

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0191

冲击荷载与火灾联合作用下 SFRC 梁的力学行为*

张仁波, 金 浏, 杜修力, 窦国钦

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为了探究冲击荷载与火灾联合作用下钢纤维混凝土 (steel fiber reinforced concrete, SFRC) 梁的力学性能, 联合应用高性能落锤试验系统、四点弯曲实验装置与装配式电炉开展了 4 根 SFRC 梁的冲击实验与高温恒载实验, 观察了其破坏模式并记录了跨中位移和钢筋应变的时程曲线, 探讨了冲击损伤 SFRC 梁的抗火性能。此外, 在实验研究的基础上, 考虑材料的应变率强化效应及温度软化效应, 建立数值模型, 首先对梁进行冲击加载模拟, 并以冲击模拟结果为初始状态, 采用热-力“顺序”耦合方法, 对冲击加载与高温恒载联合作用下 SFRC 梁的力学行为进行了三维宏观有限元数值模拟。同时, 考虑混凝土内部结构非均质性的影响, 采用类似步骤, 开展了细观模拟。宏/细观模拟结果与实验结果的良好吻合验证了本文数值方法的合理性与有效性, 并体现了细观方法的优越性。研究发现, 冲击能量较小时, SFRC 梁在冲击荷载作用下, 尽管局部混凝土开裂, 梁整体残余变形较小, 抗火性能有一定程度的下降; 随着钢纤维掺量增大, 混凝土基体抗剪强度增大, SFRC 梁在冲击荷载作用下的开裂形态由弯剪裂缝并存向以弯曲裂缝为主转变; 冲击损伤 SFRC 梁在高温恒载作用下裂缝分布较为集中, 且发生脆性破坏。

关键词: 钢纤维混凝土梁; 冲击荷载; 火灾; 跨中位移; 有限元模拟

中图分类号: O382; TU375.1

国标学科代码:

文献标志码: A

工程结构受到恐怖袭击、意外爆炸等威胁甚至造成伤亡的事例时常出现, 不仅对荷载直接作用的人员及物品造成杀伤和毁坏, 而且将引发构件和结构的强烈振动与破损, 甚至会使得工程结构因关键构件的毁坏而丧失承载平衡, 致使发生局部或整体坍塌。在可燃物集中的城市环境内, 建筑物内的爆炸或冲击往往导致火灾等次生灾害, 爆炸(冲击)和火灾高温联合作用会对工程结构产生更为严重的破坏^[1]。典型的火灾和冲击(爆炸)联合作用下工程结构的破坏, 如 2001 年美国“9·11 事件”中世贸大厦“双塔”及 2015 年天津港爆炸^[2]致使的高层结构破坏。然而, 在过去的几十年里, 研究者往往针对这两种荷载对结构的影响分别进行研究^[3-7]。由于两种荷载本身及其作用下结构反应的差异, 单独研究远远不能满足工程设计分析要求。

任晓虎等^[8-9]对火灾作用下及作用后的钢管混凝土构件进行了落锤冲击试验, 表明火灾下钢管混凝土梁仍具有良好的抗冲击性能。Pan 等^[10]和 Zhai 等^[11]综合采用实验、数值模拟及理论解析手段, 对火灾后钢筋混凝土构件的抗爆性能进行了全面分析, 发现钢筋混凝土构件承载能力显著下降, 延性增强。针对爆炸(冲击)与火荷载联合作用下钢、钢筋混凝土构件的抗火性能, 方秦等^[1,12]、赵建魁等^[13]和 Ruan 等^[14]进行了数值模拟, Morita 等^[15]进行了实验研究, 均发现爆炸(冲击)荷载作用将降低梁的耐火能力。Choi 等^[16]考虑预应力约束与爆裂剥落效应, 对冲击或爆炸引发的火灾下的双向预应力混凝土板进行了数值模拟, 结果与实验吻合良好。综上所述, 国内外对于火灾与冲击荷载联合作用下构件的力学性能的研究主要针对普通钢或钢筋混凝土构件, 且比较零散, 缺乏系统性, 与工程设计计算的实际需求仍有较大距离。

* 收稿日期: 2018-05-30; 修回日期: 2018-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(51822801); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB058000); 国家重点研发计划专项(2016YFC0701100)

第一作者: 张仁波(1989—), 男, 博士研究生, zhangrenbo99@126.com;

通信作者: 金 浏(1985—), 男, 博士, 教授, 博导, kinglew2007@163.com。

另一方面,作为一种新型的多相复合材料,钢纤维混凝土具有较高的抗拉、抗弯及抗疲劳强度和较好的延性,适合应用于可能遭受极端荷载的工程结构。文献 [17] 中开展了钢纤维混凝土 (steel fiber reinforced concrete, SFRC) 梁的抗冲击性能实验,结果表明钢纤维的加入可以减小梁中箍筋的应变,使其中的钢筋发挥更好的作用,并可以抑制裂缝的发生与开展,从而改变梁的开裂形态,提高其抗冲击能力。本文在此基础上,采用四点弯曲实验装置和装配式电炉对冲击损伤 SFRC 梁进行恒载高温实验,观测其抗火性能,以丰富冲击与火灾联合作用下构件性能的实验数据;并开展三维宏/细观有限元数值模拟,为进一步研究多灾变条件下 SFRC 构件的力学行为奠定基础。

1 实验概况

1.1 试件设计

共进行了 4 根钢纤维混凝土配筋梁的冲击实验和抗火实验。如图 1 所示,每根实验梁长 2.8 m,净跨 L 为 2.4 m,截面尺寸为 400 mm×200 mm(高×宽),纵向钢筋采用 HRB400 级钢筋,箍筋采用 HPB300 级钢筋,混凝土设计强度为 C60,保护层厚度为 30 mm。试件采用钢模浇注,人工振捣,在室温下人工施水养护 28 天。如表 1 所示,为了探讨钢纤维掺量的影响,采用了 0%、1%、2% 和 3% 四种钢纤维体积分数,实测钢纤维基本性能见表 2。

