

高温下蜂窝组合梁的极限变形

贾连光,张誉严,戴 乐,王宇涵

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 提出高温情况下适用于蜂窝组合梁的极限变形判定方法,为蜂窝构件钢框架结构的抗火性能提供设计参考。**方法** 在钢-混凝土组合梁抗火试验基础上,利用有限元软件 ABAQUS 进行热-力耦合模拟,得出钢-混凝土组合梁的时间-位移曲线。以孔型、荷载比、混凝土楼板厚度为影响参数对蜂窝组合梁进行研究,分析参数对高温下蜂窝组合梁极限变形的影响。**结果** 蜂窝组合梁与实腹组合梁跨中位移发生突变前的挠度差异较大;孔型、荷载比和混凝土板厚度均对蜂窝组合梁跨中极限变形有一定影响;高温下蜂窝组合梁的跨中位移发展相较于实腹组合梁更为迅速,其极限变形也比实腹组合梁更大;荷载比对蜂窝组合梁的跨中极限变形影响较大,孔型及混凝土楼板厚度的影响较小。**结论** 笔者建议将跨中挠度达到梁长的 $1/20 \sim 1/15$ 作为蜂窝组合梁在高温情况下的极限变形,并以此值作为判断其达到抗火极限状态的界限。

关键词 高温;蜂窝组合梁;极限变形;组合截面

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Study on Limit Deformation of Composite Castellated Beams at High Temperature

JIA Lianguang, ZHANG Yuyan, DAI Yue, WANG Yuhan

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: This paper present a judgment method applicable to the ultimate deformation of composite castellated beam under high temperature, and to provide reference for the design of fire resistance of composite castellated beam components steel frame structure. On the basis of fire resistance test of steel-concrete composite beam, finite element software ABAQUS was used to simulate thermo-mechanical coupling, and the time-displacement curves of steel-concrete composite beam was obtained. Pass, loading rate and concrete floor thickness were taken as the influence parameter to study composite castellated beams and analyze the influence of parameters on the ultimate deformation of composite castellated beam under high temperature. There is a great difference in the deflection of composite castellated beam and solid-belly composite beam before

收稿日期:2020-09-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51578436)

作者简介:贾连光(1961—),男,教授,主要从事钢结构设计与计算理论方面研究。

mid-span displacement mutation. Pass, loading rate and concrete floor thickness have some effect on the ultimate deformation of the composite castellated beam at midspan. Under high temperature the mid-span displacement of composite castellated beam develops more rapidly than that of composite beam with solid substrates, and its ultimate deformation is also larger than that of the solid-abdominal composite beam. The loading rate has a great influence on the midspan ultimate deformation of composite castellated beam, and it has little influence on the pass and the concrete floor thickness. The author suggest that the mid-span deflection reaches $1/20 \sim 1/15$ of the beam length as the limit deformation of composite castellated beam under high temperature, and this value is used as the limit to judge that the beam reach the limit state of fire resistance.

Key words: high temperature; composite castellated beams; limit deformation value; combined section

蜂窝组合梁由蜂窝钢梁与混凝土楼板组成,蜂窝组合梁结构因其自重轻、强度高、整体性能好等优点,在工程中得到越来越广泛应用。然而蜂窝组合梁防火性能较差,一旦发生火灾就会造成重大损失。在火灾过程中,混凝土及钢材的力学性能随着温度的升高逐渐退化,钢-混凝土组合梁构件在火灾下的防火性能主要由其变形所决定^[1],因此对组合梁的极限变形研究具有重要意义。

