

负弯矩区采用 RPBL 连接的钢-混凝土组合梁高温下 截面塑性铰演化研究

陈喜芝, 周焕廷*, 阮健, 陈建平
(武汉理工大学, 武汉 430070)

摘要: 为探究高温环境下采用 RPBL (Rubber-Ring Perfobond Leiste) 连接件的钢-混凝土组合梁在负弯矩区塑性铰的形成机理, 本文建立了该类组合梁在火灾条件下的数值模型。通过分析组合梁支座截面应力的演化过程, 研究了不同温度条件下负弯矩区的变形特征。此外, 重点考察了底部钢梁翼缘宽厚比、腹板高厚比以及混凝土板厚度与截面总高度之比等关键参数对塑性铰形成的影响。研究结果表明: 在高温作用下, 负弯矩区 RPBL 连接件组合梁的混凝土板内钢筋及下部钢梁的纵向应力随温度升高而逐渐衰减。此外, 底部钢梁翼缘宽厚比、腹板高厚比以及混凝土板厚度与截面总高度之比对塑性铰的形成具有显著影响。当底部钢梁翼缘宽厚比为 5.56、腹板高厚比为 16.67、混凝土板厚度与截面总高度之比为 0.36 时, 组合梁负弯矩区能够形成塑性铰并发生强度破坏。本文研究成果可为实际工程中结构的抗火设计提供重要参考。

关键词: 钢-混凝土组合梁; RPBL 连接件; 塑性铰; 负弯矩区; 抗火性能

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)08-0092-08

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20250322001

Study on the Evolution of Plastic Hinges in the Negative Moment Region of Steel-Concrete Composite Beams with RPBL Connections at High Temperatures

CHEN Xizhi, ZHOU Huanting*, RUAN Jian, CHEN Jianping
(Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)
*Corresponding author: zhouht@whut.edu.cn

Abstract: To investigate the formation mechanism of plastic hinges in the negative bending moment region of steel-concrete composite beams with rubber-ring perfobond leiste (RPBL) connectors under high temperature conditions, a numerical model of the steel-concrete composite beam with RPBL connectors under fire conditions was established in this study. The evolution of the stress distribution in the support cross-section of the composite beam was analyzed, and the deformation behavior of the negative bending moment region under different temperatures was explored. Additionally, the effects of three key cross-sectional parameters—namely the flange width-to-thickness ratio, web height-to-thickness ratio of the steel beam, and the ratio of concrete slab thickness to total section height—on the formation of plastic hinges in the negative bending moment region of steel-concrete composite beams with RPBL connectors were examined. The results showed that, under high temperature conditions, the longitudinal stresses in

收稿日期: 2025-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(52378533)

作者简介:

陈喜芝(1973—), 女, 学士, 主要从事检测方面的工作。E-mail: 569513706@qq.com。

通信作者:

周焕廷(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事结构抗火方面的研究。E-mail: zhouht@whut.edu.cn。

the steel reinforcement within the concrete slab and in the lower steel beam of the composite beam decreased gradually as the temperature increased. The flange width-to-thickness ratio, web height-to-thickness ratio, and the ratio of concrete slab thickness to total section height significantly affected the formation of plastic hinges in the negative bending moment region of the RPBL-connected composite beam at high temperatures. When the flange width-to-thickness ratio of the steel beam was 5.56, the web height-to-thickness ratio was 16.67, and the ratio of the concrete slab thickness to the total section height was 0.36, plastic hinges were formed in the negative bending moment region of the composite beam, leading to strength failure. The findings of this study can provide valuable references for the design of practical engineering structures.

Keywords: steel-concrete composite beam; RPBL connector; plastic hinge; negative moment zone; fire resistance

钢-混凝土组合梁通过将钢材与混凝土两种材料有机结合,充分发挥各自的性能优势,在现代建筑与桥梁工程中具有显著的综合效益^[1]。在工程结构中,连续组合梁的形式较为常见,相对于简支梁,连续组合梁的承载力有显著提升^[2]。当连续组合梁受到荷载作用时,中支座附近会承受负弯矩,导致混凝土板在受拉状态下容易开裂,钢梁在受压情况下易发生屈曲。同时,混凝土板与钢梁所承受的复杂应力状态也给连接件设计带来了挑战^[3]。因此,在实际工程中,钢-混凝土连续组合梁常常由于负弯矩区率先达到临界状态而导致整个结构提前失效。

针对组合梁负弯矩区上部混凝土板易开裂的问题,目前的解决方法主要包括“抗”与“放”两种措施,即“增强抗力”与“释放应力”。从“抗”的角度来看,增加混凝土板的配筋率^[4]、采用高性能混凝土^[5]、在混凝土中掺入纤维^[6]以及应用预应力技术^[7],均能有效提高混凝土板的抗裂性能。然而,这些方法也会增加材料投入和施工难度。聂建国等^[8]则从“放”的角度提出了抗拔不抗剪栓钉连接件的概念,通过在栓钉的钉身周围包裹一层低弹性模量材料,降低栓钉的抗剪刚度,从而释放上部混凝土板和底部钢梁之间的纵向滑移约束,在几乎不减小组合梁整体刚度的前提下,显著提高混凝土的抗裂性能。LIU等^[9]提出了一种新的RPBL(Rubber-Ring Perfobond Leiste)连接件方案,即在开孔钢板孔内布置橡胶环。这种RPBL连接件不仅能够增强截面的抗弯刚度,还能够释放上部混凝土板与底部钢梁之间的纵向滑移约束,从而延缓混凝土开裂。

