

# 火灾后混凝土连续构件的损伤与加固试验研究

余江滔<sup>1</sup>, 刘媛<sup>1</sup>, 陆洲导<sup>1</sup>, 项凯<sup>2</sup>

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 天津消防研究所, 天津 300000)

**摘要:** 为了研究受火后混凝土连续受弯构件的力学性能, 进行了 5 个混凝土两跨连续板和 7 个两跨连续梁的系列试验。试验内容包括依据 ISO 834 标准升温曲线进行的混凝土连续构件受火试验, 以及高温后受损构件和修复加固构件的静载试验。试验结果表明, 高温对混凝土连续受弯构件的力学性能有明显的影 响; 随着受火程度的加重, 混凝土构件力学性能呈下降趋势。分析试验结果可知, 初始刚度降幅最为明显, 正常使用承载力的降幅大于极限承载力的降幅; 连续板试件的损伤大于连续梁试件。通过置换受损混凝土并采用碳纤维布加固受火后连续构件可使其承载力恢复到甚至超过受火前的状态, 加固后初始刚度的提高并不明显。

**关键词:** 火灾; 混凝土; 连续受弯构件; 力学性能; 碳纤维加固

中图分类号: TU375

文献标识码: A

## Experimental Study on Damage and Rehabilitation of Reinforced Concrete Continuous Member After Fire

YU Jiangtao<sup>1</sup>, LIU Yuan<sup>1</sup>, LU Zhoudao<sup>1</sup>, XIANG Kai<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Fire Research Station of Tianjin, Tianjin 300000, China)

**Abstract:** To study the mechanical performance of reinforced concrete continuous bending members after fire, a series of tests were carried out on 5 reinforced concrete (RC) continuous slabs and 7 RC continuous beams, which included fire test on continuous members with the calefaction way of ISO 834 and static test at ambient temperature on the fire damaged members and strengthened after fired members. The results demonstrate that high temperature has an obvious effect on mechanical properties of continuous bending members and along with an aggravated fire level, the mechanical properties show a decreasing trend. Based on the experimental data, the initial bending rigidity has the greatest

reduction, the serviceability bearing capacity drops more than ultimate bearing capacity and the fire damage of continuous slabs is severe than that of continuous beams. Damaged concrete replacement and reinforcement with carbon fibre reinforced plastics (CFRP) sheet can offset the loss of bearing capacity and even make it better than unfired state but has little effect on increasing the initial rigidity.

**Key words:** fire; concrete; continuous bending member; mechanical performance; carbonfibre reinforced plastics reinforcement

火灾中, 混凝土房屋的 3 种基本构件——板、梁、柱——都会受到不同程度的影响。混凝土梁、板位于房间的上部, 处于火灾中温度最高的位置, 通常受损最为严重。火灾后混凝土构件的损伤评估是其修复和加固的基础<sup>[1-2]</sup>。对此, 国内外的研究者做了很多工作。王春华等<sup>[3]</sup>研究了高温后简支梁的强度损伤。El-Hawary M M 等<sup>[4-5]</sup>进行了混凝土简支梁在受火后抗弯和抗剪强度的试验研究。王孔藩<sup>[6]</sup>、徐志胜<sup>[7-9]</sup>等均进行过简支构件受火后的残余承载力研究。然而, 这些试验所采用的简支构件在工程中应用较少, 而且火灾中简支构件的受损部位位于混凝土截面受拉区, 混凝土损伤对构件承载力的影响较小, 无法真实地反映实际结构的损伤。一些学者也进行了连续构件的受火试验<sup>[10-12]</sup>, 但对火后的承载力并未进行研究。基于此, 笔者进行了 5 块连续板和 7 根连续梁的受火和受火后力学性能试验(含加固后力学性能试验), 并对这批构件的力学性能进行分析, 为火后受弯构件的损伤评估及火后加固构件的力学性能评估提供计算依据。

## 1 试验设计

试验浇筑了 5 块混凝土两跨连续板和 7 根混凝土

收稿日期: 2011-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(51008235); 国家重点实验室基金(LDRCE 09-D-02); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(200802471089)

第一作者: 余江滔(1975—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构抗火及结构加固。E-mail: yujiangtao@tongji.edu.cn