国内外对于火灾下组合梁的受力性能进行了一系列研究。李国强等^[2]对组合梁进行了防火试验研究,结果表明,高温下组合梁失效是由于温度升高,钢梁部分发生软化屈服,组合梁的抗弯刚度大幅度下降,导致跨中产生较大挠度。并据此提出将跨中挠度达到梁长 $1/30$ 作为判断组合梁达到防火极限状态的界限。Wang Peijun 等^[3]利用有限元软件 ABQUAS 对约束钢梁在火灾中的大挠度行为进行了参数化研究。结果表明,与实腹钢梁相比,蜂窝钢梁在火灾中挠度发展更快,更早达到承载极限。B. Bihina 等^[4-6]先后结合孔型、荷载比以及材料参数对蜂窝组合梁失效模式进行分析,提出欧洲规范 EC3 中组合梁在高温下的失效标准对于大部分蜂窝组合梁来说过于保守。

综上所述,蜂窝组合梁因其腹板开孔对整体的抗弯刚度有所削弱,其在升温过程中的变形与普通实腹组合梁存在差异,因此用

跨中位移达到梁长 $1/30$ 作为判定其失效的标准并不适用于蜂窝组合梁。我国《建筑钢结构防火技术规范》(GB 51249—2017)中仅规定了实腹组合梁在高温下的极限变形值,并未对蜂窝组合梁的极限变形值给出相关规定^[7]。基于此,笔者在试验基础上,运用 ABAQUS 热力-耦合分析方法,对比蜂窝组合梁和实腹组合梁在高温下的跨中极限变形差异,以孔型、荷载比、混凝土楼板厚度为参数进行研究,提出适用于蜂窝组合梁的极限变形判定标准,为蜂窝构件钢框架结构的防火性能提供设计参考。

1 试 验

1.1 试件设计

试验对两根编号为 SFZHL 和 FWZHL 的组合梁进行火灾试验。试件设计见图 1,具体参数见表 1。试件钢梁采用 Q355B 钢材,栓钉材质为 45 号钢,栓钉设计参照《组合结构设计规范》(JGJ138—2016)^[8],共布置 $2 \times 18 = 36$ 个。楼板使用 C30 混凝土,内部钢筋材质为 HRB400。钢材在常温下的弹性模量为 2.05 GPa,屈服强度为 351.4 MPa。混凝土板内纵向通长筋采用 $\Phi 8@200$,共 4 根,横向钢筋采用 $\Phi 10@200$,共计 9 根。同时采用两端焊接钢板的方案以达到两端简支的边界条件,端板设计宽度 280 mm,高度 300 mm,厚度 40 mm,并在端板底部厚度方

向上打磨出直径 80 mm 的曲边底面以保证组合梁两侧转动自由^[9]。

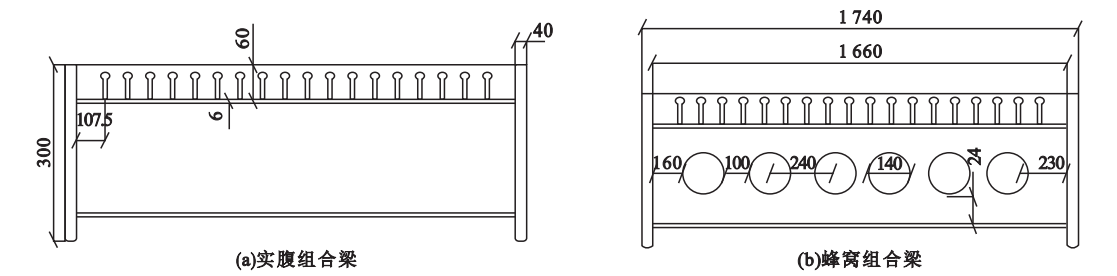


图 1 试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen size

表 1 试件参数

Table 1 Section parameters of specimen

试件编号	孔型	开孔率/%	梁高×宽× 翼缘厚×腹 板厚/mm	梁长/mm	混凝土板 长×宽× 厚/mm
FWZHL	圆形	60	188×200×6×4	1 660	1 660×700×60
SFZHL	—	—	188×200×6×4	1 660	1 660×700×60

