢从而最大化提高结构的耐火性能则具有很大的工程意义。

因此,本文通过有限元方法研究耐火钢的布置位置对高温下组合梁抗弯性能的影响,采用合理的耐火钢热工参数和高温力学性能参数,引入了材料非线性、几何非线性以及钢梁的初始几何缺陷,考察其跨中挠度随温度与时间变化的曲线、耐火时间与临界温度及组合梁的破坏形式等,分别得到了不同受火工况和耐火钢不同布置位置对预应力连续组合抗火性能的影响大小和规律。

1 有限元模型

1.1 预应力连续组合梁

随着预应力技术的成熟,预应力组合梁在越来越多的建筑和桥梁结构中备受青睐。预应力连续组合梁的结构构造如图1所示。

1.2 单元选择

采用 ABAQUS 的顺序热-力耦合分析方法模拟标准升温下三面受火的耐火钢-混凝土预应力连续组合梁(简称组合梁)的抗火性能。结构分析模型中,工字钢梁、端板、加劲肋均采用三维壳单元 S4R,混凝土板采用三维实体单元 C3D8R,钢筋、预应力筋均采用三维桁架单元 T3D2,桁架单元只能承受拉力,不能承受弯矩,所以能很好的模拟构件的真实应力状态^[16-17]。组合梁网格划分如图2所示。

1.3 材料参数

混凝土采用 ABAQUS 自带的塑性损伤模型,混凝土的受压、受拉及普通钢材应力-应变关系模

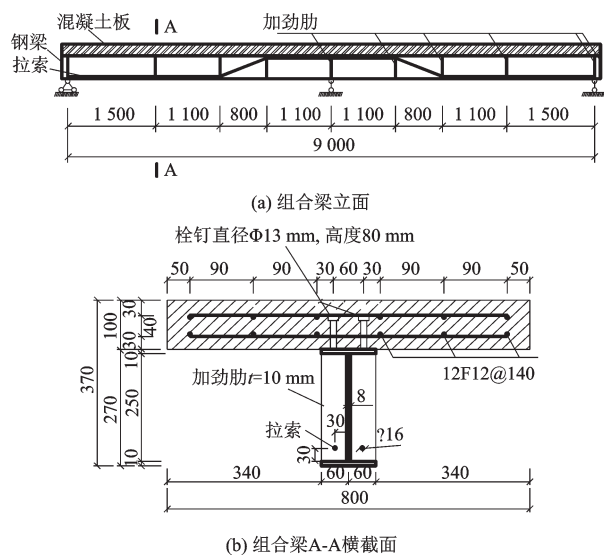


图1 预应力连续组合梁结构

Fig.1 Details of prestressed continuous composite beam



图2 预应力连续组合梁网格划分

Fig.2 Mesh of prestressed continuous composite beams

型皆采用欧洲规范 EC^[20-21]中的曲线,组合梁的材料参数见表1。

表1 预应力连续组合梁材料参数

Table 1 Material parameters of prestressed continuous composite beams

部件	尺寸	材料	布置方式
混凝土板	800 mm × 100 mm	C30	/
钢材	250 × 120 × 8 × 10	Q345	/
钢筋	横向钢筋 Φ12@150 纵向钢筋 Φ12@140	Q235	配置双层钢筋网
拉索	公称面积为 210 mm ²	1 860 MPa	对称布置拉索
栓钉	直径 13 mm 长 80 mm	Q235	双排布置,栓钉纵向间距 100 mm

高温下耐火钢导热系数、比热容与热膨胀系数等热工性能与普通钢材相差不大,采用参考文献[18]推荐的表达式。目前关于高温下耐火钢应力-应变曲线研究较少,本文分析耐火钢的应力-应变

关系模型采用理想弹塑性模型,强度准则采用 Mises 屈服准则。耐火钢的屈服强度与弹性模量对温度变化关系采用文献[15]推荐的拟合式。

1.4 边界条件

两端连续组合梁在跨内三分点处两点加载,边界条件如图3所示(其中 P 为荷载, L 为梁跨长度)。中间支座位移条件为 $U_1=U_2=U_3=0$, 梁端左 $U_1=U_2=U_3=0$, 梁端右 $U_1=U_2=U_3=0$ (其中 U_1 、 U_2 、 U_3 分别表示沿 x 、 y 、 z 轴方向上的位移, U_3 表示绕 z 轴的转角位移, x 、 y 、 z 轴方向如图2所示)。