钢-混凝土组合梁在负弯矩区的塑性铰演化规律是结构分析中的重要内容。贾远林等^[10]采用有限元方法研究了体外预应力组合梁在负弯矩作用下塑性铰的长度。EHSANI等^[11]通过试验研究了在两跨连续混凝土梁中应用高性能纤维增强水泥基复合材料(HPFRC)层对组合梁负弯矩区弯矩重分布和塑性铰长度的影响,试验结果表明,HPFRCC材料具有较好的抗裂性和延性,能够提高梁的承载能力和延性。在高温环境下,负弯矩区塑性铰的发展规律则呈现出显著差异。高温会显著改变钢材和混凝土的力学性能、界面黏结行为及组合作用,

进而影响塑性铰的形成机制和破坏模式。BARROS等^[12]基于塑性铰评估了组合结构在火灾条件下的变形能力和极限承载力。由此可以看出,以上研究均未涉及高温下钢-混凝土组合梁的塑性铰形成条件与演化过程。

负弯矩区是否形成塑性铰是决定截面各材料是否充分利用的关键。为了探讨高温条件下组合梁负弯矩区塑性铰的形成机理,本文对高温下组合梁负弯矩截面受力演化过程进行分析,确定负弯矩区采用RPBL连接的组合梁能够形成塑性铰的关键参数,如底部钢梁翼缘宽厚比、腹板高厚比以及混凝土板厚度与截面总高度之比的取值,为实际工程设计提供可靠的依据。

1 有限元模型建立及验证

1.1 组合梁模型

本文参考规范《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[13]对连续组合梁进行设计,梁的总长为4 600 mm,单跨为2 000 mm,截面高度为230 mm。组合梁负弯矩区中RPBL连接件的长度取1 020 mm、高度取50 mm、开孔孔径取20 mm、开孔间距取70 mm,RPBL连接件厚度与底部钢梁腹板的厚度保持一致,取6 mm。其中混凝土强度等级为C30,钢筋采用HRB400,钢梁与加劲肋采用Q235钢,组合梁承受两点对称加载,组合梁底部钢梁及连接件布置如图1所示。

采用有限元软件ABAQUS建立负弯矩区采用RPBL连接件钢-混凝土组合梁高温下的有限元模型,采用顺序耦合的方式进行分析。热分析中,钢梁采用单元DS4模拟、混凝土板和RPBL接头采用单元DC3D8模拟、钢筋采用单元DC1D2模拟。高温下混凝土与钢材的热工参数分别按文献[14]和[15]取值。采用ISO834标准升温曲线,受火方式为三面受火,即钢梁上翼缘下表面、腹板两侧、下翼缘以及混凝土板下表面受火,连续组合梁的网格划分如图2所示。

力学分析模型中,钢梁采用单元S4R模拟、混凝土和RPBL连接件采用单元C3D8R模拟,考虑到RPBL连接件孔内的贯穿横筋主要承受弯曲变形,贯穿横筋采用单元C3D8R模拟、其余钢筋则采用单元T3D2模拟。混凝

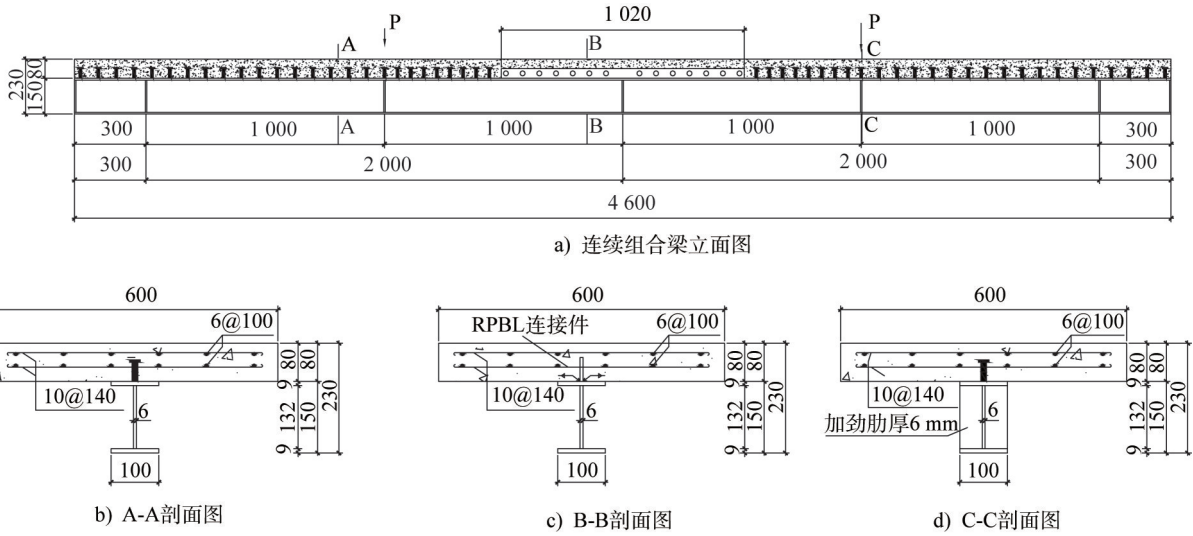


图1 连续组合梁设计图(单位:mm)