1.2 试验装置及加载方式

为模拟真实火灾场景,自行制作火灾试验炉,长×宽×高为 2.7 m×1.4 m×2.25 m,炉壁厚 250 mm,试验装置如图 2 所示。炉体材料选用 C30 混凝土,并在炉壁内表面贴附一层耐火隔温能力较强的 50 mm 厚硅酸铝耐火棉。炉内有两根 1.7 m 的钢管混凝土柱用来支撑试件,且钢管混凝土柱与炉内底板采用螺栓连接。

土楼板上部铺设质量块施加,总计为 22.4 kN,布置形式见图 2。加载及升温过程中的温度及位移采用 K 型铠装热电偶和位移计进行多点测量。温度测点及位移测点布置如图 3、图 4 所示。



图 2 试验装置

Fig. 2 Experimental device

试验先在常温下施加均布荷载,保持荷载大小不变时再点火升温。静力荷载由混

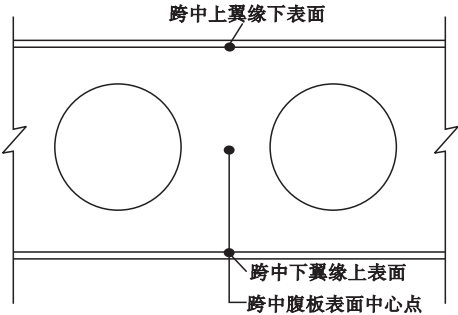


图 3 温度测点布置图

Fig. 3 Layout of temperature measuring points

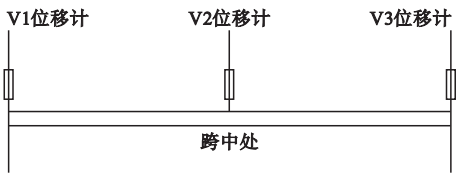


图 4 位移计布置图

Fig. 4 Displacement meter layout

1.3 试验现象及结果分析

开始升温后,温度达到 500 ℃ 以前,组合梁的跨中变形速率比较缓慢,两者位移均控制在 20 mm 以内,500 ~ 800 ℃ 时,组合梁的钢梁部分刚度开始逐渐下降,跨中位移开始加速增长,变形明显增大。而 800 ℃ 以后,钢梁部分受热软化,对于组合梁构件承载力的贡献值可忽略,混凝土楼板也受热膨胀出现裂缝,跨中位移开始高速发展直至上方堆载塌落,终止试验。降温冷却后观察试件破坏形态:FWZHL 的整体变形大于 SFZHL,两试件都发生了混凝土楼板倾覆现象;钢梁的上翼缘产生明显的向下弯曲变形,下翼缘产生侧向扭转;两试件腹板均发生严重的屈曲变形,SFZHL 的腹板变形较大,并在梁左端形成褶皱,FWZHL 发生孔间腹板屈曲现象,但未形成褶皱变形。

因试件受火工况为三面受火,受火面为下翼缘下表面及腹板正反面,组合梁各部分的温度分布由高到低为腹板、下翼缘、上翼缘、混凝土楼板。在升温初期,SFZHL 腹板温度分布均匀且升温更快,因此 SFZHL 的腹板刚度退化较快,导致其腹板屈曲程度大于蜂窝组合梁;FWZHL 因腹板开孔造成腹板温度分布不均匀,具体表现为孔周温度高于靠近下翼缘处高于靠近上翼缘处,因此其孔间腹板更容易产生屈曲现象。随着温度增加,FWZHL 各部分的升温速度逐渐超过 SFZHL,两试件温度分布逐渐一致,在温度应力相似的情况下,引起跨中挠度变形的因素主要有弯矩和剪力,腹板开孔会对截面抗弯性能和抗剪性能进行削弱,所以蜂窝组合梁抵抗变形的能力较弱,整体变形更大^[10-12]。