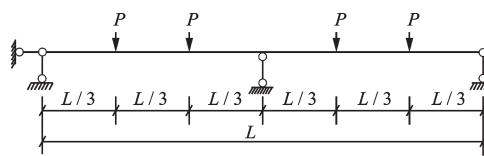


图3 组合梁边界条件

Fig.3 Boundary condition of composite beams

1.5 预应力的施加

实际工程中,拉锁穿过加劲肋板的孔洞,在构件受力后会出现拉锁沿孔洞滑动,所以分段建立拉锁,各段拉锁的端点与相接处加劲肋采用共用节点的方式连接^[11,16]。拉锁最优截面的确定原则上假定最大拉锁应力不会使钢梁下翼缘产生的初始压应力 σ_1 达到屈服强度 f_y ^[19]。采用等效降温法施加预应力,将预应力拉锁降温使之收缩,以有效模拟预应力张拉过程^[16]。

1.6 栓钉链接方式

现有文献中,常用的栓钉模拟方法有:梁单元法、弹簧单元法、弹簧单元与梁单元的配合模拟以及实体单元模拟,本文通过分析对比,拟采用文献[17]介绍的方法,使用有限元中线性连接单元 CONN3D 2 中 Cartesian-Align 属性来模拟栓钉,设置轴向非线性关系来模拟栓钉沿轴向方向滑移行为,而其他方向上的平动及转动位移始终保持一致。

1.7 初始缺陷的施加

现实的钢构件并非平直,或多或少有一定初始弯曲、初始扭曲、初始板件不平、制造偏差和构件安装偏差等,从而形成初始偏心。采用一致缺陷模态法,即将第一阶屈曲模态乘以一个放大系数,来施

加钢梁的初始几何缺陷^[16]。按现行《钢结构工程施工质量验收规范》^[19]型钢矫正后的允许矢高应小于 $L/1\ 000$ 且不超过5 mm(图4(a));对于局部屈曲时初始缺陷的施加,规定钢材矫正后的钢板局部不平度如图4(b)所示。