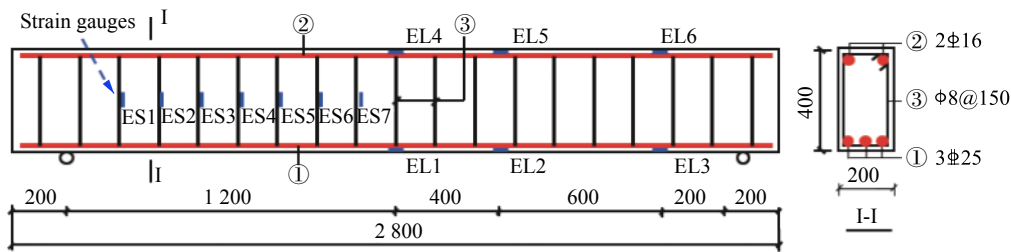


图 1 SFRC 梁尺寸及配筋情况(单位: mm)

Fig. 1 Dimensions and reinforcement layout of SFRC beams (unit: mm)

表 1 钢纤维混凝土配合比

Table 1 Mix proportions of the steel fiber concrete

编号	钢纤维体积分数/%	体积质量/(kg·m ⁻³)					抗压强度/MPa
		钢纤维	水	水泥	砂	粗骨料	
B-0	0	0	154	425	672	1 096	41.90
B-1	1	78	164	547	696	1 044	42.47
B-2	2	156	180	600	668	1 002	52.18
B-3	3	234	196	653	640	960	60.34

表 2 钢纤维物理性质

Table 2 Physical properties of the steel fibers

长度/mm	直径/mm	长径比	抗拉强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
30	0.6	50	1 100	7 800

1.2 实验装置

与文献 [17] 相同,钢纤维混凝土梁冲击实验是在湖南大学高性能落锤冲击试验机上完成的,如图 2(a) 所示。高性能落锤试验机由落锤提升和控制系统、锤体、触发装置和夹支铰支座以及电阻式位移计等组成,通过电阻式位移计可以测得 SFRC 梁构件在落锤冲击过程中的弯曲变形。为了保证梁在冲击损伤后,仍具有一定的承载能力,本次实验中,锤重为 393 kg,落锤下落高度由文献 [17] 的 3 m 减小为 1.5 m,

由此可得冲击速度为 5.4 m/s, 冲击能量为 5.7 kJ。

冲击实验后 SFRC 梁的抗火实验采用图 2(b) 所示的装配式电炉进行加热, 同时采用四点弯曲实验装置对梁进行加载, 两个加载点之间的距离为 0.5 m。电炉加热装置由底座、金属外壳、保温材料、炉衬、电热丝和温度控制系统等组成。

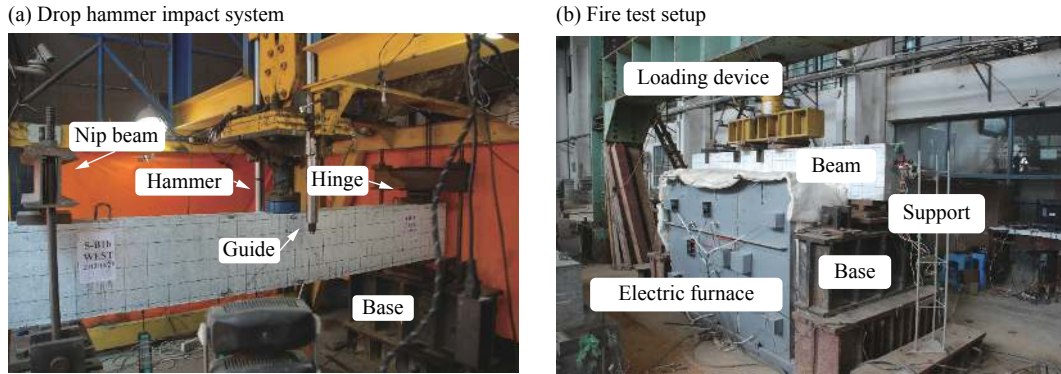


图 2 实验装置
Fig. 2 Experimental set-up

1.3 实验方法

实验分 2 个阶段进行: 第一阶落锤冲击实验, 第二阶段恒载升温实验。第一阶段先在落锤设备上将锤头提升至 1.5 m 高度处, 释放落锤对 SFRC 梁进行冲击; 随后将梁移至四点弯曲加载装置上施加恒定静力荷载直至梁的变形保持稳定。之后保持恒载不变, 架设高温电炉, 按照 ISO834 国际标准升温曲线^[18]加热升温, 每隔 30 s 记录跨中位移、温度变化。图 3 给出了实测升温曲线与标准升温曲线的对比。由图可知, 二者除初期升温速率、最高温度略有差异外, 实测升温曲线的基本走势、稳定性与标准曲线较为符合, 考虑到电炉最大功率的限制, 可以认为调试所得电炉升温曲线能够满足火灾实验工况的要求。

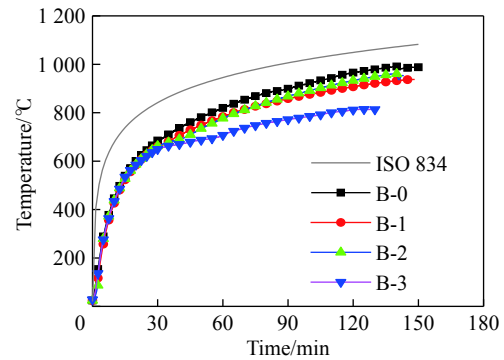


图 3 实测升温曲线与标准升温曲线
Fig. 3 Fire curves of SFRC beams and ISO 834 curve

根据 GB/T 9978.1-2008 《建筑构件耐火试验方法》^[19] 规定, 抗弯构件丧失承载能力的判定准则为: $D = L^2/(400d)$ 或 $dD/dt = L^2/(9\ 000d)$ (后者变形量超过 $L/30$ 之后应用), 其中: D 为极限弯曲变形量, L 为试件的净跨度, d 为试件截面上抗压点与抗拉点之间的距离。对于本文 SFRC 梁, $L=2\ 400\text{ mm}$, $d=332\text{ mm}$, 因而计算可得其丧失承载能力判定标准为变形量达到 46.2 mm 或变形速率达到 2.1 mm/min (变形量超过 60 mm 后应用), 此时认为试件破坏, 进行减荷、停炉处理。