2 有限元分析

2.1 建立热分析模型

对试件 FWZHL 进行 ABAQUS 建模,模型参数与试验一致。混凝土楼板和钢梁部分采用实体单元 DC3D8,钢筋模型采用传热连

接单元 DC1C2。组合梁三面受火,受火面考虑热对流和热辐射作用^[13]。混凝土楼板和钢梁部分的热对流作用设置为表面热交换条件,热对流系数设定为 25。混凝土楼板与钢梁部分的热辐射作用设置为表面辐射,混凝土表面的热辐射系数为 0.5,钢材表面的热辐射系数为 0.95,绝对零度设置为 -273.16 ℃,波兹曼常数设置为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$,初始温度设定为 25 ℃,升温曲线选用 ISO-834 标准升温曲线。

2.2 建立热-力耦合模型

热-力耦合结构分析中,钢材和混凝土的力学性能参照文献[14]。升温条件下钢材泊松比恒为 0.3。混凝土楼板和钢梁采用实体单元 C3D8R 模拟,钢筋采用桁架单元 T3D2 模拟。边界条件采用两端简支方式。混凝土楼板和蜂窝钢梁接触部分选择小滑移,相互作用中切向作用采用“罚”,摩擦系数为 0.3,法向作用定义为“硬接触”。

2.3 有限元模型有效性验证

为验证有限元模型的准确性,将 FWZHL 的模拟曲线与试验曲线进行对比,结果见图 5。从图中可以看到,模拟曲线与试验曲线发展趋势一致且吻合较好,在升温初期,试件的跨中位移呈线性增长,随着温度的增加,在 2 000 s 左右发生突变,位移急剧变化,由此笔者认为 2 000 s 左右时组合梁达到耐火极限。试验和有限元模拟得到的耐火极限相差不超过 1%;两者的跨中位移最大不

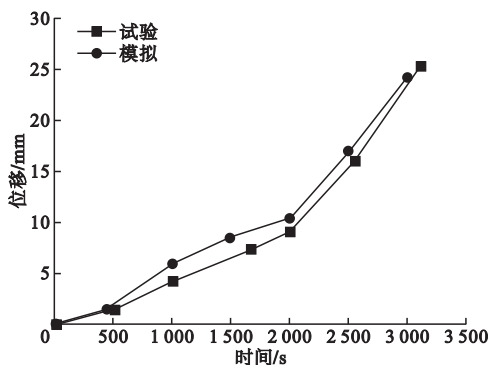


图5 时间-位移曲线

Fig. 5 Time-displacement curves

超过 2 mm。将模拟应力云图与试验结果对比分析可以发现(见图 6),试件在试验和模拟中均发生了混凝土楼板向一侧倾覆现象,且模拟中试件下翼缘处应力最大,这与试

验结果中的下翼缘发生扭转现象是一致的。通过时间 - 位移曲线可以看出模拟结果与实验结果吻合较好,进而验证了有限元的正确性。

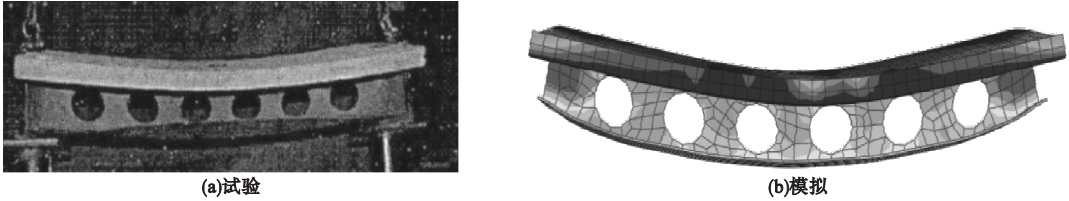


图 6 FWZHL 试件正面对比图
Fig. 6 FWZHL frontal contrast chart

3 极限变形影响参数分析

3.1 孔型影响

蜂窝组合梁的孔型一般有正六边形孔、圆孔、矩形孔。因此笔者选用这三种孔型及不开孔试件建立有限元模型进行对比,研究腹板开孔及孔型对组合梁极限变形的影响,结果见图 7 和图 8。