Fig. 1 Design drawing of continuous composite beam (unit: mm)

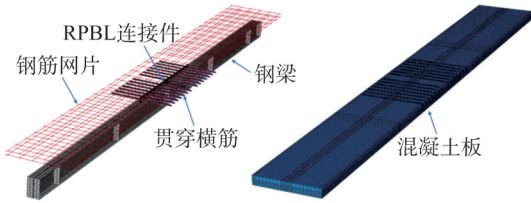
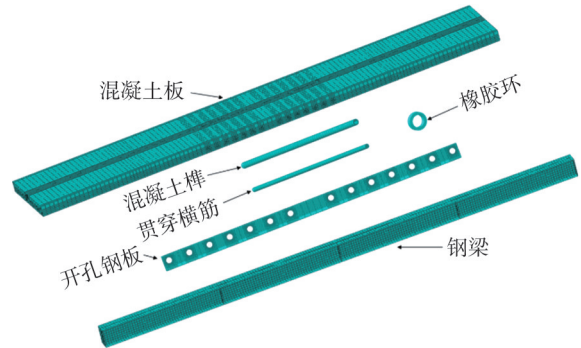


图2 组合梁热分析模型部件类型

Fig. 2 Component types of composite beam thermal analysis model



a) 组合梁构件网格划分

b) 组合梁加载情况

图3 组合梁有限元模型

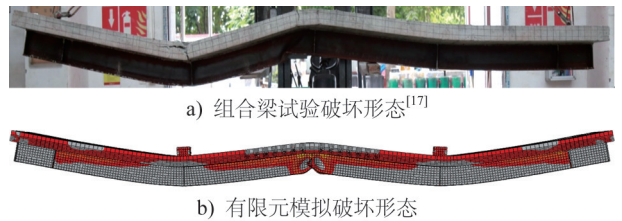
Fig. 3 FEM of composite beam

土力学性能采用ABAQUS中自带的混凝土塑性损伤模型,高温下混凝土及钢材的应力-应变关系采用欧洲规范^[14-15]中的模型。低弹模材料橡胶高温下的力学模型取自文献^[16]。

考虑计算成本,钢梁与混凝土板间的抗剪栓钉采用线性连接单元CONN3D2中的Cartesian-Align模拟,混凝土榫(贯穿横筋外围混凝土)与混凝土板、贯穿横筋与混凝土榫、橡胶环内侧与混凝土榫及RPBL连接件底部与钢梁上翼缘之间均采用tie约束;橡胶环外侧与开孔钢板孔内接触面及RPBL连接件各侧面与混凝土板之间接触面采取法向为硬接触、切向为罚约束。组合梁主要部件的结构网格划分如图3所示。

1.3 有限元模型验证

为了验证所建立模型的准确性,本文采用相应的建模方法对文献^[17]中所述的CCB-RPBL试验梁进行了高温性能的模拟。图4为CCB-RPBL组合梁的破坏形态对比。从图中可以看出,在试验与有限元模拟中,组合梁的两跨跨中挠度均出现了明显的增大。同时,在中支座底部的钢梁腹板和钢梁下翼缘均发生了屈曲现象,二者的破坏形态高度一致。



a) 组合梁试验破坏形态^[17]

b) 有限元模拟破坏形态

图4 组合梁破坏形态对比

Fig. 4 Comparison of failure modes between test and FEA

图5a)为热分析中试验测点与有限元模拟温度随时间变化的曲线,图5b)为热分析中左跨跨中挠度随温度变化的曲线。通过对比可以看出,模拟结果与试验结果吻合较好,因此可以认为本文所采用的建模方法是可靠的。

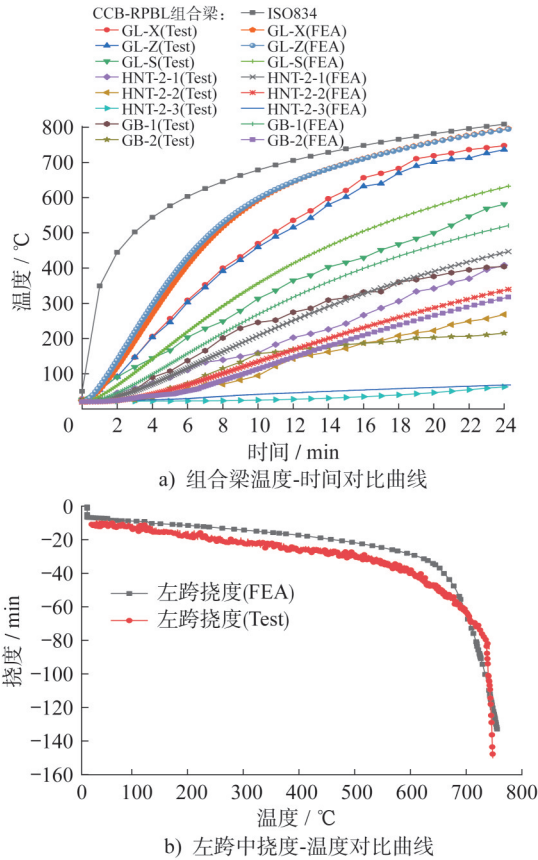


图5 有限元结果与试验结果^[17]对比图

Fig. 5 Comparison of results between test and FEA^[17]