2 冲击实验结果

经历较低能量的冲击荷载作用 (锤重 393 kg, 冲击速度为 5.4 m/s) 后, SFRC 梁的开裂形态、整体变形、冲击力与支反力及其中钢筋的应变时程分别如图 4~图 10 所示。

2.1 开裂形态

由图 4(a) 可知, 4 根梁冲击点附近均有混凝土被局部压碎, 然而, 由于钢纤维掺量不同, 各试件的开裂形态并不完全相同。在冲击荷载作用过程中, 试件 B-0 (未掺钢纤维) 冲击点下方首先出现弯曲裂缝, 并向上发展接近梁顶, 紧接着在支座附近迅速形成了较为对称的 4 条明显的剪切裂缝, 裂缝上段均向冲

击点集中并接近梁顶。试件 B-1 开裂形态与 B-0 相近, 亦为剪切斜裂缝和弯曲裂缝并存。对于试件 B-2 和 B-3, 钢纤维掺量比较大, 混凝土基体的抗拉及抗剪强度增大, 支座周围并未产生通常所见的剪切裂缝, 梁底部分出现很多细小弯曲裂缝, 大多仅限于 1/2 梁高范围内, 并未进一步伸长扩展。并且, 除跨中部分外, 其他区域的裂缝更加分散, 宽度较小, 长度较短, 表现出较好的耗能特征。总之, 冲击荷载作用下, 跨中裂缝较少或较细, 与静力加载作用下弯曲裂缝主要形成于跨中不同。另外, 冲击荷载作用后, 各试件的整体变形有较程度的恢复(见下文分析), 但各试件表面的主裂缝宽度均已超过规范^[20]规定的最大裂缝宽度限值, 说明梁经历了塑性变形过程。然而, 与前期工作^[17]相比, 宽度超过限值的裂缝较少, 可以认为本次实验中梁的损伤较轻, 梁的承载能力损失较小。

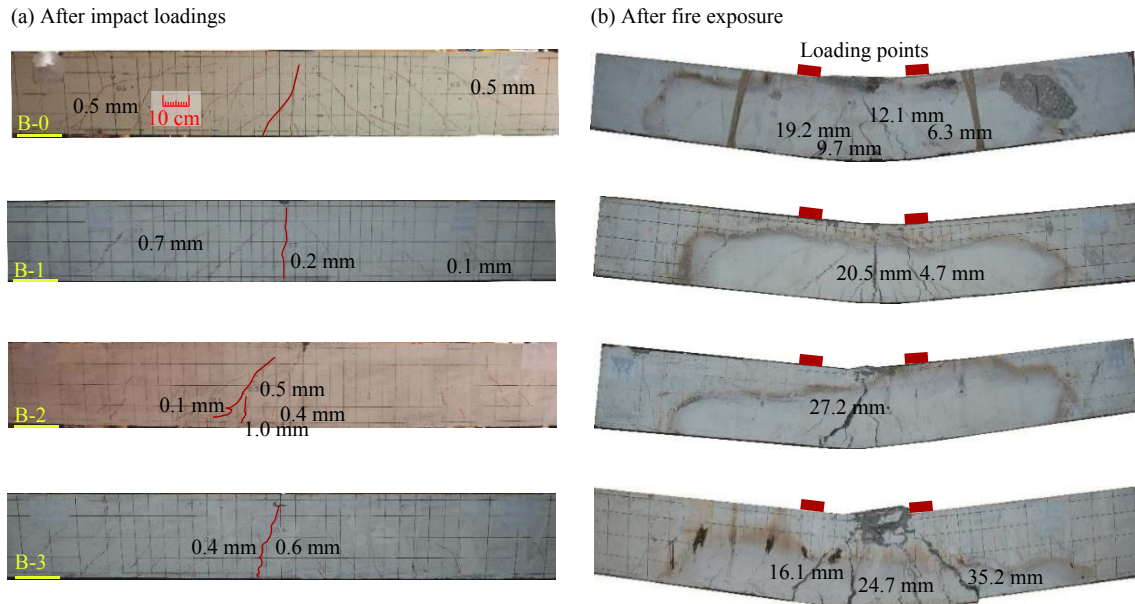


图 4 冲击与火荷载作用后 SFRC 梁的开裂形态

Fig. 4 Crack patterns of the SFRC beams after impact loading and fire exposure

2.2 整体变形

由图 5 冲击荷载作用下各试件的跨中位移时程曲线可知, 冲击过程中出现了位移为负值的情况, 即梁向上反弹超过原静止水平位置的现象, 与前期实验^[17, 21]明显不同。在前期实验中, 由于冲击能量较大(锤重 393 kg, 冲击速度 7.6 m/s), 梁迅速进入塑性变形阶段, 冲击过程中试件位移均为正值。对于本文工况, 虽然梁表面局部的混凝土明显开裂, 但梁在加载过程中出现较大程度反弹, 最终残余位移仅为 $L/2 500 \sim L/1 100$ (L 为梁的净跨), 说明梁的整体变形基本可以恢复, 仍然具有较好的承载能力。

此外, 由图 6 可知, 当跨中位移达到最大值时, 各梁的挠曲线与静态三点弯曲加载下的挠曲线具有

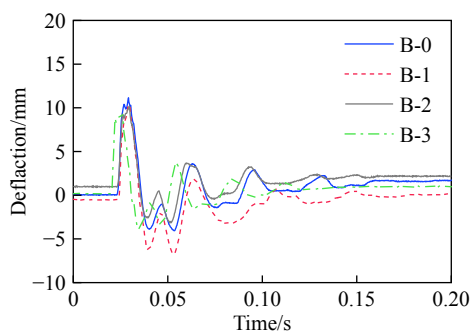


图 5 冲击荷载作用下 SFRC 梁跨中挠度时程曲线

Fig. 5 Mid-span deflection-time curves of the SFRC beams under impact loading

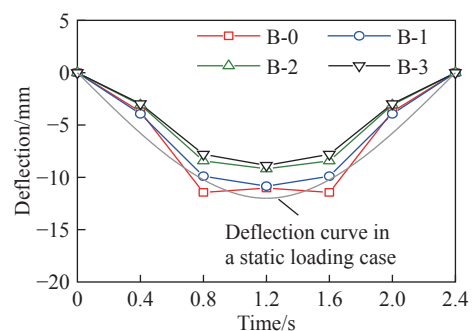


图 6 跨中挠度最大时 SFRC 梁的挠度分布

Fig. 6 Deflection distribution along the SFRC beams when the maximum mid-span displacement occurs