矩形孔和正六边形孔的构件首先发生了下翼缘侧移现象,圆形孔构件发生下翼缘侧移的时间稍晚,在 3 500 s 左右实腹构件也发生下翼缘侧移现象。此时构件的腹板连同下翼缘同时扭转,发生局部失稳。由此可知在 3 个开孔构件中,圆孔构件在高温下的局部稳定性能略优于矩形孔和正六边形孔构件,这是由于三种孔型的蜂窝组合梁温度场几乎一致,而圆孔蜂窝组合梁因其开孔没有棱角,避免了因开孔造成的应力集中现象^[15-16]。

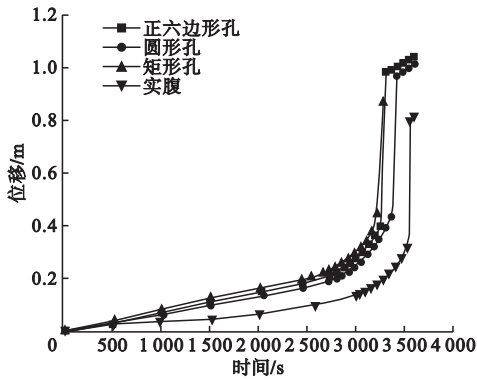


图 7 不同孔型组合梁跨中位移 - 时间曲线
Fig. 7 Time-displacement curves of composite beams with different pass types in middle span

从图 7 可以看出,三种不同孔型的构件及实腹构件分别在 2 500 s 及 3 000 s 左右时出现了局部屈服现象。矩形孔和正六边形孔构件屈服位置位于孔角,圆孔构件屈服位置位于孔间腹板,实腹构件屈服位置位于梁两端腹板处。3 个开孔试件虽发生局部屈服的位置不同,但其整体变形几乎无差别,而实腹构件的整体变形偏小很多。在 3 000 s 左右,

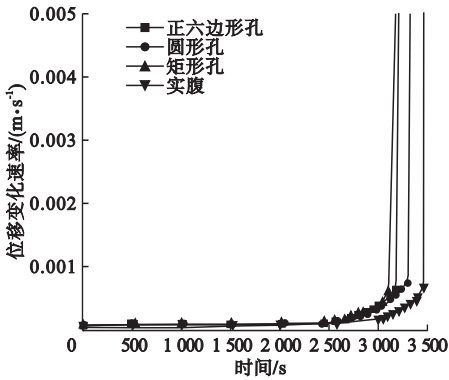


图 8 不同孔型组合梁跨中位移变化速率曲线
Fig. 8 Variation rate diagram of mid-span displacement of composite beams with different pass types

从图 8 中可以看出,蜂窝组合梁与实腹组合梁的跨中位移发展趋势较为一致,但相对于实腹组合梁,蜂窝组合梁的跨中位移发展更迅速,拐点的出现也更早。这是由于蜂窝组合梁因其腹板开孔对抗弯承载力和抗剪承载力都有一定程度的削弱,且在升温到 400 ℃ 以上时,蜂窝组合梁因其腹板开孔导

致其腹板温度分布不均匀且升温更快,导致刚度退化不一致,使其孔间腹板更易屈曲。因此蜂窝组合梁的跨中位移发展更迅速,达到承载极限时整体变形也更大。

结合图 8 中跨中位移变化速率曲线可知,三种孔型的蜂窝组合梁在 2 500 s 以前,跨中位移较为接近且增长平缓,这是由于孔型无论是对组合梁的抗弯刚度还是抗火性能影响都不大,因此升温初期三种孔型的蜂窝组合梁跨中位移差别不大。2 500 s 之后三种孔型的蜂窝组合梁跨中位移出现加速增长趋势,此时正六边形孔、圆孔、矩形孔组合梁跨中位移分别为 187.33 mm、181.7 mm、196.4 mm,约为梁长的 1/20 ~ 1/15,且相差均在 5% 以内。实腹组合梁在 3 000 s 左右时,跨中位移开始出现加速增长趋势,此时跨中位移为 138.14 mm,约为梁长的 1/30 ~ 1/20。因此开孔对组合梁的极限变形影响较大,但开孔形状对极限变形影响不大。