土两跨连续梁.板跨度为 2.6 m×2 跨,宽度 1.2 m,板厚 0.12 m,如图 1 所示.梁跨度为 2.6 m×2 跨,截面 200 mm×300 mm.为了真实地模拟实际工程,梁设计为 T 型带翼缘截面,板翼缘宽度为 900 mm,厚度 80 mm,如图 2 所示.浇筑板试件所用混凝土标号为 C35,水泥、砂、石子、水的质量配合比为 1 : 2.24 : 3.09 : 0.54,棱柱体轴心抗压强度为 28.0 MPa,弹性模量  $E=2.94 \times 10^4$  MPa;板中受力钢筋为  $\phi 12$

的 HPB 235 钢筋,屈服强度为 286 MPa,极限强度为 408 MPa, $E=2.15 \times 10^5$  MPa.浇筑梁试件所用混凝土标号为 C30,水泥、砂、石子、水的质量配合比为 1 : 2.73 : 3.65 : 0.63,棱柱体轴心抗压强度为 34.6 MPa, $E=3.39 \times 10^4$  MPa;梁中受力钢筋为  $\Phi 14$  的 HRB 335 钢筋,屈服强度为 364 MPa,极限强度为 542 MPa, $E=2.0 \times 10^5$  MPa.

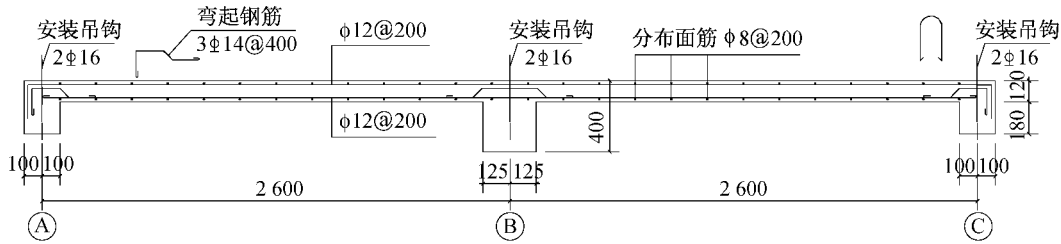


图 1 受火混凝土板的配筋及尺寸(单位:mm)

Fig.1 Layout and dimension of slabs exposed to fire(unit:mm)

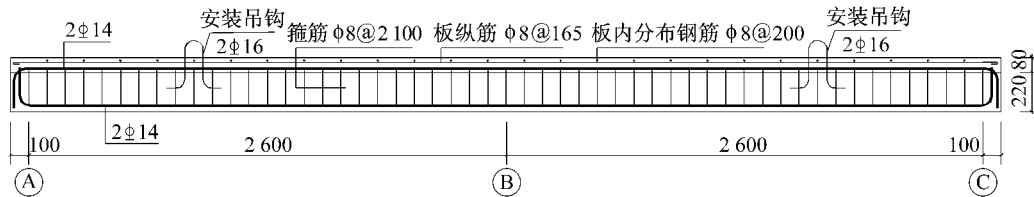


图 2 受火混凝土梁的配筋及尺寸(单位:mm)

Fig.2 Layout and dimension of beams exposed to fire(unit:mm)

从板和梁试件中随机选择一个作为对比试件,进行常温下静载试验.其余试件均先进行受火试验,冷却后部分试件直接进行静载试验,另一部分用 CFRP(carbon fibre reinforced plastics)布加固后再进行静载试验,试验工况如表 1 所示.

方案着重考虑受火时间对力学性能的影响,受火时间从 30 min 到 100 min.梁构件的截面尺寸较大.相同程度的火灾中,梁的损伤往往低于楼板,一般达不到凿除重浇的程度.因此,梁的试验方案着重于修复和加固的效果,受火的时间跨度相对较小.

表 1 试验设计

Tab.1 Test program

构件	试件编号	受火时间/min	火后加固	构件	试件编号	受火时间/min	火后加固
板	S0	0	否	梁	L0	0	否
	S1C	30	是		L1	60	否
	S2	50	否		L2C	60	是
	S3	70	否		L3C	60	是
	S4	100	否		L4	75	否
					L5C	75	是
				L6C	75	是	

楼板的厚度较小,是火灾中受火损伤最严重的构件.损伤检测中,检测人员往往关心其力学性能的变化,以决定是否需要凿除.因此,本文中板的试验

## 2 火灾试验

试件的火灾试验在同济大学结构抗火试验室进行.采用水平结构构件抗火试验炉,如图 3 所示(梁与板相似).板为单面受火,梁为三面受火.