2 高温下钢-混凝土组合梁负弯矩区塑性铰分析

2.1 组合梁中支座截面弯矩及正应力演化过程分析

RPBL组合梁中支座截面弯矩随温度的变化曲线如图6所示。中支座截面弯矩随温度的升高变化趋势大致可分为三个阶段:第I阶段(20℃~161℃),组合梁中支座截面负弯矩值保持较高的增长速率,其平均增长速率为 $0.296 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{°C}^{-1}$,这是因为随着受火时间的增加,产生的温度效应使整根组合梁下部受压,上部受拉,在中支座截面处产生负弯矩;第II阶段(161℃~400℃),组合梁中支座截面负弯矩值继续增大,但平均增长速率减缓至 $0.032 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{°C}^{-1}$,这是因为随着受火时间的增加,温度不断由高温区域向低温区域传递,组合梁沿截面高度方向的温度梯度减小,从而减弱了温度效应;第III阶段(400℃~756℃),组合梁底部钢梁温度超过400℃后,钢材弹性模量受温度影响劣化严重,导致截面抗弯刚度减小,中支座截面弯矩不断减小,直至达到临界状态。

组合梁中支座截面上部拉应力主要由混凝土板内的受力纵筋承担,压应力主要由底部钢梁承担。提取组合梁中支座截面各典型温度下截面正应力的分布情况如图7所示。在20℃时,组合梁中支座截面中和轴位于底

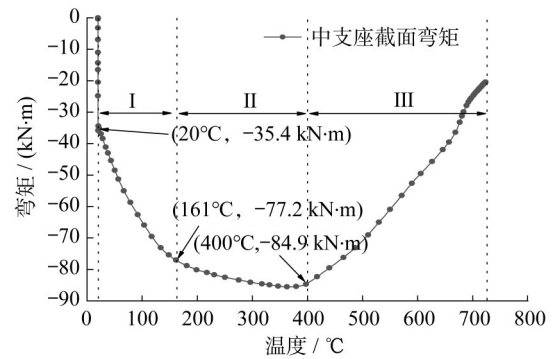


图6 组合梁中支座截面弯矩-温度曲线

Fig. 6 Moment-temperature curve of the mid-support cross-section of the composite beam

部钢梁腹板内,混凝土板内纵筋和底部钢梁均处于弹性状态,截面应力分布符合平截面假定;当温度上升至100℃时,从钢梁底部向上截面高度约50mm的范围达到屈服应力;当温度由150℃上升至300℃时,截面中和轴位置逐渐上移,底部钢梁达到屈服状态的高度不断增大,由75mm增大至130mm,上部混凝土板内的纵向受拉钢筋也相继达到屈服,相应地,截面受拉区高度不断减小;温度超过400℃后,底部钢梁沿截面高度方向的正应力呈现出腹板中部应力最小,下翼缘应力次之,钢梁上翼缘应力较大的分布模式。这与不同受火时间下钢梁截面沿高度方向的温度分布情况有关。

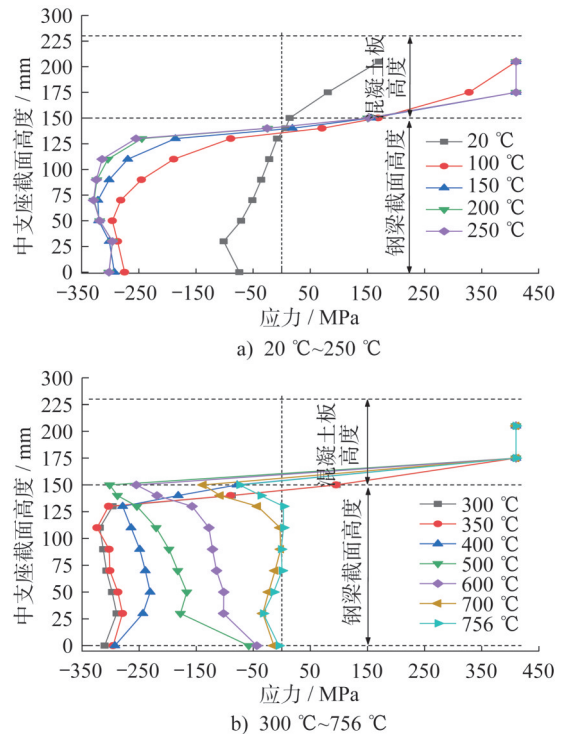


图7 组合梁中支座截面应力分布图

Fig. 7 Stress distribution in the mid-support cross-section of the composite beam

2.2 负弯矩区采用RPBL连接组合梁塑性铰形成判断准则

钢-混凝土组合梁负弯矩区截面上部混凝土板处于受拉状态,底部钢梁下翼缘处于受压状态。混凝土板的抗拉强度较低,在较低应力下就会发生开裂现象,上部拉应力主要靠内部的纵向受拉钢筋承担,因此在分析组合梁负弯矩区截面是否形成塑性铰时,主要分析上部受拉纵筋和底部钢梁的应力。在组合梁负弯矩区应力演化过程中,截面弹性核的高度在不断减小,但很难达到全截面应力为矩形分布的塑性铰条件,本文认为当组合梁截面弹性核的高度小于截面总高度 h 的15%时,即认为该截面形成了塑性铰。