3.2 荷载比影响

荷载比的定义为常温下施加的力与蜂窝组合梁极限承载力的比值,是研究蜂窝组合梁耐高温极限的重要参数。因圆孔蜂窝组合梁耐高温性能更加优秀,所以笔者采用圆孔蜂窝组合梁进行研究。分别选取荷载比为 0.3、0.4、0.5、0.6 的构件进行对比,结果见图 9、图 10。

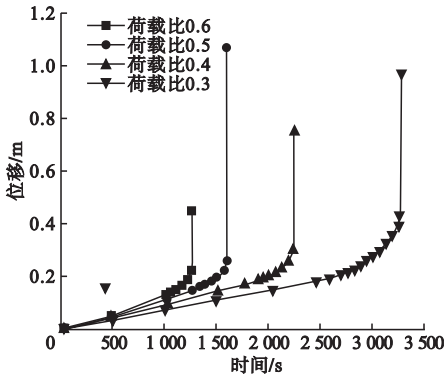


图 9 不同荷载比下时间 - 位移曲线

Fig. 9 Time-displacement curves for different load ratios

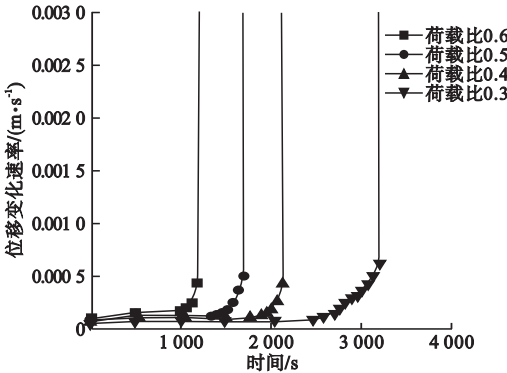


图 10 不同荷载比组合梁的位移变化速率曲线
Fig. 10 Displacement change demand rate diagram of composite beams with different load ratios

从有限元模拟结果来看,荷载比越大的构件极限变形越小。分析原因在于,荷载比为 0.3 和 0.4 时,组合梁达到耐火极限主要是由于钢梁受热软化丧失承载力,极限变形以组合梁整体的弯曲变形为主。当荷载比为 0.5 和 0.6 时,蜂窝组合梁整体及各部分的弯扭屈曲明显加剧,在达到极限承载力之前,先发生了腹板局部失稳。

从图 9 可以得出,荷载比越大,跨中位移增长越迅速,时间 - 位移曲线出现拐点也越早。分析原因在于,蜂窝组合梁在升温过程中的跨中挠度主要由力学荷载造成的挠度与温度荷载造成的挠度共同组成,当升温条件一致时,荷载比越大,其跨中挠度发展就越迅速,发生破坏的时间也就更早。

结合图 10 中跨中位移变化速率曲线可知,荷载比为 0.3 时,曲线在 2 500 s 左右出现拐点,此时跨中位移为 181.7 mm;荷载比为 0.4 时,曲线在 1 750 s 左右出现拐点。此时跨中位移为 169.9 mm;荷载比为 0.5 时,曲线在 1 350 s 左右出现拐点,此时跨中位移为 158.5 mm;荷载比为 0.6 时,曲线在 1 000 s 左右出现拐点,此时跨中位移为 140.4 mm。4 个构件的极限变形约为梁长的 1/20 ~ 1/15,且两两相差超过 5%。因此荷载比对蜂窝组合梁的极限变形影响较大。

3.3 混凝土楼板厚度的影响

混凝土楼板厚度也是影响蜂窝组合梁耐火性能的重要参数,在其他条件不变的情况下,笔者选取厚度分别为 80 mm、90 mm、100 mm 的混凝土楼板进行对比,结果见图 11、图 12。