试件两端支座分别为铰支座和滚动支座,在两端支座设置了液压千斤顶向下约束构件端部来抑制在受火过程中因瞬态热应变而造成的端部翘曲;连续试件中间部位采用龙门架拉接两根  $\Phi 25$  钢筋形成悬挂支撑.试验时等代受荷面积上施加  $1.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$  至试件上模拟常遇荷载(荷载常遇系数取 0.5).分别采用滑阻式位移计和热电偶(预埋)进行位移和温度的测量.

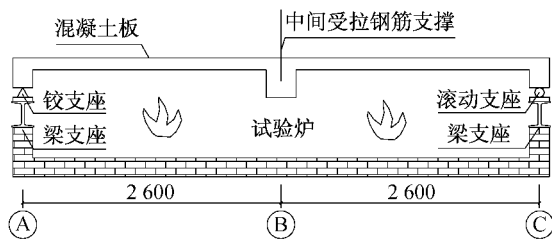


图 3 混凝土板受火示意图(单位:mm)

Fig.3 Test setup for slabs subjected to fire (unit:mm)

除试件 S1C 外,其余试件均按照 ISO 834 标准曲线进行受火升温.考虑可能发生的轰燃极限状态,自升温 5 min 到升温结束构件 S1C 的升温曲线特设为高于标准升温曲线 200 °C.

在升温过程中发生的不均匀膨胀变形在冷却至常温时可大部分恢复.在荷载和支座的约束下,连续板构件中间支座上部两侧出现了横向贯通裂缝,且随着受火时间的增加,裂缝加大;连续梁翼缘上沿着垂直于跨度的方向出现多条裂缝,裂缝间距 200 mm 左右.梁、板均出现了爆裂,爆裂多位于中支座两侧,深度均在 10 mm 左右,有少量露筋现象,如图 4 所示.



图 4 板底受火面爆裂情况

Fig.4 Spalling on the bottom of slab

以试件 L1 为例,热电偶测得温度变化如图 5 所示,其中  $d_1, d_2$  分别表示测点到梁侧面和底面的距离.当温度达到 100 °C 时,混凝土对应的曲线有一个温度平台,这是因为在 100 °C 时混凝土水分蒸发,吸收热量,导致温度升高缓慢.距梁底面 25 mm 的混凝土由于距受火面较近,水分可以快速蒸发,温度平台不明显.由于热传导性差,混凝土的温度较炉温有滞后性,且越远离受火面滞后性表现得越明显.

### 3 受火试件的加固

加固前,首先对构件受火面进行处理.根据受火程度不同,去除 10~20 mm 的疏松混凝土层后外贴碳纤维布.碳纤维布的型号为 COLAN AC236,设计

厚度 0.111 mm,抗拉强度设计标准值 3 540 MPa,弹性模量 243 GPa,伸长率 1.81%;所用的配套树脂胶的性能指标为:底层树脂正拉黏结强度为 3.2 MPa,找平材料正拉黏结强度为 3.5 MPa,浸渍树脂的拉伸剪切强度为 26 MPa,拉伸强度为 44 MPa.

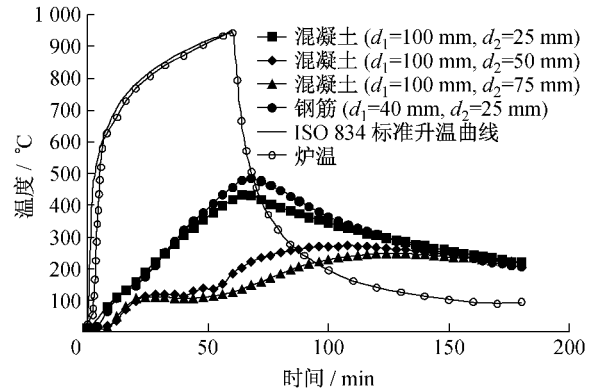


图 5 试件 L1 不同深度的温度变化曲线

Fig.5 Temperature curves at different depths of L1

为了进行加固效果的对比,连续板 S1C 仅选一跨进行加固,CFRP 粘贴范围为该跨板底受拉区(通长)和板顶支座受拉区(该跨 900 mm,并延伸至相邻跨 175 mm).连续梁跨内贴布的区域均贴有 200 mm 宽的碳纤维布 U 型箍,净距 200 mm,U 型箍绕过梁底延伸至翼缘底.板面上粘贴的碳纤维布两端设有碳纤维布压条一层(S1C 板顶宽 150 mm,板底宽 100 mm;梁顶面宽 200 mm),详见表 2.