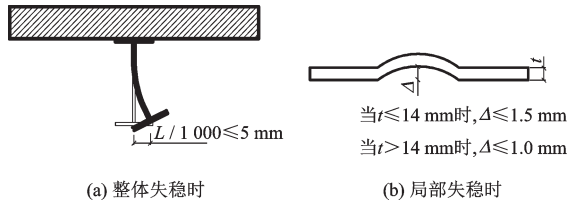


图4 结构施加的初始几何缺陷

Fig.4 Initial geometric defects applied to the structure

1.8 荷载比及预应力比的定义

荷载比的取值是所施加的荷载值与结构达到极限承载力所承受最大荷载之比。预应力的取值是所施加预应力与拉锁极限预应力之比。

2 有限元计算结果

2.1 不同受火方式的影响

考虑6种不同受火方式,即①两跨双侧受火;②一跨双侧受火一跨单侧受火;③两跨单侧受火;④一跨双侧受火;⑤两跨单侧对称受火;⑥一跨单侧受火。受火示意如图5所示。

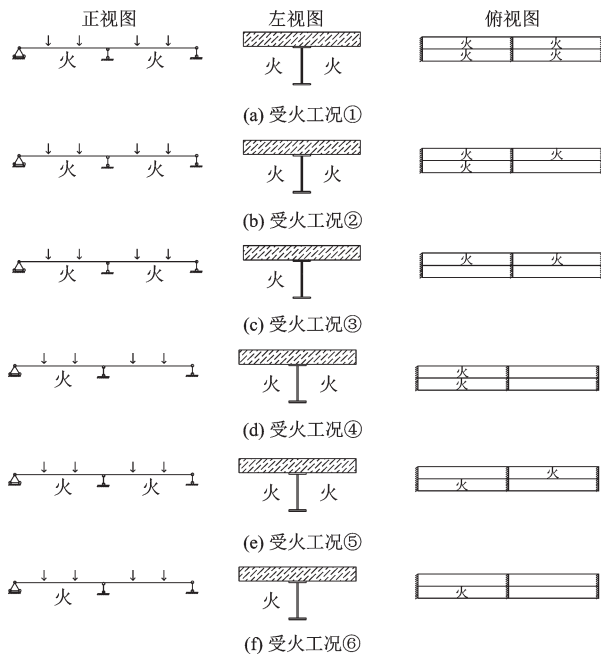


图5 不同受火工况示意

Fig.5 The diagram of different fire scenarios

2.1.1 组合梁破坏形式

不同受火方式下,组合梁的破坏形式如图6所示,从图中可见,组合梁的破坏形式主要为跨中挠度变形过大,但在不同受火工况的影响下,其破坏形式和挠度变形幅度也有所差异。在受火工况①、③、⑤下,组合梁的破坏形式均表现为两跨跨中挠度变形过大,其中受火工况①下,组合梁跨中挠度变形幅度最为明显,受火工况③下,组合梁跨中挠度变形程度较小。受火工况②、④、⑥下,组合梁的破坏形式表现为双侧受火一跨的跨中挠度变形过大,而单侧受火跨的跨中挠度变形程度较小,或未受火跨出现反拱现象,跨中挠度为负值,其中在受火工况④下,受火跨挠度变形程度最大,未受火跨反拱现象也最为明显。

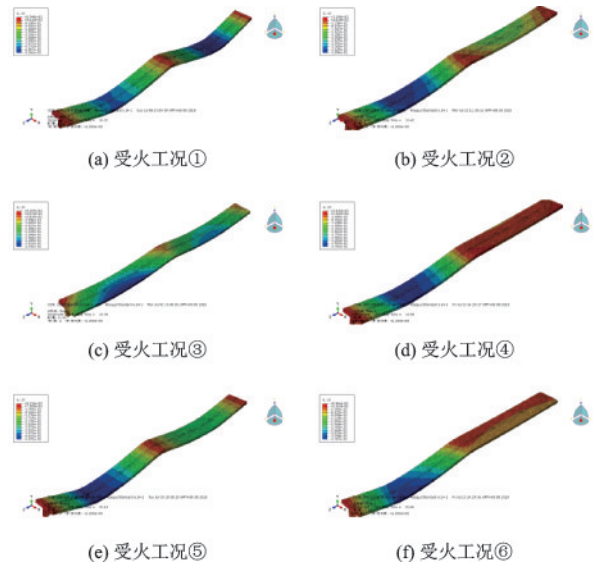


图6 不同受火工况下组合梁的破坏形式

Fig.6 Failure modes of composite beams under different fire scenarios

不同受火方式下,组合梁变形破坏时横截面如图7所示。从图中可以看到,当受火方式为双侧受火时,组合梁破坏形式主要呈现跨中挠度变形过大,其面外偏转程度较小,如工况①、④;而当受火方式主要为单侧受火或有出现单侧受火时,组合梁将出现一定程度的面外偏转,如工况②、③、⑤、⑥,其中工况③下,组合梁受火形式主要为单侧受火,其面外偏转幅度表现最为明显。

2.1.2 组合梁跨中挠度随时间变化的规律

拟研究不同受火工况对预应力连续组合梁在高温下抗弯性能的影响大小和规律,取荷载比为0.5,预应力比为0.6,提取组合梁跨中挠度随时间变

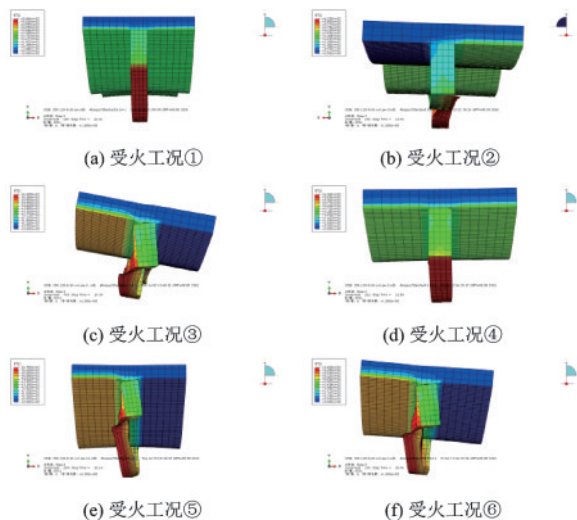
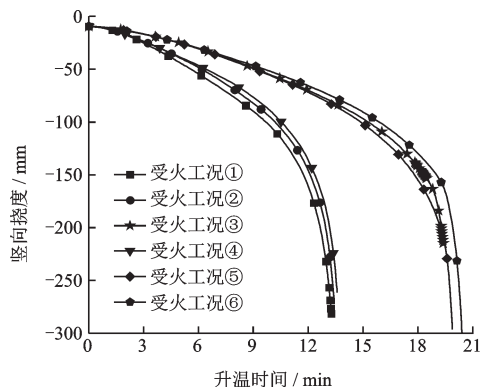


