

约束梁柱构件抗火性能研究进展

钱 钦¹, 马 超¹, 李俊华^{1,2*}, 陈建华¹

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211;

2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 约束构件抗火性能和抗火设计是近年国内外相关学者关注的热点之一。笔者简要介绍了约束构件(包括约束梁、约束柱)抗火性能所取得的成果, 总结了约束构件在火灾下的工作行为、抗火性能研究以及抗火设计方法的进展, 指出了约束构件抗火研究目前存在的主要问题, 并对下一步工作进行了展望。

关键词: 约束构件; 抗火性能; 抗火设计

中图分类号: TU757

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2013) 04-0065-06

火灾在各类灾害发生频率中高居榜首, 其中建筑火灾约占其 80%, 我国每年因火灾造成建筑结构损毁或倒塌的事故多达数十例, 如 2003 年湖南衡阳商住楼火灾, 造成 20 名消防官兵牺牲; 2010 年, 上海静安区一住宅楼火灾, 造成 49 人遇难。火灾对我国的经济建设和人民生命财产安全构成了严重威胁, 因此研究建筑结构的抗火性能, 进而提出合理的抗火设计方法非常重要。

以往对构件抗火性能的研究通常不考虑约束, 而实际构件在火灾中受到约束作用, 这就导致以往研究结果与实际情况有出入。由于实际结构是连续性的, 框架结构中的各构件存在相互作用, 这种相互作用在火灾情况下更为复杂。火灾引起构件的温度升高, 使得构件因温度变化产生热膨胀, 当热膨胀受到约束时, 构件内将产生温度应力, 这对构件的抗火性能产生影响。对此, 国内外研究者对在火灾下的约束构件产生了浓厚的研究兴趣, 特别是近年来随着新型材料的应用, 约束构件抗火性能研究取得了前所未有的进展。

1 约束梁抗火研究的主要进展

1.1 约束钢筋混凝土梁的抗火研究

Kodur 和 Dwaikat^[1-3]对 2 根轴向约束混凝土梁

和 4 根简支混凝土梁进行了明火试验, 并通过建立有限元模型与试验数据进行比较, 发现约束混凝土梁的抗火性能好于无约束情况, 并与轴向约束刚度相关。

近几年, 华南理工大学开展了火灾下的约束钢筋混凝土梁的抗火性能研究。Wu 等^[4]通过试验, 主要考察了轴向约束、转动约束等因素对约束钢筋混凝土梁火灾下力学性能及工作行为的影响, 结果发现: 梁端轴向约束刚度对由约束产生的附加荷载大小和梁的变形大小影响较大; 梁端转动约束刚度对产生附加荷载的影响较小, 但对梁变形有影响。在此基础上, 乔长江^[5]对同时具有轴向和转动约束的混凝土梁进行了高温内力分析, 建立了考虑升降温全过程的混凝土约束梁的轴力和梁端弯矩的实用计算方法。

新型混凝土与普通混凝土相比具有许多无可比拟的优点, 在实际工程中应用日益广泛, 但目前对新型混凝土抗火研究主要针对独立构件开展, 约束构件抗火研究报道甚少, 仅文献[6]进行了约束轻钢筋混凝土构件火灾下的试验研究, 对其悬链线效应进行了分析, 利用所设计的模型, 分析了该构件火灾下的破坏行为, 为其抗火设计起到了关键性指导。

收稿日期: 2013-01-16.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家重点实验室开放基金(2011KB24); 宁波大学重点学科项目(XKLI1D2079)。

第一作者: 钱 钦(1987-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 钢-混凝土组合结构. E-mail: 809326951@qq.com

*通信作者: 李俊华(1977-), 男, 湖南安仁人, 博导/教授, 主要研究方向: 钢-混凝土组合结构. E-mail: lijunhua@nbu.edu.cn

1.2 约束钢梁的防火研究

以往对钢梁防火性能研究仅仅局限于独立构件形式出现,为了考察轴向约束和转动约束对钢梁力学性能的影响,文献[7]利用有限元方法较早对火灾下的约束钢梁进行了研究分析。Li等^[8]和郭士强^[9]通过试验发现:约束钢梁的防火性能好于一般简支梁;轴向刚度对约束钢梁的防火性能具有重要影响;在升温全过程中,约束钢梁的附加轴向力由最初的压力转变为最终的拉力,并受到轴向约束刚度的影响。