3 负弯矩区采用RPBL连接组合梁形成塑性铰的合理参数取值

钢-混凝土组合梁主要包括上部混凝土板和底部钢梁,影响截面塑性铰参数包括底部钢梁翼缘宽厚比 b/t 、腹板高厚比 h_w/t_w 及上部混凝土板厚度与截面总高度之比 h_c/h 。通过控制变量法,确定组合梁负弯矩区截面形成塑性铰时各参数的合理取值。

3.1 钢梁翼缘宽厚比

在讨论组合梁底部钢梁翼缘宽厚比的合理取值时,翼缘厚度为6、9和12 mm(对应翼缘宽厚比为8.33、5.56和4.17)、截面其余几何参数不变,研究各温度下组合梁中支座截面应力随温度演化过程的分布与临界温度下组合梁的变形形态,分别如图8与图9所示。

通过对三种不同工况下钢梁翼缘宽厚比的分析,可以发现,对于负弯矩区采用RPBL连接的两跨连续组合梁,在翼缘宽厚比为8.33时,当温度达到700℃时,钢梁下翼缘应力由压应力变为拉应力(图8a),钢梁下翼缘发生明显的屈曲现象(图9a),不满足局部稳定要求。当翼缘宽厚比为5.56时,临界状态下,中支座底部钢梁下翼缘未发生屈曲现象(图9b),而是发生弯曲变形,钢梁下翼缘满足局部稳定要求,且组合梁弹性核的最小高度占比为10.87%,负弯矩区可形成塑性铰,各部件材料性能得到充分利用。当钢梁下翼缘宽厚比进一步减小至4.17时,临界状态下,钢梁下翼缘未发生屈曲现象(图9c),并且钢梁下翼缘的弯曲变形更不明显。因此为了保证负弯矩区采用RPBL连接组合梁中支座能形成塑性铰,钢梁下翼缘宽厚比的取值不应大于5.56。

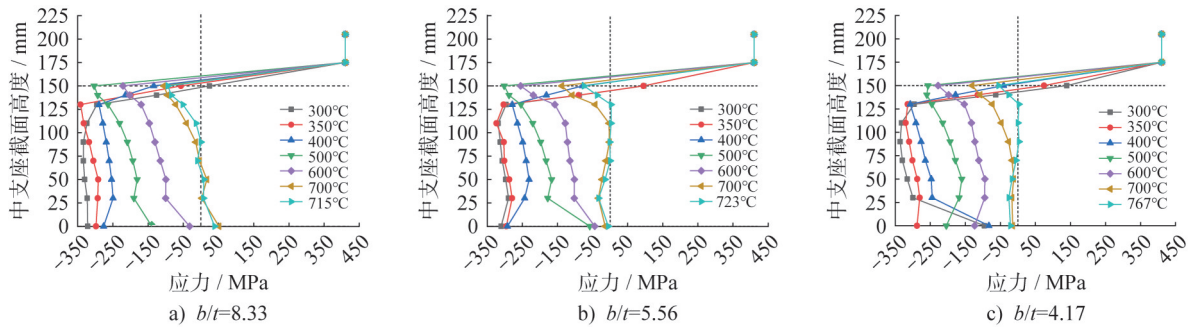


图8 不同翼缘宽厚比的组合梁中支座截面应力分布图

Fig. 8 Stress distribution in the mid-support cross-section with different width-to-thickness ratios of flange

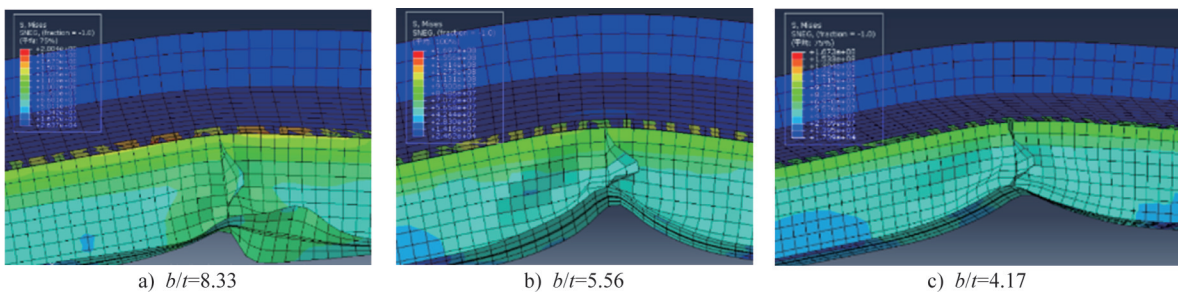


图9 临界温度下不同翼缘宽厚比组合梁的破坏形态(单位:Pa)

Fig. 9 Failure modes of composite beams with different width-to-thickness ratios of flange at critical temperature(unit: Pa)