图7 不同受火工况下组合梁破坏时的横截面变形

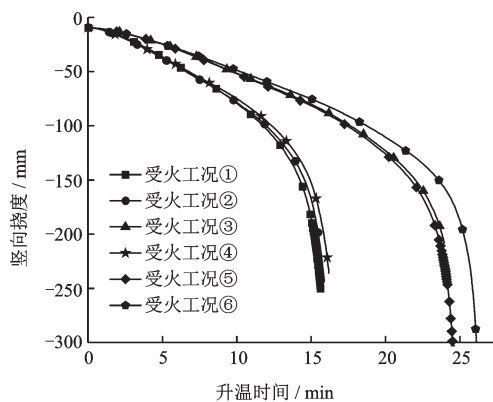
Fig.7 Deformations of cross section of composite beams under different fire scenarios

化的曲线,如图8所示。

图8(a)为钢梁全截面为普通钢时,组合梁跨中挠度随时间变化的曲线。可见其跨中挠度随升温时间的延长逐渐下降,且下降幅度逐渐增大,当到



(a) 钢梁全截面为普通钢



(b) 钢梁全截面为耐火钢

图8 不同受火工况下跨中挠度随时间变化曲线

Fig.8 The variation of mid-span deflection with time under different fire scenarios

达某一时间点时,挠度曲线基本呈一条直线下降。不同受火方式对组合梁的挠度下降幅度也有较大影响,在受火工况①、②、④下,跨中挠度随时间延长的下降幅度较大,其中在工况①两跨双侧受火下,挠度下降幅度最快;在受火工况③、⑤、⑥下,跨中挠度随时间延长的下降幅度较小,其中在工况⑥一跨单侧受火下时,挠度下降幅度最慢。当组合梁达到挠度极限值时,工况①与工况⑥下的耐火时间相差约7.2 min,减小幅度约35.1%。

图8(b)为钢梁全截面为耐火钢时,组合梁跨中挠度随时间变化的曲线。从图9中可以看到曲线具有与图8中曲线同样的规律;其中在受火工况①和⑥的影响下,组合梁的耐火时间相差约10.8 min,减小幅度约40.9%。

可见,不同受火工况对普通钢和耐火钢预应力组合梁的耐火极限有较大影响,当受火工况主要以双侧受火工况为主时,其跨中挠度随时间的延长而下降的幅度较大,耐火时间相对较短,与受火工况以单侧受火为主时相比较,组合梁的耐火时间减小幅度为35%~40%。

2.2 耐火钢布置位置的影响

在钢梁不同截面处布置耐火钢,考虑以下5种耐火钢布置工况(表2)。

表2 耐火钢布置位置

Table 2 location of refractory steel placement

耐火钢布置工况	钢梁部件		
	下翼缘	腹板	上翼缘
①	普通钢	普通钢	普通钢
②	耐火钢	普通钢	普通钢
③	普通钢	耐火钢	普通钢
④	耐火钢	耐火钢	普通钢
⑤	耐火钢	耐火钢	耐火钢

2.2.1 不同钢梁截面布置耐火钢

拟研究不同耐火钢布置工况对预应力连续组合梁在高温下抗弯性能的影响大小和规律,取荷载比为0.5,预应力比为0.6,受火方式为两跨双侧受火,提取组合梁跨中挠度随温度变化的曲线,如图9所示。