Yin等^[10-11]对约束钢梁展开了一系列的试验研究和理论分析,将有限元软件 ABAQUS 计算所得结果与 BS5950 和 EC3 等规范提供的钢梁临界温度的计算结果进行了比较,结果发现:这两规范计算所得结果要低于有限元计算结果,但该结论并不适合于非均匀温度场分布情况;Yin等^[11]在试验的基础上,通过有限元软件 ABAQUS 做了进一步分析,发现钢梁的刚度对约束钢梁的防火性能具有显著影响,但是要指导约束钢梁的防火设计还需做更深入的研究。

Dwaikat^[12]在试验研究基础上,对影响约束钢梁防火性能的各类参数进行了分析研究,得到了生成塑性 P-M 关系曲线的简化方法以及计算火灾下约束钢梁附加轴力大小和变形大小的简化方法。随后,Dwaikat等^[13]给出了用于计算约束钢梁在高温下温度应力和应变的方法。

约束钢梁在火灾下产生的悬链线效应对钢梁的防火性能具有重要影响,能够提高梁的防火性能^[14],而悬链线效应究竟能在多大程度上提高梁的耐火极限目前尚无法定量估计,为此继续开展相关定量研究是必要的。对悬链线效应的研究,国内外学者开展了相关工作。文献[15]在试验基础上发现梁端轴向约束刚度大,则其悬链线效应将更为明显。Yin等^[16-17]分别对均匀温度场和非均匀温度场下约束钢梁的悬链线效应进行了研究,分别得到了计算悬链线效应的简化方法,并通过有限元软件得到了验证。

以往对约束构件的防火研究,梁仅考虑了杆端约束,并未考虑到相邻梁、板在火灾下的工作行为之间存在一定的空间协调作用,至今仅文献[18]在约束梁的防火研究中考虑到了楼板的协同作用。

文献[18]在3层钢框架结构边跨梁足尺火灾试验的基础上,发现框架结构中混凝土楼板形成整体的边跨梁具有较强的防火性能。为此,有必要对约束构件间空间协调作用对防火性能影响展开更深入的试验和理论研究。

1.3 约束组合梁的防火研究

以往火灾下钢-混凝土组合梁承载力计算一般没有考虑到边界条件等因素对组合梁防火承载力的影响,为考察不同边界条件下组合梁的防火性能,周宏宇等^[19]利用有限元方法对组合梁进行了防火分析,研究发现:4种典型边界条件的组合梁可简化为简支和固支两种边界条件组合梁进行防火计算。

对于约束组合梁的防火研究,国内学者相对较早开展了相关研究工作,其中李国强等^[20-25]近几年在约束组合梁防火研究方面进行了一系列的试验和分析,取得了许多重要成果,给出了评估轴向约束组合梁防火性能的方法,并发现温度梯度对组合梁的防火性能具有重要影响。随后推导出组合梁的轴力-弯矩相关曲线,给出了约束平板式组合梁结构防火极限分析方法,发现当考虑组合梁的悬链线效应时,对组合梁进行很少的防火保护即可使其具有较高的防火能力。2007年,王银志等^[22]研究了处于结构整体中的组合梁防火性能及其在火灾中破坏过程和特点,基于试验进一步证明了悬链线效应有助于提高组合梁的防火性能,并且发现约束组合梁在火灾中的破坏过程可划分为升温膨胀阶段、跳跃阶段和悬链线阶段。2008年,王银志等^[23]给出了考虑整体性的组合梁火灾全过程的计算方法,可计算组合梁挠度、轴力、跨中及梁端弯矩的变化全过程,进而对组合梁的防火性能进行火灾全过程分析。在以上分析的基础上,王银志等^[24]进行了荷载比、约束刚度、钢筋与混凝土相对面积比等因素对约束组合梁防火性能的影响,并给出了约束组合梁防火实用方法,研究结果表明:(1)荷载比是决定约束组合梁防火性能的重要指标。(2)约束刚度对升温膨胀阶段轴压力、梁端抵抗弯矩、跨中极限抵抗弯矩有很大影响。(3)钢梁与混凝土相对面积比对升温后期跨中抵抗弯矩挖掘潜力、梁端的可利用抵抗弯矩有一定影响。2009年,李国强等^[25]发现在整个火灾过程中,组合梁轴力、