一定的差异, 即冲击作用下梁跨中两侧 $L/6$ 范围内的挠度较大, 这是由于冲击加载作用下, 冲击点附近梁的变形速度较大, 未及时传递到其他区域, 表现出较为明显的冲切特征。并且, 这种差异随着钢纤维掺量增加而减小, 说明其刚度增大, 整体性增强。

2.3 冲击力和支反力

图 7 和图 8 分别给出了冲击荷载作用下各梁的冲击力与支反力时程曲线。可以看出, 与前文工作^[17,21]相比, 冲击力峰值明显较小, 而支反力峰值较大。结合梁的表面开裂与整体变形情况知, 对于本文工况, 由于冲击速度较低, 支座抵抗的冲击荷载比例较高, 而由梁的惯性承担的比例较低。另外, 由于样本较少, 加上数据的随机性与离散性, 钢纤维掺量对冲击力与支反力的影响未呈现明显规律。

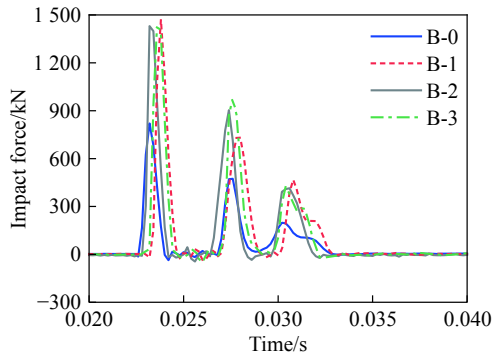


图 7 冲击力时程曲线

Fig. 7 Time history of impact force

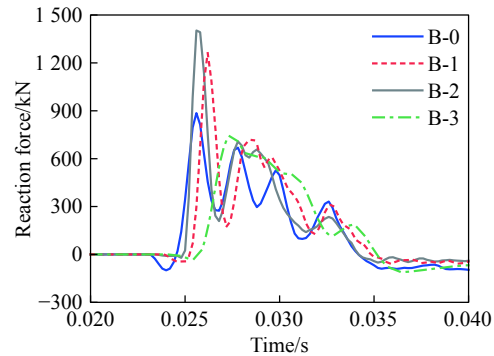


图 8 支反力时程曲线

Fig. 8 Time history of reaction force

2.4 钢筋应变

观察图 9 和图 10 钢筋的应变时程可知, 在冲击荷载作用下, 梁中的纵筋与箍筋应变均经历了较为

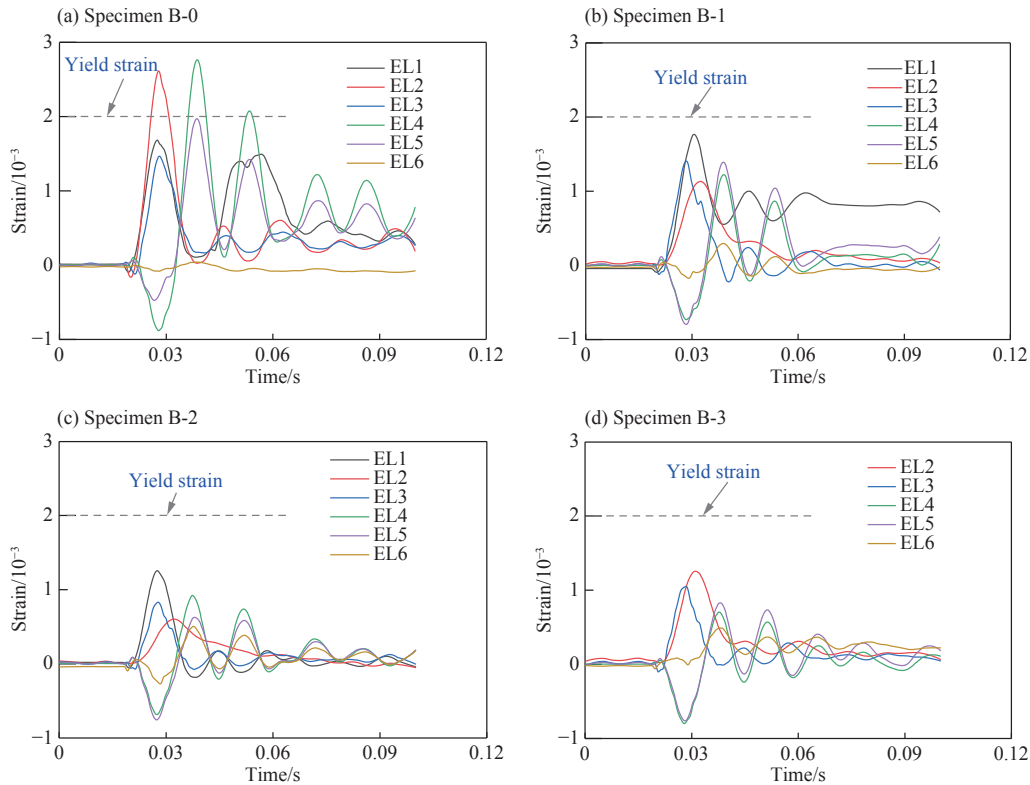


图 9 冲击荷载作用下纵筋应变时程

Fig. 9 Time histories of strains within the longitudinal rebars during the impact loading process