3.2 钢梁腹板高厚比

在讨论底部钢梁腹板高厚比的取值时,研究了腹板高度分别为100、120和150 mm(对应腹板高厚比为

16.67、20.00和25.00)时,各温度下组合梁中支座截面应力随温度演化过程的分布与临界温度下组合梁变形形态,如图10与图11所示。

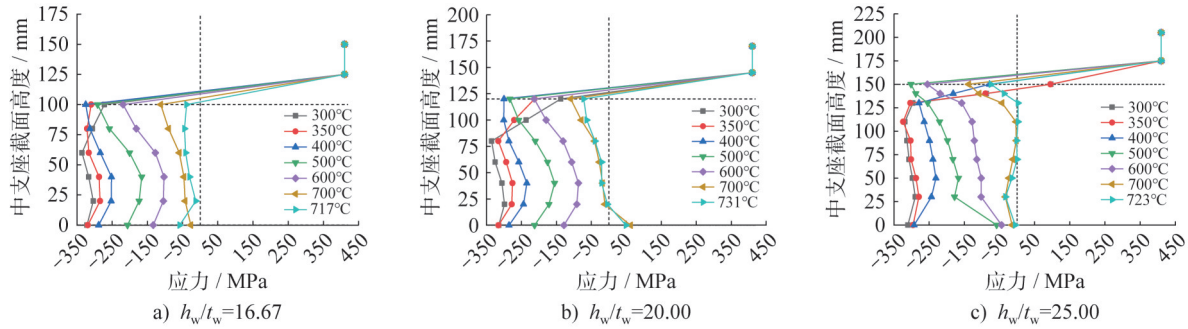


图 10 不同腹板高厚比的组合梁中支座截面应力分布图

Fig. 10 Stress distribution in the mid-support cross-section with different height-to-thickness ratios of web

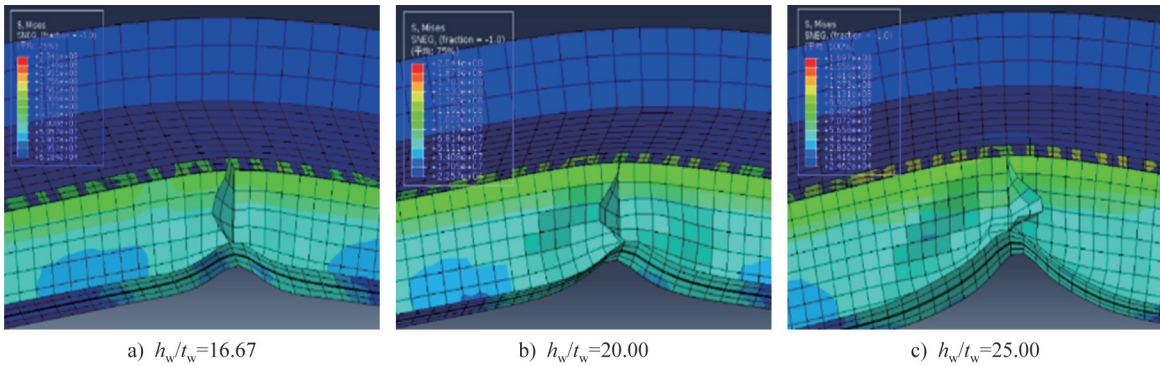


图 11 临界温度下不同腹板高厚比组合梁的破坏形态(单位: Pa)

Fig. 11 Failure modes of composite beams with different height-to-thickness ratios of web at critical temperature(unit : Pa)

通过对三种不同腹板高厚比组合梁在各温度下中支座截面应力及变形形态的分析,可以发现,当腹板高厚比为 16.67 时,组合梁在临界状态下,钢梁腹板未发生明显的屈曲现象(图 11a);从组合梁中支座截面应力的分布情况也可以发现,在整个升温过程中,底部钢梁均处于受压状态(图 10a),但是底部钢梁并未发生明显的屈曲现象;并且在整个升温过程中,中支座截面弹性核的最小高度占比为 13.89%,最终组合梁发生强度破坏,因此可以认为组合梁中支座截面可形成塑性铰。当腹板高厚比增大为 20.00 和 25.00 时,组合梁在中支座发生屈曲破坏。

因此为了保证负弯矩区采用 RPBL 连接组合梁中支座能形成塑性铰,钢梁腹板高厚比为 16.67。

3.3 混凝土板厚度与截面总高度之比

上部混凝土板的厚度在截面形成塑性铰过程中发挥了极大的作用,这体现在改变塑性铰截面的拉压合力的力臂。故分别分析混凝土板厚度为 80、100、120 mm(对应于混凝土板与截面总高度比分别为 0.31、0.36 和 0.40)时,各温度下组合梁中支座截面应力随温度演化过程的分布与临界温度下组合梁变形形态,如图 12 与图 13 所示。

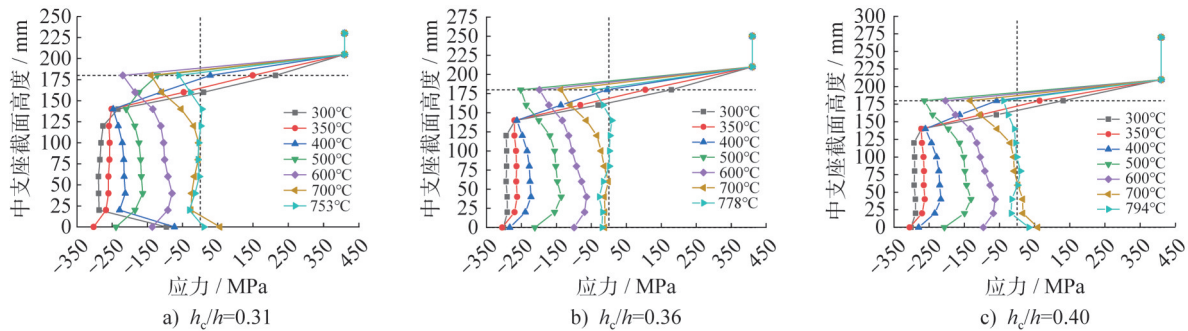


图 12 不同混凝土板厚度与截面总高度比的组合梁中支座截面应力分布图

Fig. 12 Stress distribution in the mid-support cross-section with different ratios of the concrete slab thickness to the total section height