由图9可知,梁跨中挠度皆随温度升高而逐渐下降,且幅度逐渐增大,当温度上升至某一幅度时,其挠度下降基本呈一条直线。在不同耐火钢布置

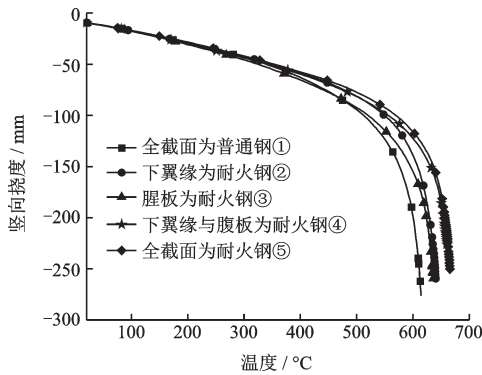


图9 不同耐火钢布置工况下跨中挠度随温度变化的曲线
Fig.9 The variation of mid-span deflection with temperature under different combinations of refractory steel and regular steel flanges and webs

情况下,梁的挠度下降幅度也有所差异,其中,当钢梁截面为普通钢时,挠度下降幅度最大;当仅梁的下翼缘或腹板为耐火钢时,组合梁跨中挠度下降幅度相对较缓且较为接近;而根据耐火钢的使用面积来看,腹板面积为 $2\,000\text{ mm}^2$,下翼缘面积为 $1\,200\text{ mm}^2$,由此可见,仅在下翼缘使用耐火钢比仅在腹板为耐火钢对梁的耐火性能贡献更大。当下翼缘和腹板都为耐火钢时,其梁的跨中挠度下降幅度更缓,相比全截面为耐火钢时,其曲线基本重合;这是由于混凝土板对上翼缘的吸热作用,导致上翼缘使用耐火钢对组合梁耐火性能贡献不大,因此在下翼缘与腹板使用耐火钢最能有效提高组合梁的耐火性能;相比全截面为普通钢时,其临界温度提高了 $50\text{ }^\circ\text{C}$,提高幅度约为 7.6% ,耐火时间延长了 2.4 min ,提高幅度约为 17.7% 。

2.2.2 跨中区段处布置耐火钢

上述研究表明钢梁腹板和下翼缘同时使用耐火钢可明显增强组合梁高温下的抗弯性能,同时也是较为经济的一种耐火钢使用方式,本文进一步研究在组合梁跨中部分区段使用耐火钢对组合梁抗弯性能的影响大小和规律。如图10所示。跨中 $L/3$ 区段阴影部分表示耐火钢的使用位置,拟研究钢梁跨中 $L/2$ 、 $L/3$ 、 $L/4$ 区段内以及全跨段内腹板和下翼缘上使用耐火钢时对组合梁抗火性能影响的大小和规律。

图11为在双侧受火工况下,钢梁跨中区段内腹板与下翼缘布置耐火钢时组合梁跨中挠度随温度变化的曲线。从图中可以看到,组合梁的跨中挠度随温度上升而逐渐下降,当温度上升至某个值时,挠度下降幅度急剧增大。不同耐火钢布置位置对

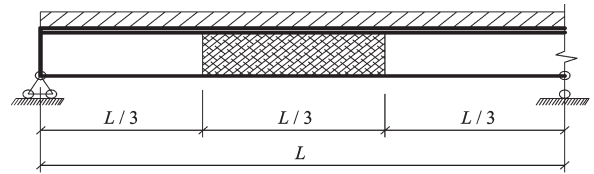


图10 组合梁耐火钢布置位置示意

Fig.10 Diagram of distribution of refractory steel along the longitudinal axis of beams

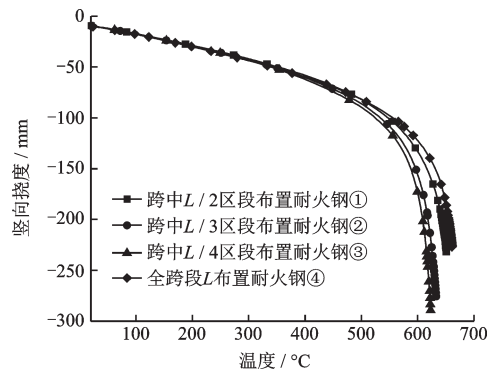


图11 钢梁跨中不同区段内布置耐火钢时跨中挠度随温度变化的曲线

Fig.11 Location effects of distribution of refractory steel on variation of mid-span deflection with temperature of composite beams