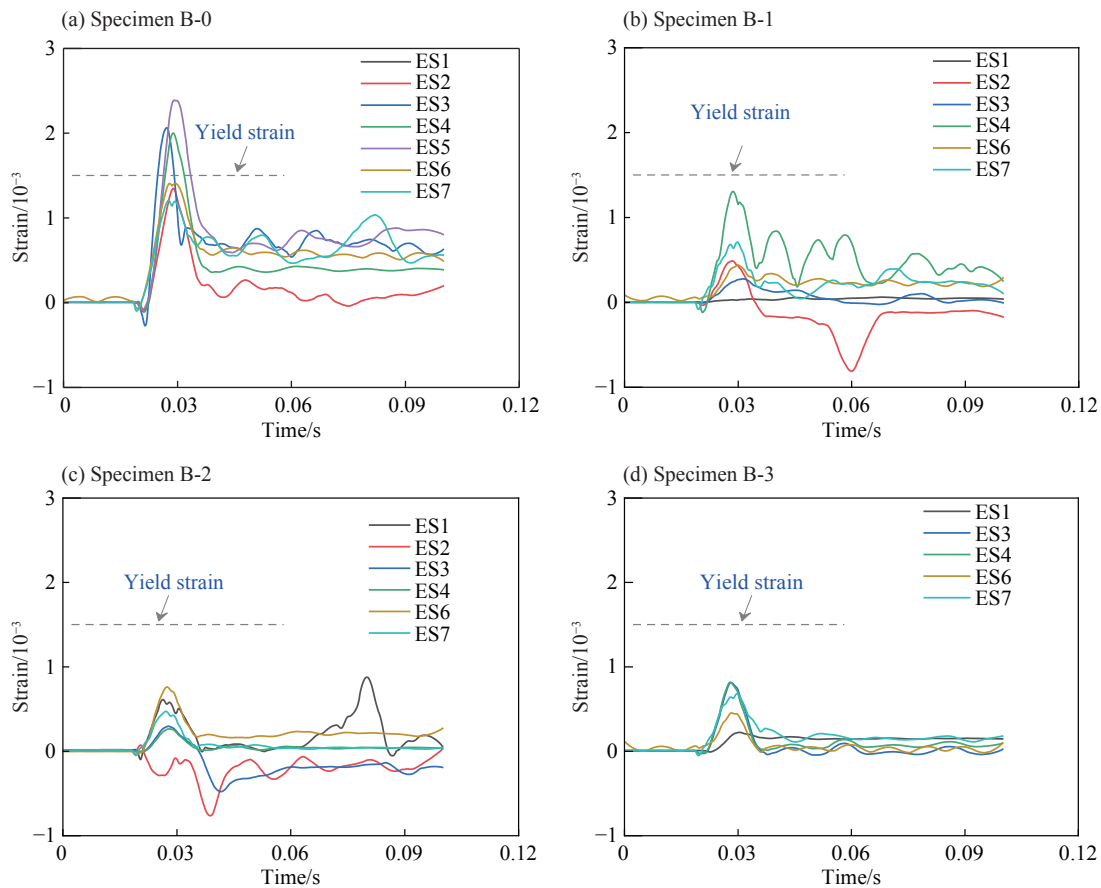


图 10 冲击荷载作用下箍筋应变时程

Fig. 10 Time histories of stirrup strains under impact loads

剧烈的变化。并且,与图 5 相比,多处钢筋的应变峰值出现的时刻稍早于跨中位移峰值。这是由于冲击荷载作用是一个动态的过程,落锤接触试件后,冲击点首先发生变形开裂,进而向梁的两端扩展,从而使不同位置处的混凝土与钢筋产生不同程度的变形,但是由于冲击荷载作用的时间极短,因而不同位置钢筋应变峰值出现的时刻亦非常接近。

由图 9 可发现,多处位置的纵筋应变为拉应变(正值),而梁上侧靠近冲击点位置(EL1 和 EL2)的架立筋由于荷载的作用产生压应变(负值)。对于素混凝土梁(B-0),多处纵筋应变超过钢筋的屈服应变;而对于 SFRC 梁,随着钢纤维掺量的增加,纵向钢筋中的拉应变峰值不同程度减小,说明钢纤维的加入使能量在梁中更加分散,降低了纵筋承受的拉应力,从而减小了纵筋的拉应变,表现为 SFRC 梁的弯曲裂缝更加分散,裂缝宽度较小。

对于箍筋应变(图 10),同样表现为素混凝土梁(B-0)中箍筋的应变峰值大于 SFRC 梁,并且多处应变达到屈服应变,这是由于素混凝土抗剪强度较低,容易产生剪切裂缝(如图 4(a)),需要箍筋承担的剪应力比较大。而对于 SFRC 梁,钢纤维增大了混凝土的抗剪强度,梁中的裂缝以弯曲裂缝为主,箍筋承担的剪应力也相应较小,从而产生较小的剪应变。这与前期工作^[17]的结论是一致的。

3 高温实验结果

冲击加载后,将梁移至四点弯曲加载装置上进行常温预加载,来保证实验设备和采集系统的正常工作。预加载的值取为常温下按规范计算所得的试件承载力的 30%~60%,相应的荷载-跨中位移曲线如图 11 所示。随后,正式加载至试件承载力(分别为 341、341、350 和 354 kN),保持荷载恒定,架设电炉,在高温恒载作用下试件破坏模式如图 4(b) 所示,相应的变形情况如图 12 所示。

3.1 预加载过程

观察图 11 可发现, 静态预荷载加载初期, SFRC 梁的荷载-位移曲线斜率出现小幅降低, 之后曲线大致线性发展, 从而反映出前期的冲击荷载对梁造成了一定损伤, 但损伤程度较轻。

3.2 破坏模式

在恒载升温过程中, 从 30 min 至 120 min, 试件在支座及跨中处出现大片潮湿区并伴有水蒸气冒出。随后部分试件出现局部混凝土爆裂现象。最终, 如图 4(b) 所示, 混凝土表面酥松呈现灰白色, 布满高温导致的龟裂裂缝。并且, 试件裂缝分布比较集中, 裂缝宽度较大, 说明由于钢纤维和混凝土材料本身力学性能以及二者之间粘结性能在高温下的软化, 钢纤维的增韧作用已不显著。由于之前的冲击加载类似于三点加载, 而高温恒载为四点加载, 导致梁的裂缝发展发生改变: 试件支座附近冲击荷载造成的剪切裂缝有所闭合, 而静态加载点之间纯弯段的裂缝扩展明显。对于素混凝土试件 B-0, 其破坏主要是冲击荷载造成的弯曲裂缝继续发展。试件 B-1 由于钢纤维掺量较低, 破坏模式与 B-0 相似。随着钢纤维掺量增加, 试件 B-2 和 B-3 的主裂缝为斜裂缝, 这亦是在冲击裂缝的基础上继续扩展而形成的。尽管各试件的裂缝主要分布在纯弯段, 其破坏模式与常温静载下弯曲破坏相似, 然而下文从跨中位移的发展来看, 升温达到一定时间后, 各试件的变形急剧增大, 破坏发生比较突然, 属于脆性破坏。