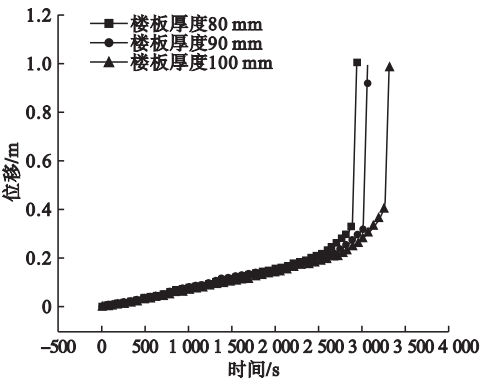


图 11 不同混凝土楼板厚度试件的时间 - 位移曲线

Fig. 11 Time-displacement curves of specimens with different concrete floor thickness

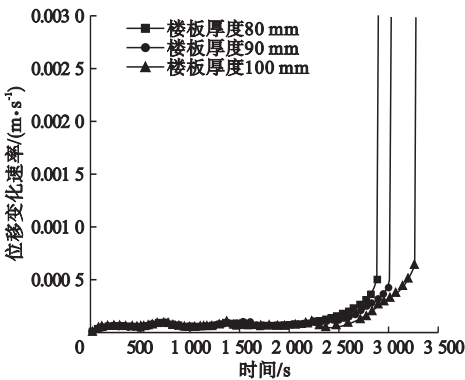


图 12 不同混凝土楼板厚度试件位移变化速率曲线

Fig. 12 Displacement change rate curves of specimens with different concrete floor thickness

据有限元模拟结果来看,混凝土楼板厚度不同时,构件的整体变形没有太大区别。但随着楼板厚度的减小,蜂窝梁腹板孔口周围变形逐渐增大,上下翼缘屈曲也越明显。

从图 11 可以看出,三条曲线发展趋势一致且相差不大,皆是在升温初期呈线性增长,经过一段时间后,楼板厚度较薄的构件率先

出现拐点,随后在短时间内失效。分析原因在于,温度场作用初期,不同构件的钢梁部分刚度折减一致,而混凝土楼板由于导热性差,升温较慢,较厚的楼板内温度低于较薄的楼板,其刚度折减也较小,抵抗变形的能力更强。随着时间推移,楼板温度分布趋于一致,钢梁受热软化基本丧失承载能力,此时主要是靠混凝土楼板继续承载。其他条件相同时,混凝土楼板越厚,抗弯刚度越大。

结合图 12 中跨中位移变化速率曲线可知,混凝土楼板厚度为 80 mm 时,曲线在 2 250 s 左右出现拐点,此时跨中位移为 180.1 mm;混凝土楼板厚度为 90 mm 时,曲线在 2 500 s 左右出现拐点,此时跨中位移为 187.7 mm;混凝土楼板厚度为 100 mm 时,曲线在 2 500 s 左右出现拐点,此时跨中位移为 191.9 mm;三者均在组合梁长度的 1/20 ~ 1/15 且相差不超过 5%。因此混凝土楼板厚度对蜂窝组合梁的极限变形影响较小。

4 结 论

(1) 荷载比对蜂窝组合梁的极限变形影响较大,荷载比越大,构件的极限变形越小,且当荷载比大于 0.4 时,随着温度增高,蜂窝组合梁在未达到承载极限时已发生腹板局部失稳。

(2) 孔型对组合梁的耐高温性能和极限变形影响不大,圆形孔构件的腹板稳定性优于正六边形孔和矩形孔构件。混凝土楼板虽然对耐火极限影响较大,但对组合梁的极限变形影响不大。

(3) 根据经验一般把钢 - 混凝土组合梁的跨中位移达到梁长的 1/30 ~ 1/20 作为判定其失效的界限,但开孔会对腹板产生削弱作用,蜂窝组合梁与实腹组合梁极限变形存在差异,故不宜用实腹组合梁的失效判定标准作为判定蜂窝组合梁失效的标准。笔者建议将跨中位移达到梁长的 1/20 ~ 1/15 作为