挠度及其抵抗弯距相互影响和转化, 共同抵抗外荷载作用, 最后通过分析建立了组合梁下翼缘屈曲的屈服线模型和计算方法。

Heidarpour 等^[26]则通过对火灾下钢框架结构中的组合梁进行非线性分析, 并由此给出组合梁受火屈服之前刚度退化值的计算公式, 该公式考虑了混凝土板和钢构件的互相作用, 对指导建筑消防设计具有重要意义。

然而在先前大多数研究中, 因火产生的约束力总是假设在梁横截面重心处, 但在实际试验中, 轴向约束力的位置受到诸多因素影响, 包括梁端节点构造形式。文献^[27]考虑到了钢梁所受约束位置对其抗火性能的影响, 发现约束位置对约束钢梁的抗火性能具有重要影响。

2 约束柱抗火研究的主要进展

2.1 约束钢筋混凝土柱的抗火研究

先前对柱的抗火研究局限于铰接柱, 柱作为整体结构中的一部分, 由于受到相邻构件产生的约束作用, 其力学性能和工作行为与铰接柱有很大的差别, 在遭受火灾时, 约束作用更为复杂。

在升温情况下, 构件由于受到约束作用会相应产生附加荷载, 这些附加荷载会加速构件的失效, 进而降低构件的抗火性能。Ali 等^[28]通过研究得到了用于计算火灾下轴向约束混凝土柱所产生的附加轴力。

为研究约束钢筋混凝土柱在火灾下的结构性能与铰接柱有何不同, Wu 和 Li 等^[29-31]在 2009 年和 2010 年间, 对约束钢筋混凝土柱开展了较为系统的试验研究和计算分析。Wu 等^[29]在试验基础上指出: 轴向约束、荷载水平对柱的抗火性能具有重要影响; 柱膨胀和收缩阶段, 柱的轴向变形主要分别受荷载比、轴向约束刚度比的影响; 附加轴力随着轴向约束刚度的增大而增大; 荷载比一定, 在柱冷却收缩阶段, 其轴力的发展趋势较为平稳。在此基础上, Li 等^[30]构建了在火灾和荷载共同作用下钢筋混凝土柱的有限元模型。随后, Wu 等^[31]研究得出: 荷载比一定时, 柱最大内力随着轴向约束刚度的增大而增大; 轴向约束刚度一定时, 柱最大附加荷载随着荷载比的增大而减小。

国外学者 Alberto 等^[32]则通过约束钢筋混凝土

柱的明火试验, 分析了包括约束刚度在内的众多参数对柱抗火性能影响的规律, 研究结果给出了提高约束混凝土柱抗火性能措施, 如增大纵筋配筋率、减小柱的长细比、减小约束刚度或者减小柱所受荷载大小等, 并且发现通常方法所计算的偏心受荷下柱承载力往往偏于保守, 对此需做进一步研究。

乔长江^[5]对同时具有轴向和转动约束的混凝土柱进行了高温内力分析, 建立了考虑升降温全过程的混凝土约束柱轴力和半高处弯矩实用计算方法。李毅海^[33]则进一步探讨了非定常约束和定常约束对火灾下混凝土柱力学性能的不同影响, 发现升温过程中定常轴向约束下的柱轴力变化系数均比非定常约束情况要大, 而对于定常和非定常两种转动约束情况, 升温过程中柱半高处弯矩变化系数基本没有差别。随后, 吴波等^[34-35]开展了约束混凝土柱的升降温全过程轴力分析和弯矩分析, 给出了该类构件轴力变化系数的实用计算方法和半高处弯矩变化系数的实用计算方法。

2.2 约束钢柱的抗火研究

考虑钢柱作为整体结构的一部分, 与相邻构件产生互相作用, 在火灾下其力学性能更加复杂^[36]。(1)约束钢柱受热膨胀, 轴向约束引起轴向荷载变化。(2)不同的扭转约束引起屈曲长度变化。(3)临近构件对柱的不同约束刚度会引起柱弯矩的变化。(4)相邻梁的热膨胀, 引起柱的弯矩变化。

文献^[37-38]表明轴向约束钢柱的抗火性能要差于简支柱, 而且增大约束刚度将降低钢柱的抗火性能, 但是试验中并未考虑到转动约束的影响。António 等^[39]对约束钢柱的抗火研究做了进一步完善, 考虑了轴向约束和转动约束对钢柱抗火的影响, 研究结果表明, 加载水平低的情况下, 约束刚度对柱子抗火性能具有重要影响, 且增大约束刚度将降低柱子的抗火性能。