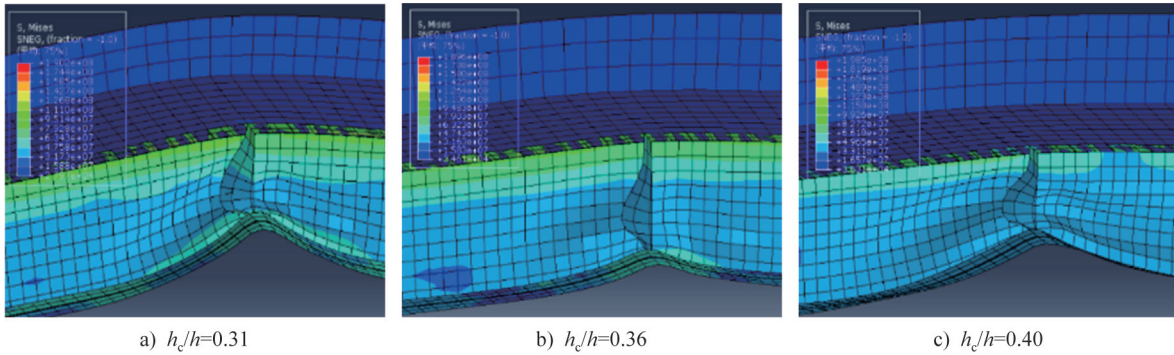


图 13 临界温度下不同混凝土板厚度与截面总高度比组合梁的破坏形态(单位:Pa)

Fig. 13 Failure modes of composite beams with different ratios of the concrete slab thickness to the total section height at critical temperature(unit: Pa)

通过对三种不同混凝土板厚度与截面总高度比的组合梁在各温度下中支座截面应力及变形形态的分析,可以发现,当混凝土板厚度与截面总高度比为0.31时,在临界状态下,组合梁腹板发生明显的屈曲现象(图13a));在700℃时,钢梁腹板应力由压应力变为拉应力(图12a));腹板不满足局部稳定要求,此时组合梁的破坏是由于中支座底部钢梁发生屈曲而达到临界状态。当混凝土板厚度与截面总高度比为0.36时,在整个升温过程中,负弯矩区底部钢梁未发生明显的屈曲现象(图13b));并且中支座截面弹性核最小高度占比为8.93%(图12b)),表明组合梁负弯矩区形成塑性铰,组合梁发生强度破坏。当混凝土板厚度与截面总高度比进一步增大为0.40时,组合梁在升温过程中,负弯矩区底部钢梁发生屈曲现象,未形成塑性铰。这是因为,在其它条件不变的情况下,混凝土板的厚度增加导致组合梁截面拉力和压力的合力臂减小、钢梁的压应力增加导致钢梁易于受压屈曲。因此,混凝土板厚度与截面总高度之比的合理取值为0.36。

在上述研究中,通过对组合梁三个主要截面参数(底部钢梁翼缘宽厚比 b/t 、钢梁腹板高厚比 h_w/t_w 及上部混凝土板厚度与截面总高度之比 h_c/h)对负弯矩区采用RPBL连接组合梁形成塑性铰的影响分析,得到钢梁翼缘宽厚比、钢梁腹板高厚比和混凝土板厚度与截面总高度之比的合理参数取值见表1。

表 1 组合梁形成塑性铰截面参数推荐值

Table 1 Recommended values for plastic hinge section parameters of composite beams

截面参数	钢梁翼缘宽厚比 b/t	钢梁腹板高厚比 h_w/t_w	混凝土板厚度与截面总高度比 h_c/h
推荐值	5.56	16.67	0.36

4 结论

通过对高温下负弯矩区布置RPBL连接件的钢-混

凝土连续组合梁进行负弯矩区塑性铰演化分析研究,可以得出以下结论:

(1) 在高温条件下,负弯矩区采用RPBL连接件的钢-混凝土组合梁截面中,混凝土板内的钢筋及下部钢梁的纵向应力随着温度的升高逐渐降低。当中支座截面钢梁的压应力未超过高温下腹板和翼缘的局部屈曲应力时,截面能够形成塑性铰;反之,则无法形成塑性铰。

(2) 影响组合梁负弯矩区截面形成塑性铰的参数包括钢梁翼缘宽厚比、腹板高厚比、混凝土板厚度与截面总高度之比。

(3) 对于本文研究的钢-混凝土组合梁,能够在临界状态下形成塑性铰的三个关键参数取值分别为:钢梁翼缘宽厚比为5.56,腹板高厚比为16.67,以及混凝土板厚度与截面总高度之比为0.36。