表 2 受火试件加固方式

Tab.2 Details of CFRP sheet strengthened

试件	test specimens							
	支座受拉区				跨内受拉区			
	层数	长度/ mm	宽度/ mm	条数 间距	层数	长度/ mm	宽度/ mm	条数 间距
S1C	1	1 075	150	4 150	1	2 375	150 100	2 100
L2C					1	2 200	150	1
L3C	1	1 800	100	2 200	2	2 200	150	1
L5C	1	1 800	150	2 200				
L6C					2	2 200	150	1

注:对于跨内受拉区的加固,板为单跨加固,梁为双跨加固.

### 4 静载试验

采用千斤顶—分配梁进行加载,如图 6 所示(板与梁相似).板的加载点位置为跨中,梁的加载位置距离中支座和边支座的距离比为 2:3.试验采用分

级加载制度.采用滑阻式位移计和电阻应变片测量构件的挠度和应变.

常温板在加载中混凝土开裂首先发生在支座受拉区,然后跨中受拉区混凝土开裂,中支座受拉钢筋屈服,最后跨中受拉钢筋屈服导致试件破坏.受火板由于高温的影响,中支座早已开裂,跨中板底出现龟裂,加载过程中跨中附近出现横向通长裂缝.加载至最后,中支座两侧及跨中都出现了非常明显的横向通长裂缝,跨中挠度增加迅速,宣告梁达到极限状态.对于一侧加固的 S1C,加载中未加固跨跨中加载部位形成 2 条集中裂缝,而加固跨产生多条细密的平行裂缝,这一现象可以认为是碳纤维布对混凝土

的约束作用造成的.未加固跨中支座混凝土被压碎而破坏后仅对加固跨继续加载,直至碳纤维布发生剥离,宣告此跨破坏.

常温梁 L0 和受火梁 L1 和 L4 在加载时首先在跨中产生受弯裂缝,而由于碳纤维布的包裹,火后加固梁混凝土的裂缝较难观察.与 L0 不同的是,当受火梁和火后加固梁的承载力接近于极限时,中支座附近受拉区混凝土形成的裂缝经腹板向中支座混凝土受压区集中,该处混凝土受压破坏导致梁破坏.受火梁 L1 和 L4 的裂缝数量较多,跨中挠度较大;而碳纤维布限制了火后加固梁受拉区混凝土的裂缝发展和梁的变形.

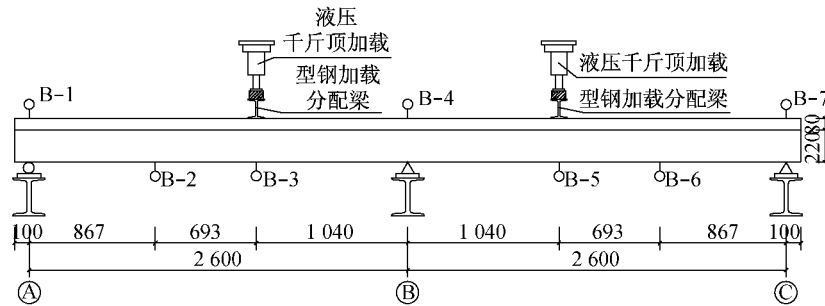


图 6 混凝土梁加载方式(单位:mm)

Fig.6 Test set-up of the tested beams(unit:mm)

## 5 试验结果分析

### 5.1 板的力学性能

尽管试件在相同的条件下浇筑和养护,两跨的力学性能仍不可避免地存在差异.本文中,试件先达到其极限状态的一跨称为弱跨.出于安全方面的考虑,文中讨论都是基于弱跨进行的(除 S1C).板试件弱跨加载点荷载—挠度曲线如图 7 所示.从图中可以看到荷载作用下常温板 S0,受火板 S1—S4 以及加固板 S1C 的力学反应存在明显的差异.因此,本文拟从承载力、初始刚度、混凝土压应变、钢筋和碳纤维