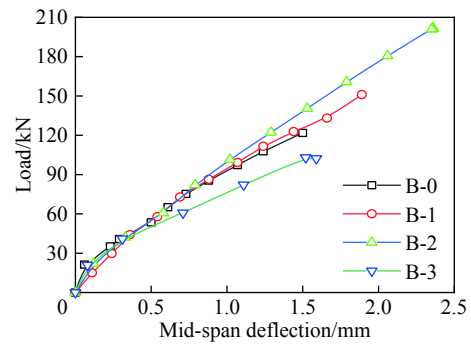


图 11 静态预加载下 SFRC 梁荷载-位移曲线
Fig. 11 Load-displacement curves of SFRC beams under static pre-loading

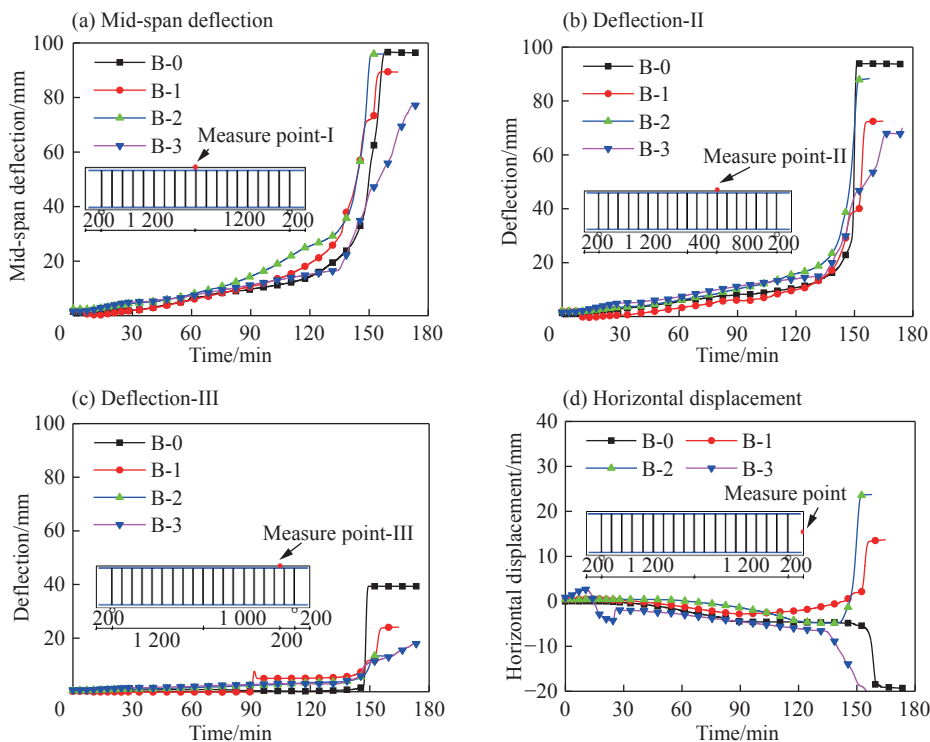


图 12 火灾作用下冲击损伤 SFRC 梁的位移时程
Fig. 12 Deflections of impact-damaged SFRC beams subjected to fire

3.3 整体变形

在恒载高温实验阶段, 各试件的位移均随时间呈非线性变化(图 12)。实验初期, 由于温度较低, 对

混凝土和钢筋力学性能影响较小,试件变形增长缓慢;随着温度升高,SFRC梁跨中挠度增长明显加快。最终在加热140 min后,各试件均出现位移急剧增大的现象,跨中位移已达到GB/T 9978.1-2008《建筑构件耐火试验方法》^[19]规定的承载能力丧失判定标准。4根梁丧失承载力的时间分别为150 min、143 min、144 min和152 min,可以认为冲击能量较小时,冲击荷载作用后SFRC梁仍具有良好的抗火性能。对比各试件,除了梁B-3外,各试件的位移发展过程并未呈现明显差异,说明在本文所涉及的工况下,低掺量的钢纤维对冲击荷载损伤梁抗火性能的影响很小。而钢纤维掺量较大(试件B-3)时,可延缓SFRC梁破坏发生的时刻,从而提高其抗火性能。

对比图12各图可知,高温恒载作用下梁中各测点位移差别较大,其中测点II由于距跨中较近,其位移发展与跨中相似;而测点III由于靠近支座,在梁失稳破坏前,位移较小。并且,失稳前梁的水平位移大致随时间线性增长,梁破坏后,水平位移迅速增大。由于梁破坏后整体变形较大,此时各梁的水平位移发展未表现出一致规律。

4 宏/细观数值模拟

为了进一步研究冲击损伤钢纤维混凝土梁的抗火性能,本节在前期实验工作及数值模拟工作^[22]的基础上,采用有限元方法对前述冲击实验及恒载高温实验进行三维宏/细观数值模拟。冲击加载过程的模拟与前期工作^[22]相同,而恒载高温实验模拟中温度荷载及力学荷载的施加采用顺序耦合方式进行,即认为梁的应力/位移受温度影响,而温度传导过程不受应力/位移影响。因而,先分别进行热传导模拟和冲击加载模拟,得到梁内部的温度场和冲击加载后梁中每个单元的应力应变状态;接着以冲击加载模拟结果为初始状态,进行四点弯曲加载后保持荷载恒定,同时导入温度场,考虑材料弹性模量、强度等随温度的变化,得到高温作用和力学荷载共同作用下梁的反应。