参考文献:

- [1] 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.06.015.
YU Zhiwu, DING Faxing. Fire performance research and application on steel-concrete composite structures[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 96-109. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.06.015. (in Chinese)
- [2] 陈宝春,牟廷敏,陈宜言,等. 我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增刊1): 1-10. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.s1.006.
CHEN Baochun, MOU Tingmin, CHEN Yiyan, et al. State-of-the-art of research and engineering application of steel-concrete composite bridges in China[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(Suppl. 1): 1-10. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.s1.006. (in Chinese)
- [3] 戴昌源,苏庆田. 钢-混凝土组合桥面板负弯矩区裂缝宽度计算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 806-813. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2017.06.003.
DAI Changyuan, SU Qingtian. Crack width calculation of

- steel-concrete composite bridge deck in negative moment region[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45 (6) : 806-813. DOI: 10.11908/j. issn. 0253-374x.2017.06.003.(in Chinese)
- [4] 郝庆多,欧进萍. GFRP/钢绞线复合钢筋混凝土梁的配筋率试验研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(11):80-87. DOI:10.6052/j. issn.1000-4750.2011.02.0094.
- HAO Qingduo, OU Jinping. Experimental study on the reinforcement ratio of concrete beams reinforced with GFRP/steel wire composite rebars[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(11):80-87. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2011.02.0094. (in Chinese)
- [5] ELSAYED M, BADAWEY S, TAYEH B A, et al. Shear behaviour of ultra-high performance concrete beams with openings[J]. *Structures*, 2022, 43: 546-558. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.06.071.
- [6] 周焕廷,陈建平,邹有云. 钢筋钢纤维混凝土梁与钢筋混凝土梁抗火性能试验及对比分析[J]. *建筑钢结构进展*, 2025, 27(2):9-20. DOI:10.13969/j.jzgjgz.20230913003.
- ZHOU Huanting, CHEN Jianping, ZOU Youyun. Fire resistance test and comparative analysis of reinforced steel fiber concrete beams and reinforced concrete beams [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2025, 27 (2) : 9-20. DOI:10.13969/j.jzgjgz.20230913003.(in Chinese)
- [7] 周安,戴航,刘其伟. 体内预应力钢纤维混凝土-钢组合梁负弯矩区抗裂及裂缝宽度试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(3):82-90. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2007.03.011.
- ZHOU An, DAI Hang, LIU Qiwei. Experimental study of crack-resistance and crack width in negative bending zone of interior prestressed SFRC-steel composite beams[J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(3):82-90. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2007.03.011.(in Chinese)
- [8] 聂建国,陶慕轩,聂鑫,等. 抗拔不抗剪连接新技术及其应用[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(4):7-14, 58. DOI:10.15951/j.tmgxcb.2015.04.004.
- NIE Jianguo, TAO Muxuan, NIE Xin, et al. New technique and application of uplift-restricted and slip-permitted connection[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(4):7-14, 58. DOI:10.15951/j.tmgxcb.2015.04.004.(in Chinese)
- [9] LIU Y Q, XIN H H, LIU Y Q. Experimental and analytical study on shear mechanism of rubber-ring perfbond connector[J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109382. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109382.
- [10] 贾远林,陈世鸣,王新娣. 预应力组合梁在负弯矩作用下的塑性铰长度研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2009, 30(3):5-8. DOI:10.3969/j.issn.1671-6833.2009.03.002.
- JIA Yuanlin, CHEN Shiming, WANG Xindi. Study of the plastic hinge length of steel and concrete composite beams with external tendons under negative bending[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2009, 30(3):5-8. DOI:10.3969/j.issn.1671-6833.2009.03.002. (in Chinese)
- [11] EHSANI R, SHARBATDAR M K, KHEYRODDIN A. 'Estimation of the moment redistribution and plastic hinge characteristics in two span beams cast with high-performance fiber reinforced Cementitious composite (HPFRCC) [J]. *Structures*, 2022, 35: 1175-1190. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.08.132.
- [12] BARROS R C, SILVEIRA R A M, LEMES Í J M, et al. Nonlinear behavior and bearing capacity of steel-concrete composite structures in fire conditions by a plastic hinge-based approach [J]. *Engineering Structures*, 2025, 327: 119665. DOI:10.1016/j.engstruct.2025.119665.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ 138—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Composite Structures: JGJ 138—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [14] European Committee for Standardization. Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.2: General Rules-Structural Fire Design: Eurocode 4 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [15] European Committee for Standardization. Design of Steel Structures, Part 1.2: Structural Fire Design: Eurocode 3 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 1993.
- [16] 左彦江,王柱,王俊璞. 碳纳米管增强氟橡胶高温力学行为及本构关系研究[J]. *计算力学学报*, 2024, 41(3):593-598. DOI:10.7511/jslx20221107002.
- ZUO Yanjiang, WANG Zhu, WANG Junpu. Study of mechanical behavior and constitutive relation of carbon nanotube reinforced fluororubber at high temperature [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2024, 41(3):593-598. DOI:10.7511/jslx20221107002. (in Chinese)
- [17] ZHOU H T, CHEN X Z, CHEN J P, et al. Influence of RPBL connectors in the negative moment zone on fire resistance of steel-concrete continuous composite beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 466: 140280. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2025.140280.