组合梁跨中挠度随温度变化的规律也有一定影响,耐火钢布置的区段越短,组合梁的跨中挠度随温度上升而下降的幅度也越大。此外,当耐火钢布置区段从全跨长度减小至 $L/2$ 区段时,组合梁跨中挠度下降幅度虽有增大,但不明显,对比其临界温度从 $673.2\text{ }^\circ\text{C}$ 下降至 $663.3\text{ }^\circ\text{C}$,下降了 $10\text{ }^\circ\text{C}$;而当耐火钢布置区段从跨中 $L/2$ 区段减小至 $L/3$ 区段时,组合梁在高温下的跨中挠度下降幅度有明显增大,对比其临界温度从 $663.3\text{ }^\circ\text{C}$ 下降至 $647.1\text{ }^\circ\text{C}$,下降了 $17\text{ }^\circ\text{C}$ 。由此认为在钢梁下翼缘与腹板的跨中 $L/2$ 区段布置耐火钢可取得相对较高的经济效益。

3 结论

(1)在不同受火工况下,组合梁的破坏形式皆为跨中挠度变形过大导致的弯曲破坏,但不同受火工况对组合梁破坏时的面外偏转程度、挠度下降幅度皆有一定影响,其中当组合梁受火形式主要以单侧为主(如两跨单侧受火,一跨单侧受火)时,组合梁的偏转程度较大;当受火方式主要集中于某一跨(如一跨双侧受火、一跨单侧受火)时,组合梁在该

跨跨中有较大竖向挠度变形,而在另一跨跨中的挠度变形则较小,甚至会有反拱现象。

(2)不同受火工况对普通钢和耐火钢预应力组合梁的耐火极限有较大影响。当受火工况主要以双侧受火工况为主时,其跨中挠度随着时间的延长而下降的幅度较大,耐火时间较短。相比受火工况以单侧受火为主时,组合梁的耐火时间减小幅度为35%~40%。

(3)翼缘使用耐火钢比腹板使用耐火钢更能提高组合梁在高温下的抗弯能力,具有更优的经济效益;由于混凝土板的吸热作用,对钢梁上翼缘使用耐火钢对组合梁的耐火性能贡献不大,而仅对下翼缘和腹板使用耐火钢可达到与钢梁全使用耐火钢时同样的耐火效果,相比全截面为普通钢时,其临界温度提高幅度约为7.6%,耐火时间延长幅度约为17.7%。

(4)对钢梁跨中某区段内腹板与下翼缘上使用耐火钢时,其耐火钢布置区段越长,则组合梁跨中挠度下降幅度越小,临界温度也越高。

参考文献:

- [1] 王卫永,李国强.钢-混凝土组合梁抗火性能研究综述[J].建筑钢结构进展,2014,16(5):1-9.
Wang W Y, Li G Q. A state-of-the-art review on fire resistance of steel-concrete composite beams[J]. Progress in Steel Building Structures, 2014, 16(5): 1-9. (in Chinese)
- [2] 郝江华,周现伟,郝丽,等.钢-混凝土组合梁的综合[J].水利与建筑工程学报,2011,9(2):160-164.
Hao J H, Zhou X W, Hao L, et al. Summary of steel-concrete composite beams[J]. Journal of Water Conservancy and Construction Engineering, 2011, 9(2): 160-164. (in Chinese)
- [3] 余志武,丁发兴.钢-混凝土组合结构抗火性能研究与应用[J].建筑结构学报,2010,31(6):96-109.
Yu Zh W, Ding F X. Fire performance research and application on steel-concrete composite structures [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 96-109. (in Chinese)
- [4] 陶慕轩,聂建国.预应力钢-混凝土连续组合梁的非线性有限元分析[J].土木工程学报,2011,44(2):8-20.
Tao M X, Nie J G. Nonlinear finite element analysis of prestressed continuous steel-concrete composite beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 8-20. (in Chinese)
- [5] 聂建国,陶慕轩.预应力钢-混凝土连续组合梁的承载力分析[J].土木工程学报,2009,42(4):38-47.
Nie J G, Tao M X. Bearing capacity analysis of prestressed continuous steel-concrete composite beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(4): 38-47. (in Chinese)
- [6] 姚伟发,黄侨,张秀娟.火灾环境下钢-混凝土组合梁力学性能试验研究[J].工程力学,2016,33(8):59-65.
Yao W F, Huang Q, Zhang X J. Experimental study on mechanical performance of steel-concrete girders under fire loading [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(8): 59-65. (in Chinese)
- [7] Fischer E C, Varmr A H. Fire behavior of composite beams with simple connections: benchmarking of numerical models[J]. Journal of Constructional Steel Research (S0143-974X), 2015, 111:112-125.
- [8] Fischer E C, Varma A H. Fire resilience of composite beams with simple connections: parametric studies and design [J]. Journal of Constructional Steel Research (S0143-974X), 2017, 128:119-135.
- [9] 陈玲珠,蒋首超,李国强,等.不同规范组合梁抗火设计方法的比较和分析[J].防灾减灾工程学报,2015,35(1):69-78.
Chen L Zh, Jiang Sh Ch, Li G Q, et. al. A comparative study among available design guidelines for composite beams in fire [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(1): 69-78. (in Chinese)
- [10] 陈玲珠,蒋首超,李国强.高温下栓钉剪力连接件的结构性能数值模拟研究[J].防灾减灾工程学报,2012,32(1):77-82.
Chen L Zh, Jiang Sh Ch, Li G Q. Numerical simulation of the structural performance of a stud shear link under high temperature [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(1): 77-83. (in Chinese)
- [11] Zhou H T, Li Sh Y, Chen L, et al. Fire tests on composite steel-concrete beams prestressed with external tendons [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 143: 62-71.
- [12] 蒋翔,童根树,张磊.耐火钢-混凝土组合梁抗火性能非线性有限元分析[J].钢结构,2016,31(3):29-34.
Jiang X, Tong G Sh, Zhang L. Nonlinear FEM analysis of fire-resistance of fire-resistant steel-concrete composite beams [J]. Steel Construction, 2016, 31(3): 29-34. (in Chinese)
- [13] 蒋首超,陆立新,李国强.马钢耐火钢高温下材料性能试验研究[J].土木工程学报,2006,39(8):72-75.

- Jiang Sh Ch, Lu L X, Li G Q. An experimental study on high-temperature properties of fire-resistant steel made by masteel[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (8): 72-75. (in Chinese)
- [14] 蒋翔,童根树.耐火钢-混凝土简支组合梁抗火性能[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):68-74.
Jiang X, Tong G Sh. Fire-resistance performance of simply supported fire-resistant steel-concrete composite beams[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49 (12): 68-74. (in Chinese)
- [15] 蒋翔,童根树,张磊.耐火钢-混凝土组合梁耐火极限和承载力[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(8): 1 482-1 492.
Jiang X, Tong G Sh, Zhang L. Fire resistance and bending bearing capacity of fire-resistant steel-concrete composite beams [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(8): 1 482-1 492. (in Chinese)
- [16] 贾元林,陈世鸣,体外预应力钢-混凝土连续组合梁非线性数值分析[J].同济大学学报(自然科学版),2011, 39(9):1 258-1 265.
Jia Y L, Chen Sh M. Nonlinear finite element analysis of prestressed continuous steel-concrete composite beams with external tendons [J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition), 2011, 39(9): 1 258-1 265. (in Chinese)
- [17] 贾元林,陈世鸣.体外预应力钢-混凝土连续组合梁的试验研究及有限元分析[J].结构工程师,2012,28(1): 21-31.
Jia Y L, Chen Sh M. Experimental study and FEM analysis of externally prestressed steel-concrete composite continuous beams [J]. Structural Engineers, 2012, 28 (1): 21-31. (in Chinese)
- [18] Ding J, Li G Q, Sakumoto Y. Parametric studies on fire resistance of fire-resistant steel members[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 60 (7) : 1 007-1 027.
- [19] 钢结构工程施工质量验收规范:GB50205—2001[S].北京:中国标准出版社,2002.
Standard for acceptance of construction quality of steel structures: GB50205—2001 [S]. Beijing: China Standard Press, 2002.(in Chinese)
- [20] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 3: design of steel structures, part 1.2: general rules-structural fire design[S]. [S.l.]: [s.n.], 2005.
- [21] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 4: design of composite steel and concrete structures, part 1.2: general rules-structural fire design[S]. [S.l.]: [s.n.], 2005.

(本文责编:池营营)