4.1 有限元模型

数值模拟中的有限元几何模型如图13所示,SFRC梁的形状和尺寸均与实验中一致。在冲击模拟及恒载高温模拟中,除钢筋采用梁单元进行离散外,混凝土、落锤及支承系统均采用八节点六面体减缩积分单元离散。在热传导模拟中,则将两种单元替换为相应的热传导单元。为了更好地模拟SFRC梁的力学及传热行为并提高计算效率,在网格敏感性分析的基础上,将混凝土及钢筋的网格尺寸取为10 mm,其他部分平均网格尺寸为30 mm。简便起见,与文献^[22-23]的工作相同,暂不考虑钢筋与混凝土之间的粘结-滑移行为,假定二者完好粘结。对于细观尺度模型,如图13所示,考虑混凝土细观结构非均质性对其观性能的影响,将其视为由骨料、砂浆与界面过渡区组成的三相复合材料,每一相具有各自独立的力学性能^[24]。

4.2 材料本构模型及参数

在宏观模型中,混凝土材料的力学行为采用由Lubliner等^[25]提出并由Lee等^[26]改进的塑性损伤模型来描述,该模型假定混凝土的主要破坏机制为拉伸开裂与压缩碾碎,已被广泛应用于单调加载,周期性往复加载和低围压下动力加载问题的模拟分析中^[22]。在细观模型中,砂浆与界面的力学性能亦采用上述塑性损伤模型进行描述。考虑到在高温或高应变率下,骨料的强度仍大于砂浆或界面,这里假定骨料为弹性^[24]。

对于钢纤维混凝土,与文献^[22]相同,这里未显式考虑钢纤维的影响,而是将其弥散于混凝土中,即

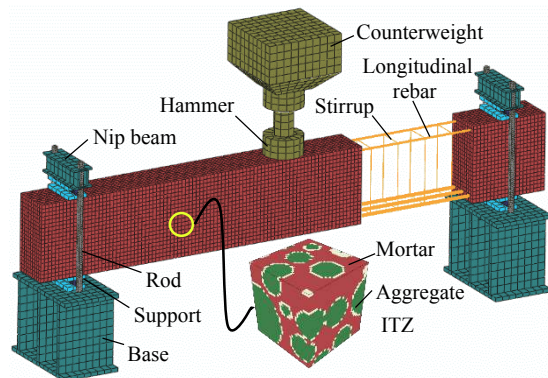


图13 SFRC梁宏/细观有限元计算模型

Fig. 13 Macro-/meso-scale FE model of the SFRC beam

钢纤维混凝土抗压强度选用实测值, 抗拉强度根据 JG/T 472-2015 《钢纤维混凝土》^[27], 结合基体混凝土强度、钢纤维类型及掺量来确定。

钢筋的力学行为采用双折线弹塑性模型^[28]来描述, 在硬化阶段, 其硬化模量取为初始弹性模量的 1%^[22]。其余部分如落锤及支承系统, 其力学行为假定为弹性, 材料参数与钢相同。

在冲击加载模拟中, 考虑应变率对混凝土和钢筋强度的影响, 动态强度增大因子 DIF 按照欧洲混凝土委员会^[29]建议的经验公式选用, 详见文献^[22]。

热传导模拟过程中, 混凝土和钢筋的热工参数(密度、导热系数和比热容)按 CECS 200: 2006 《建筑钢结构防火技术规范》^[30]建议的公式计算。

在高温下, 混凝土及钢材的力学性能均会发生软化, 这里考虑二者弹性模量及强度的软化, 欧洲标准化委员会^[31]建议的混凝土和钢筋在高温下的强度(f_c 和 f_s)及弹性模量(E_c 和 E_s)与常温取值的比值随温度的变化关系如图 14。

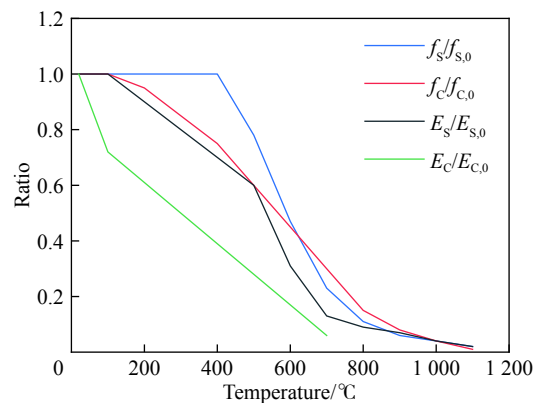


图 14 高温下材料力学性能软化曲线

Fig. 14 Degradation of material mechanical properties at elevated temperatures

4.3 模拟结果

以 B-2 梁为例, 按上述有限元模型计算所得的 SFRC 梁在冲击荷载及高温恒载作用后的破坏模式、跨中位移时程曲线及温度变化如图 15~图 18。由图 15 可知, 冲击荷载作用后, 由于冲击能量较小, SFRC 梁宏观模拟结果中未见明显开裂, 仅梁底应变较大, 这与实验过程中梁整体变形大部分恢复, 裂缝细小分散且多位于梁底的现象相符合。火灾作用后, 模拟所得 SFRC 梁纯弯段底部冲击损伤裂缝继续发展, 并进一步向梁顶延伸, 这亦与实验观察吻合。而在细观模拟结果中, 无论冲击荷载作用后还是火灾作用后, 梁中均观察到裂缝, 裂缝形状比较曲折, 且其分布比宏观模拟结果更接近实验结果, 这是由于细观模拟可以更直观地反映混凝土材料内部的非均质性, 从而可得到更真实生动的开裂形态。

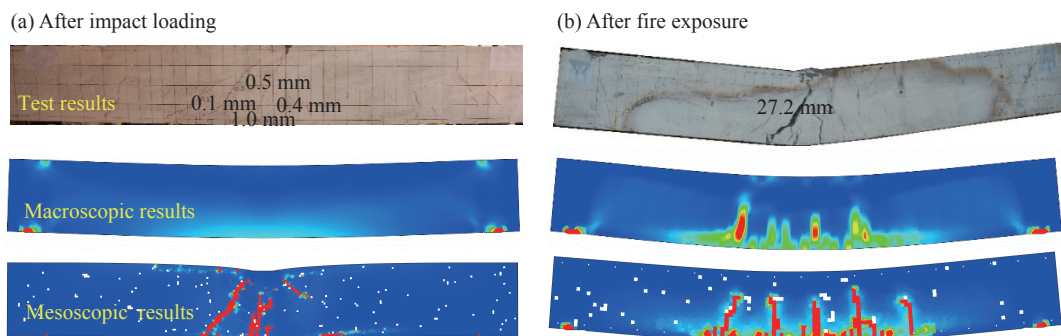


图 15 数值模拟 B-2 梁破坏模式与实验结果的对比

Fig. 15 Comparison of the simulated failure patterns with experiment observations for B-2