高温下蜂窝组合梁的极限变形值。

参考文献

- [1] 姚伟发. 钢-混凝土组合梁桥火灾下的反应及灾后剩余承载力研究[D]. 广州: 东南大学, 2016.
(YAO Weifa. Study on response and residual bearing capacity of steel-concrete composite beam bridge under fire [D]. Guangzhou: Southeast University, 2016.)
- [2] 李国强, 周宏宇. 钢-混凝土组合梁抗火性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(10): 19-26.
(LI Guoqiang, ZHOU Hongyu. Experimental study on fire resistance of steel-concrete composite beams [J]. China civil engineering journal, 2007, 40(10): 19-26.)
- [3] WANG Peijun, MA Ning, WANG Xudong. Numerical studies on large deflection behaviors of restrained castellated steel beams in a fire [J]. Journal of constructional steel research, 2014(100): 136-145.
- [4] BIHINAG B, ZHAO A. Behaviour of composite steel-concrete cellular beams in fire [J]. Engineering structures, 2013(56): 2217-2228.
- [5] VASSART O, BAILEY C, BIHINA G, et al. Parametrical study on the behavior of steel and composite cellular beams under fire conditions [C]. Structures in fire. Michigan: Michigan State University, 2010.
- [6] EHAB E, BEN Young. Nonlinear analysis of composite castellated beams with profiled steel sheeting exposed to different fire conditions [J]. Journal of constructional steel research, 2015(113): 247-260.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑钢结构防火技术规范: GB 51249—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Technical specification for fire prevention of steel structures: GB 51249—2017 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2018.)
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ138—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Code for design of composite structures: JGJ138—2016 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2016.)
- [9] 魏鹏宇. 蜂窝组合梁抗火性能试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
(WEI Pengyu. Experimental study on fire resistance of honeycomb composite beams [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.)
- [10] 贾连光, 徐晓霞, 康小柱. 蜂窝梁抗弯承载力
的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(3): 196-199.
(JIA Lianguang, XU Xiaoxia, KANG Xiaozhu. Finite element analysis of flexural bearing capacity of castellated beam [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(3): 196-199.)
- [11] 贾连光, 李庆文, 刘永方. 蜂窝梁抗剪性能分析与计算[J]. 工程力学, 2012, 29(2): 23-30.
(JIA Lianguang, LI Qingwen, LIU Yongfang. Analysis and calculation of shear behavior of castellated beams [J]. Engineering mechanics, 2012, 29(2): 23-30.)
- [12] 张春玉, 朱柏洁, 乔牧, 等. 六边形孔蜂窝梁抗弯承载力的数值模拟与分析[J]. 黑龙江科技学院学报, 2013(6): 577-580.
(ZHANG Chunyu, ZHU Baijie, QIAO Mu, et al. Numerical simulation and analysis of flexural bearing capacity of hexagonal castellated beams [J]. Journal of Heilongjiang university of science and technology, 2013(6): 577-580.)
- [13] 蒋翔, 童根树, 张磊. 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(12): 68-74.
(JIANG Xiang, TONG Genshu, ZHANG Lei. Fire resistance of simply supported composite beams of refractory steel and concrete [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2017(12): 68-74.)
- [14] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures. Part 1-2: general rules-structural fire design; EN 1993-1-2 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [15] 石永奎, 张景煜, 魏京豹, 等. 基于 ANSYS 的钢-混凝土蜂窝组合梁承载能力分析[J]. 煤矿安全, 2016(3): 136-139.
(SHI Yongkui, ZHANG Jingyu, WEI Jingbao, et al. Bearing capacity analysis of steel-concrete composite castellated beams based on ANSYS [J]. Coal mine safety, 2016(3): 136-139.)
- [16] 陈星. 约束圆孔蜂窝梁的抗火性能分析及简化计算方法[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
(CHEN Xing. Fire resistance analysis and simplified calculation method of constrained circular castellated beam [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.)
- [17] 任利. 蜂窝组合梁及蜂窝钢框架抗火性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
(REN Li. Research on fire resistance of composite castellated beams and castellated steel frames [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)