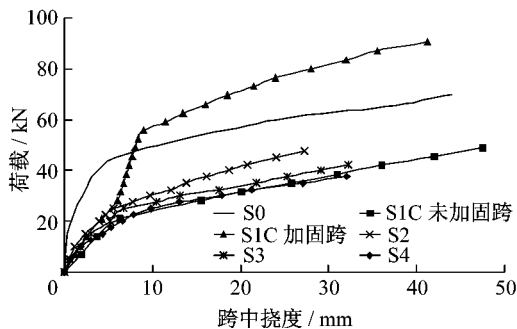


图 7 跨中荷载—挠度曲线

Fig.7 The load—deflection curves of midspan

维的拉应变几个方面进行试验数据的分析.

#### 5.1.1 承载力

混凝土板的极限承载力的判断以规范《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)中的相关条款为依据,取弱跨的极限承载力为代表;为了研究受火后试件在正常使用极限状态下的性能,取挠度为 1/200 板跨时对应的荷载作为正常使用承载力来进行比较.

图 8 是试件的极限承载力与正常使用承载力随受火时间变化的对比.由图可见:受火后连续构件的承载力降低;随着受火时间的增加,承载力呈下降趋势且降低趋势趋于缓和(S4 的极限承载力和正常使用承载力降低约 46%);相对而言,正常使用承载力的降幅更大.

由于试件 S1C 的设计受火温度高于标准升温曲线 200 °C,其未加固跨的正常使用承载力甚至低于受火 100 min 的试件 S4(降低 48%).从图 7 和 8 可知,S1C 加固跨的承载力得到了充分的恢复和增强,极限和正常使用承载力比常温梁分别高出 30%和 20%(比 S1C 未加固跨提高 73%和 131%).可以认为,受火后极限承载力和正常使用承载力的损失可以通过碳纤维加固来恢复甚至加强.

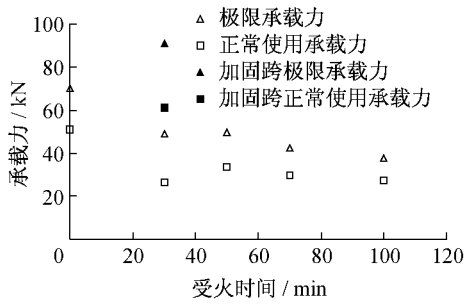


图 8 各板极限承载力和正常使用承载力的比较

Fig. 8 Comparison of ultimate bearing capacity and serviceability bearing capacity between slabs

连续构件的承载力与受力钢筋配筋率及混凝土的抗压强度关系密切. 已有试验研究表明, 受火后混凝土的抗压强度与受火的温度历史有关, 受火温度越高, 时间越长, 混凝土的抗压强度降低越明显. 而受火冷却后, 钢筋的强度变化不大, 过火温度低于 600 °C 时, 冷却后热轧钢的强度基本不受影响<sup>[13]</sup> (本试验钢筋的最高温度为 575 °C). 因此, 可以认为试件的承载力下降主要是因为混凝土材性的劣化造成的.

5.1.2 初始抗弯刚度

表 3 列出了受火后连续板试件的初始抗弯刚度. 由表可见: 受火后连续板的初始抗弯刚度严重降低; 随着受火时间的增加, 初始抗弯刚度呈下降趋势; 与承载力相比, 初始刚度的降幅更大. 由图 7 和表 3 可知, S1C 加固跨的初始刚度比未加固跨提高 50%, 与常温梁相比仍没有明显的提高. 但加载后期碳纤维发挥作用后, 构件的抗弯刚度有了明显的增强.

表 3 混凝土板初始抗弯刚度

Tab. 3 The initial bending rigidity ratio of slab specimens

试件	S1C		S2	S3	S4	
	未加固跨	加固跨				
初始刚度 量纲一化	1	0.10	0.15	0.17	0.14	0.10

受弯构件的初始抗弯刚度主要由截面的几何形状和混凝土的弹性模量决定, 与配筋关系较小. 研究表明, 高温后混凝土弹性模量的降幅要远大于抗压强度的降幅, 而且降幅随着受火程度的加重而增大<sup>[14-15]</sup>. 因此, 受火后试件初始抗弯刚度的降幅要远大于抗弯承载力的降幅.