约束钢柱在火灾下具有两种临界状态, 为屈曲临界状态和破坏临界状态, 对应的温度分别为屈曲温度和破坏温度。李国强等经过一系列的试验研究和理论分析, 取得了有关高温下约束钢柱屈曲温度和破坏温度的重要成果。2009 年, 王培军等^[40]首先给出了其屈曲温度和破坏温度的计算方法。然后, 李国强等^[41]进行了一组约束钢柱抗火试

验, 试验变化参数为钢柱所受约束刚度, 得到了约束刚度大小对钢柱抗火性能的影响: (1) 约束刚度比大的钢柱, 其屈曲温度和破坏温度均较低。 (2) 约束钢柱的破坏温度一般高于其屈曲温度, 且随轴向约束刚度比的增大, 破坏温度与屈曲温度之差增大。 随后, 文献[42]对轴力和弯矩共同作用下的约束钢柱受火性能进行了分析, 得到了影响屈曲温度和破坏温度的部分因素: (1) 轴向约束减小钢柱的破坏温度。 (2) 随着轴向荷载比和弯矩荷载比的增加, 约束钢柱的破坏温度减小。 (3) 端部弯矩比对约束钢柱的破坏温度影响较小。 在此研究基础上, 文献[43-44]分别得到了轴压约束钢柱、压弯约束钢柱在火灾升温条件下屈曲温度和破坏温度的简化计算方法。

2.3 约束组合柱的抗火研究

组合柱具有承载力大、抗震性能好等优点, 在高层建筑中应用日益广泛。 以往学者对于组合柱的研究多集中在常温下力学性能方面, 对火灾下的力学性能研究相对较少, 目前只有少量有关约束组合柱抗火性能的理论分析以及试验研究报告, 有必要对此做更深入的理论和试验研究。

Wang 等^[45]在 18 根轴向约束钢管混凝土柱明火试验的基础上, 指出柱失效温度主要受柱端轴向荷载的影响, 与最初所施加的转动约束刚度和梁柱节点形式无关。

Ben 等^[46]通过非线性有限元软件对轴向约束型钢混凝土柱的受火反应进行了分析, 考虑到轴向约束刚度、荷载比、长细比等参数的影响, 研究发现型钢混凝土柱在轴向约束和在无约束情况下其受火反应不同, 且欧洲规范 4 对轴向约束型钢混凝土柱的抗火设计偏于保守。

3 存在的问题与展望

国内外研究者在约束构件抗火性能方面已取得不少成果, 为结构抗火设计做出了巨大贡献, 但笔者以为该领域仍有如下方面需要深入研究:

(1) 悬链线效应对约束构件抗火性能影响程度。 国内外学者对悬链线效应影响约束构件抗火性能开展了相关研究工作, 并取得了一定进展, 研究发现悬链线一定程度上提高了约束梁的抗火性能, 而悬链线效应对约束梁耐火极限的定量影响

规律有待进一步探讨。

(2) 约束构件在非均匀温度场下抗火研究。 实际火灾复杂多变, 由于各种原因火灾下的构件不一定均匀受火, 可能受到非均匀受火。 由于受火方式不同, 构件的抗火性能必然存在差异。 然而到目前为止, 国内外还缺乏不同受火情况下约束构件的试验和理论研究。 为此, 有必要积极开展非均匀火灾下约束构件抗火性能的系统研究。

(3) 约束构件随机抗火研究。 约束构件从确定性阶段向随机概率阶段发展是一个必然趋势。 由于约束构件受到相邻构件的约束作用, 其力学性能在火灾下复杂多变, 利用随机概率方法更能准确研究约束构件的火灾行为。

(4) 非定常约束构件抗火研究。 考虑到实际构件在火灾蔓延和相邻构件受火劣化等因素的影响下, 约束构件容易出现变约束情况。 目前对约束构件抗火研究基本上停留在定常约束阶段, 很少考虑非定常约束情况。 为此, 有必要对非定常约束构件抗火性能进行研究。

(5) 约束情况考虑全面。 在实际火灾中, 约束梁、柱两端可能发生垂直其轴线方向的相对侧移, 现今的研究并未考虑这一情况, 为此有必要填补这一空白。

(6) 约束组合构件抗火研究。 组合构件作为一种新兴结构, 得到了越来越广的应用, 对此有必要对其展开大量的研究工作。 目前约束组合构件的抗火研究还是相对不足, 尤其是约束组合柱的相关研究。