如表 3 所示, 经过受损混凝土置换和 CFRP 加固后, S1C 加固跨的初始刚度比未加固跨有所提高,

但仍远低于常温板的刚度. 这一现象可以归结为以下原因: 首先, 混凝土受损严重, 且凿除替换的深度仅为 10~20 mm, 根本无法完全置换受损部分; 其次, CFRP 布仅具有单向抗拉强度, 对于试件刚度的贡献甚至小于普通钢筋.

5.1.3 混凝土应变

在截面塑性铰充分发展之前, 可以认为 S0—S4 试件的内力分布是接近的. 由图 9 可见, 在相近的内力作用下, 受火程度严重的板, 中支座受压区混凝土应变较大. 板顶跨中受压区混凝土有相同的规律. 这是由于受火后混凝土弹性模量下降, 要在板的截面内形成足够的弯矩, 混凝土的应变值自然会较大, 且受火程度不同, 增大幅度也不同. 对于 S1C 加固跨, 待碳纤维发挥作用后板顶跨中混凝土压应变增速变小.

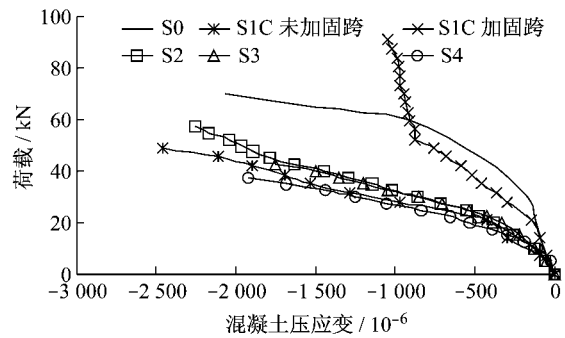


图 9 板底中支座混凝土荷载—应变曲线

Fig. 9 Load—strain curves of concrete on bottom near the middle support

5.1.4 钢筋及 CFRP 应变

混凝土板跨中受拉钢筋和 CFRP 的应变如图 10 所示. 初始阶段, 混凝土尚未出现受拉裂缝, 应力没有转移至钢筋和碳纤维, 此时的应变都比较小. 随着荷载的增加, 受火试件的支座区较早开裂, 出现塑性铰, 导致内力重分布, 弯矩向跨中转移, 相同荷载下,

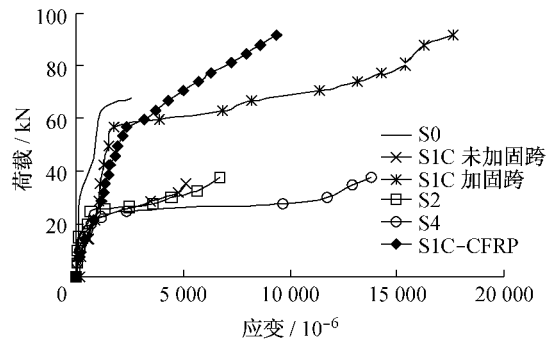


图 10 板底跨中钢筋及 CFRP 荷载—应变曲线

Fig. 10 Load—strain curves of steel and CFRP at the bottom of mid-span

跨中弯矩增大,使得 S2, S4 和 S1C 的未加固跨的钢筋应变增加较快. 而 S1C 加固跨由于碳纤维的作用,开裂较晚,钢筋和碳纤维拉应力增加得也较慢.

### 5.2 梁的力学性能

图 11 为梁试件弱跨加载点的荷载—挠度曲线. 可知,相同荷载条件下,受火梁的挠度增大明显,加固梁的挠度值有所恢复,但仍然高于未受火梁.

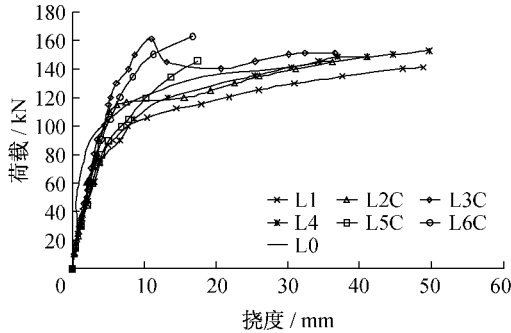


图 11 梁加载点荷载—挠度曲线

Fig.11 Load—deflection curves at loading points

#### 5.2.1 承载力

图 12 和 13 是试件的极限承载力和正常使用承载力的比较. 极限承载力的判断仍以《规范混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)中的相关条款为依据;正常使用承载力则取连续梁“弱跨”挠度达到 1/250 跨度时对应的荷载.

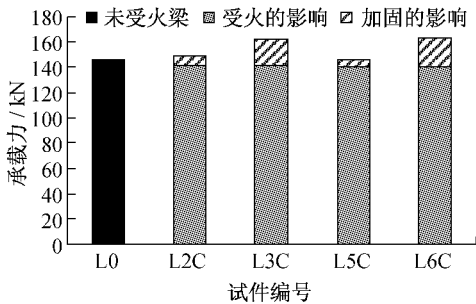


图 12 梁试件的极限承载力

Fig.12 Ultimate bearing capacity of beams

由图可见,受火后梁的极限承载力和正常使用承载力均低于未受火梁的承载力. 与板的试验结果相比,梁的承载力降幅不明显,这是由于与板相比梁的截面尺寸(高度)要大得多,由于混凝土导热性较差,相同受火时间下梁受温度影响的程度要低于板. 由于各试件的受火时间相差不大,在本次试验中承载力随受火时间的增加而降低的现象没有得到明显的体现.

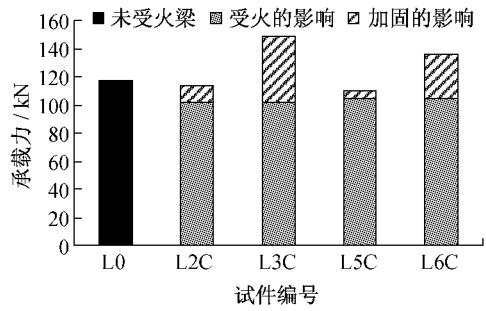


图 13 梁试件的正常使用承载力

Fig.13 Serviceability bearing capacity of beams

从加固效果来看,碳纤维布加固后梁的承载力有明显提高,基本达到甚至超过了未受火梁,尤其是对正常使用承载力的提高作用明显. 在跨中梁底粘贴 2 层碳纤维布的 L3C 和 L6C 加固效果最好,其中 L3C 相对于受火时间相同的 L1 极限承载力提高 14%,正常使用承载力提高 46%;效果最不理想的是仅在梁顶支座处粘贴 1 层碳纤维布的 L5C,承载力相对于受火时间相同的 L4 仅有微小幅度的提高(极限承载力提高 4%,正常使用承载力提高 5%). 所以,用碳纤维布加固受火后连续梁时,粘贴位置选在跨中梁底会取得较好的效果.

#### 5.2.2 初始刚度

由图 11 可知,在加载初期,未受火梁 L0 的初始抗弯刚度大于受火梁(L1—L6C). 即使是经过受损混凝土的置换和碳纤维加固,受火后加固梁的初期抗弯刚度仍低于未受火梁 L0. 直到加载后期,钢筋屈服、碳纤维充分发挥作用后,加固梁体现出高于未受火梁的刚度.

表 4 列出了梁试件的初始抗弯刚度,可以发现受火梁试件的初始刚度降幅大于其承载力的降幅,原因与板相似,在此不再赘述. 由于试件截面尺寸的原因,梁的刚度降幅小于板试件.

与板试件相比,梁试件的配筋率较高但碳纤维用量较少,加上梁试件本身受损相对较轻,使得 CFRP 布的作用较弱.