(7) 新型混凝土约束构件抗火研究。 新型混凝土品种多, 与普通混凝土相比具有诸多无可比拟的优点, 在实际工程中应用日益广泛。 然而对新型混凝土构件抗火研究大多仅针对独立构件开展, 有必要对新型混凝土约束构件进行充分的试验和理论分析。

(8) 约束构件间空间协调抗火研究。 实际火灾下构件之间存在空间协调作用。 目前在约束构件的抗火研究中, 梁、柱一般考虑杆端约束情况, 并未其他约束效应。 例如, 目前约束梁的抗火研究较少考虑到楼板的空间协调作用。 为此, 有必要在约束构件的抗火研究工作中考虑到构件间的空间协同作用。

约束构件抗火研究是目前结构工程领域研究的热点课题之一, 随着计算手段、试验能力的不断提高以及相关工程技术的不断进步, 约束构件抗火研究必然会得到不断的深入和快速的发展。

参考文献:

- [1] Kodur V, Dwaikat M. A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2008, 30(5):431-443.
- [2] Dwaikat M, Kodur V. A numerical approach for modeling the fire induced restraint effects in reinforced concrete beams[J]. *Fire Safety Journal*, 2008, 43(4):291-307.
- [3] Dwaikat M, Kodur V. Response of restrained concrete beams under design fire exposure[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(11):1408-1417.
- [4] Wu B, Lu J Z. A numerical study of the behaviour of restrained RC beams at elevated temperatures[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(4):522-531.
- [5] 乔长江. 具有端部约束的混凝土构件升温全过程耐火性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- [6] Izzuddin A B, Elghazouli A Y. Failure of lightly reinforced concrete members under fire I: Analytical modeling[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130 (1):3-17.
- [7] Tan Kanghai, Huang Zhanfei. Structural responses of axially restrained steel beams with semirigid moment connection in fire[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(4):541-551.
- [8] Li Guoqiang, Guo Shixiong. Experiment on restrained steel beams subjected to heating and cooling[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(3):268-274.
- [9] 郭士雄. 约束钢梁在升温段和降温段的反应及梁柱节点的破坏研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [10] Yin Y Z, Wang Y C. Numerical simulations of the effects of nonuniform temperature distributions on lateral torsional buckling resistance of steel I-beams[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59(8):1009-1033.
- [11] Yin Y Z, Wang Y C. A numerical study of large deflection behaviour of restrained steel beams at elevated temperatures[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60(7):1029-1047.
- [12] Dwaikat M. Response of restrained steel beams subjected to fire induced thermal gradients[D]. East Lansing: Michigan State University, 2010.
- [13] Dwaikat M, Kodur V. Engineering approach for predicting fire response of restrained steel beams[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2011, 137(7):447-461.
- [14] Ding J, Wang Y C. Experimental study of structural fire behaviour of steel beam to concrete filled tubular column assemblies with different types of joints[J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(12):3485-3502.
- [15] Liu T C H, Fahad M K, Davies J M. Experimental investigation of behaviour of axially restrained steel beams in fire[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2002, 58(9):1211-1230.
- [16] Yin Y Z, Wang Y C. Analysis of catenary action in steel beams using a simplified hand calculation method, Part 1: Theory and validation for uniform temperature distribution [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 61 (2):183-211.
- [17] Yin Y Z, Wang Y C. Analysis of catenary action in steel beams using a simplified hand calculation method, Part 2: Validation for non-uniform temperature distribution[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2005, 61(2): 213-234.
- [18] 吕俊利, 董毓利, 杨志年, 等. 钢框架边跨梁抗火性能试验研究和理论分析[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(9): 92-98.
- [19] 周宏宇, 李国强, 王银志. 影响组合梁抗火性能的两个因素分析[J]. *建筑钢结构进展*, 2006, 8(5):40-45.
- [20] Wang Z Y, Li G Q, Cui D G. Research on ultimate fire resistance capacity of composite beams with considering axial restrains[C]//8th International Conference on Steel-Concrete Composite and Hybrid Structures. Harbin, 2006:860-868.
- [21] 李国强, 王银志, 王孔藩. 考虑结构整体的组合梁极限抗火性能分析[J]. *力学季刊*, 2006, 27(4):726-732.
- [22] 王银志, 李国强, 郝坤超. 约束组合梁抗火性能试验研究[J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(6):93-98.
- [23] 王银志, 李国强. 考虑结构整体性的组合梁抗火性能研究[J]. *自然灾害学报*, 2008, 17(3):96-105.
- [24] 王银志, 李国强. 考虑结构整体性的约束组合梁抗火性能参数分析及实用计算方法[J]. *建筑钢结构进展*, 2008, 10(2):36-43.
- [25] 李国强, 王银志, 崔大光. 约束组合梁抗火试验及理论研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(5):177-183.
- [26] Heidarpour A, Bradford M A. Nonlinear analysis of composite beams with partial interaction in steel frame structures at elevated temperature[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(8):968-977.
- [27] Dwaikat M, Kodur V. Effect of restraint force location on the response of steel beams exposed to fire[C]// Proceedings of the 2009 Structures Congress. Austin, 2009:632-640.