表 4 梁试件的初始抗弯刚度

Tab.4 The initial bending rigidity ratio of beam specimens

试件编号	L0	L1	L2C	L3C	L4	L5C	L6C
初始刚度 量纲一化	1.00	0.63	0.61	0.62	0.59	0.55	0.61

## 6 结论

(1) 随着受火时间的增加和受火温度的升高,

构件的极限承载力和正常使用承载力均逐渐降低且后者的降幅大于前者的降幅。

(2) 连续构件受火后,初始刚度降幅远大于承载力降幅。

(3) 在同等受火条件下,连续板构件力学性能的损伤要大于连续梁构件。

(4) 采用碳纤维布加固可以提高受火后连续构件的极限承载力和正常使用承载力,使其恢复到甚至超过受火前的状态。但对于初始刚度而言,碳纤维加固的效果有限。

### 参考文献:

- [1] 张焱,徐志胜. CFRP 加固火灾后钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2008,40(1):40.  
ZHANG Yan, XU Zhisheng. Research of flexural behavior of fire-damaged reinforced concrete beams strengthened with CFRP [J]. Xi'an Univ of Arch & Tech: Natural Science Edition, 2008, 40(1): 40.
- [2] 张伟平,顾祥林,王晓刚,等. 火灾后钢筋混凝土楼板安全性检测与评估[J]. 结构工程师,2009,25(6):128.  
ZHANG Weiping, GU Xianglin, WANG Xiaogang, et al. Safety inspection and assessment of reinforced concrete slabs after fire [J]. Structural Engineers, 2009, 25(6):128.
- [3] 王春华,程超. 高温冷却后钢筋混凝土简支梁强度损伤的研究[J]. 西南交通大学学报,1992(2):65.  
WANG Chunhua, CHENG Chao. Research on simply supported reinforced concrete beams after cooling from high temperature [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1992 (2): 65.
- [4] El-Hawary M M, Ragab A M, El-Azim A A, et al. Effect of fire on flexural behavior of RC beams [J]. Construction and Building Materials, 1996, 10(2): 147.
- [5] El-Hawary M M, Ragab A M, El-Azim A A, et al. Effect of fire on shear behavior of R C beams [J]. Computers & Structures, 1997, 65(2): 281.
- [6] 许清风,王孔藩,刘挺林. 三面受火受弯构件自然冷却后承载能力的试验研究[J]. 施工技术,2005,34(8):7.  
XU Qingfeng, WANG Kongfan, LIU Tinglin. Experimental research on carrying capacity of RC beams after cooled down from high temperature on three surfaces [J]. Construction Technology, 2005, 34(8): 7.
- [7] 向延念,李守雷,徐志胜. 钢筋混凝土简支梁高温力学性能的试验研究[J]. 华北科技学院学报,2006,3(1):57.  
XIANG Yannian, LI Shoulei, XU Zhisheng. Experimental study on mechanical property of simply supported RC beam under high temperature [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2006,3(1):57.
- [8] 李守雷,徐志胜,常玉锋,等. 火灾后 RC 简支梁的动力性能试验研究[J]. 武汉化工学院学报,2005,27(4):27.  
LI Shoulei, XU Zhisheng, CHANG Yufeng, et al. Experimental study on dynamical performance of the simple RC beams after fire [J]. Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology, 2005, 27(4): 27.
- [9] 李耀庄,唐义军,徐志胜. 火灾作用后 RC 简支梁抗弯承载力试验研究和可靠度分析[J]. 中国安全科学学报,2004,14(10):85.  
LI Yaозhuang, TANG Yijun, XU Zhisheng. Experimental study on bearing capacity and analysis of reinforced concrete simple support beam after fire [J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(10): 85.
- [10] 陈礼刚. 钢筋混凝土板受火性能的试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学土木工程学院,2004.  
CHEN Ligang. The experimental research of concrete slab [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology. Collage of Civil Engineering, 2004.
- [11] 高立堂. 无黏结预应力砼板火灾行为的试验研究及热弹塑性有限元分析[D]. 西安:西安建筑科技大学土木工程学院,2003.  
GAO Litang. Experimental investigation and nonlinear finite element analysis of the behaviors of unbonded prestressed concrete slabs under fire [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology. Collage of Civil Engineering, 2003.
- [12] 胡海涛. 高温时高强混凝土压弯构件的试验研究及理论分析[D]. 西安:西安建筑科技大学土木工程学院,2002.  
HU Haitao. The Experimental research and theoretical analysis of high strength concrete compression-flexure members under loading and elevated temperature [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology. Collage of Civil Engineering, 2002.
- [13] Kirby B, Lapwood D, Thomson G. Reinforcement of fire damaged steel and iron framed structures[R]. [S. l.]: British Steel Corporation, Swinden Laboratories, 1986.
- [14] 余江滔. 火灾后混凝土构件损伤评估的试验及理论研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2007.  
YU Jiangtao. Experimental and theoretical research on damage assessment of reinforced concrete member after fire [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2007.
- [15] 徐彧,徐志胜,朱玛. 高温作用后混凝土强度与变形试验研究[J]. 长沙铁道学院学报,2000,18(2):13.  
XU Yu, XU Zhisheng, ZHU Ma. Experimental investigation of strength and reformation of concrete after high temperature [J]. Journal of Changsha Railway University, 2000, 18(2): 13.