- [28] Ali F, Nadjai A, Silcock G, et al. Calculation of forces generated in restrained concrete columns subjected to fire [J]. *J Applied Fire Science*, 2004, 12(2):125-135.
- [29] Wu B, Li Y H. Experimental study on fire performance of axially-restrained NSC and HSC columns[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2009, 32(5):635-648.
- [30] Li Yihai, Bo Wu, Martin Schneider. Numerical modeling of restrained RC columns in fire[C]//*Proceedings of the International Symposium on Computational Structural Engineering*. Shanghai, 2009:951-957.
- [31] Wu Bo, Li Yihai, Chen Shuliang. Effect of heating and cooling on axially restrained RC columns with special-shaped cross section[J]. *Fire Technology*, 2010, 46:231-249.
- [32] Alberto M B, João P C R. Fire resistance of reinforced concrete columns with elastically restrained thermal elongation[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(10):3330-3337.
- [33] 李毅海. 约束钢筋混凝土柱的抗火性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- [34] 吴波, 乔长江. 约束混凝土柱的升降温全过程轴力分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(2):53-59.
- [35] 吴波, 乔长江. 约束混凝土柱升降温全过程的弯矩分析[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(4):97-105.
- [36] 王永昌. 钢结构在火灾中的工作性能以及对今后试验研究的建议[J]. *建筑钢结构进展*, 2003, 5(2):9-16.
- [37] 计琳, 赵均海, 翟越, 等. 轴向约束对钢结构柱抗火性能的影响[J]. *建筑科学与工程学报*, 2006, 23(4):64-65.
- [38] 汪敏, 石少卿, 刘仁辉. 轴向约束钢柱的抗火性能分析[J]. *工业建筑*, 2007, 37:648-658.
- [39] António J P, Moura C, João P C R. Fire resistance of partially encased steel columns with restrained thermal elongation[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(4):593-601.
- [40] 王培军, 李国强, 王永昌. 火灾下轴心受压H型截面约束钢柱整体稳定设计[J]. *土木建筑与环境工程*, 2009, 31(4):31-36.
- [41] 李国强, 王培军, 王永昌. 约束钢柱抗火性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(5):184-190.
- [42] 王培军, 李国强, 王永昌. 轴力和弯矩共同作用下的约束钢柱受火性能分析[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(2):151-157.
- [43] 李国强, 王培军, 王永昌. 火灾下约束钢柱受力性能实用分析方法(I)——轴力作用下的约束钢柱[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(4):16-22.
- [44] 李国强, 王培军, 王永昌. 火灾下约束钢柱受力性能实用分析方法(II)——轴力和弯矩共同作用下的约束钢柱[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(4):23-29.
- [45] Wang Y C, Davies J M. An experimental study of non-sway loaded and rotationally restrained steel column assemblies under fire conditions: Analysis of test results and design calculations[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59(3):291-313.
- [46] Ben Y, Ehab E. Performance of axially restrained concrete encased steel composite columns at elevated temperatures[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(1): 245-254.

Research Progress on Fire-resistance Performance of Restrained Beam-column Structure

QIAN Qin¹, MA Chao¹, LI Jun-hua^{1,2*}, CHEN Jian-hua¹

(1. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The fire-resistance design of restrained structure and its performance have been one of the hot topics in academia at home and abroad in recent years. This paper briefly reviews and summarizes the recent progress on the fire-resistance performance of restrained beam and restrained column, and a number of issues on the fire-resistance performance of restrained structure are addressed.

Key words: restrained structure; fire-resistance performance; fire-resistance design

(责任编辑 史小丽)