观察图 16 可见, 宏/细观模拟所得的冲击荷载作用后 SFRC 梁的跨中位移峰值比实验值低 12% 左右, 而残余位移与实验值的差异为 10%, 误差均在可接受的范围(小于 20%^[32])之内。另外, 模拟结果中也观察到了梁的反弹现象。因而, 尽管模拟结果与实验值在落锤冲击后的梁自由震荡阶段存在一定差异, 仍可认为本文三维宏观与细观尺度有限元模拟均可再现冲击荷载作用下 SFRC 梁的动力响应。并且, 在高温恒载阶段, 模拟所得的温升曲线与跨中位移时程亦与实验测量结果吻合较好(图 17 和图 18), 说明了本文热-力“顺序”耦合方法的有效性。由图 17(b) 还可知, 宏观与细观模拟所得的温度分布总体

十分接近,但由于细观模型考虑了混凝土材料的非均质性,二者在局部存在细微差异。

此外,对完好(未受冲击荷载)SFRC 梁的恒载高温行为进行了数值模拟,其跨中位移时程曲线与冲击损伤 SFRC 梁的对比见图 18。可知,完好 SFRC 梁的破坏时刻比冲击损伤梁晚 6 min,且完好梁在加载后期位移发展十分迅速,说明其破坏发生更加突然,由此知预先冲击荷载作用削弱了 SFRC 梁的整体刚

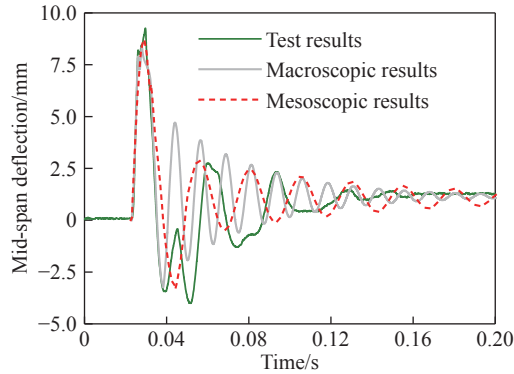


图 16 冲击作用下 B-2 梁跨中位移时程模拟值与实验值对比

Fig. 16 Comparison of the simulated mid-span deflections with the experimental ones for B-2 under impact

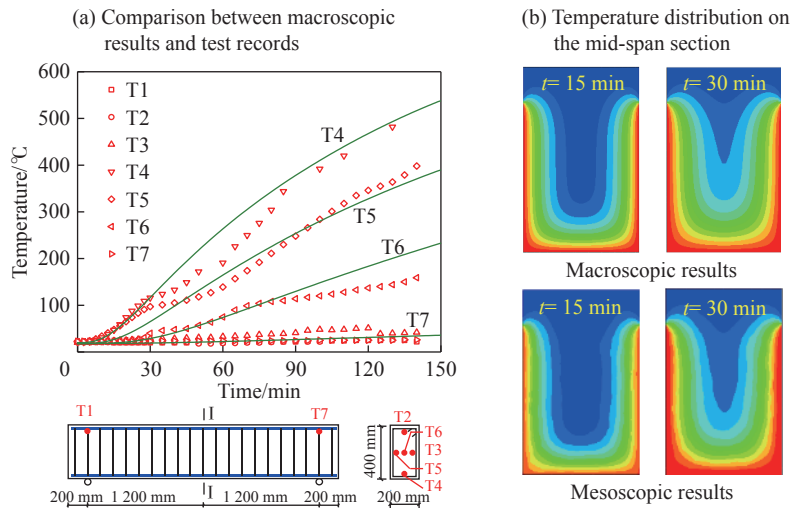


图 17 火灾作用下 B-2 梁温度分布

Fig. 17 Temperature distribution of beam B-2 under fire

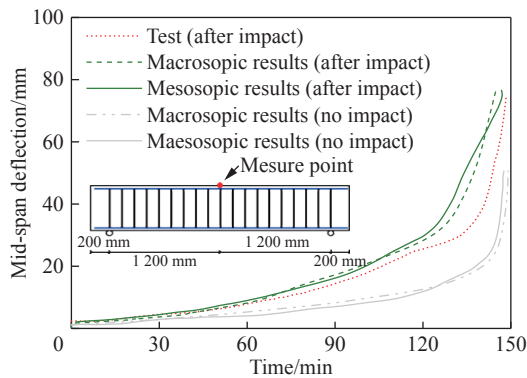


图 18 高温下 B-2 梁跨中位移时程曲线模拟值与实验值对比

Fig. 18 Comparison of the simulated mid-span deflections with the experimental values for B-2 at high temperature

度和抗火性能,但削弱程度有待进一步开展实验与数值模拟进行研究。并且,与温度场模拟结果相似,宏观与细观模拟所得的跨中位移时程曲线差异很小,说明宏/细观模型均可反映梁的整体变形。

5 结 论

(1) 在 5.7 kJ 冲击能量下, SFRC 梁在冲击荷载作用下局部混凝土开裂,梁整体残余变形仅为 $L/2500 \sim L/100$,耐火时间比未受冲击梁减少约 5%;

(2) 在冲击荷载作用下,随着钢纤维掺量增加,混凝土基体抗剪强度增大, SFRC 梁的开裂形态由弯剪裂缝并存向以弯曲裂缝为主转变;

(3) 能量较低时,冲击力峰值较小而支反力峰值较大;冲击损伤 SFRC 梁在高温恒载作用下裂缝分布较为集中,且发生脆性破坏;

(4) 本文三维有限元方法所得的梁的整体变形与实验结果的差异为 12% 左右,说明其可以合理有效地再现冲击荷载与火灾高温联合作用下 SFRC 梁的力学行为;

(5) 细观数值模型可反映混凝土材料内部结构的非均质性,从而得到更真实的开裂形态,并可考察各细观组分的影响,具有其优越性。

值得注意的是,本文仅进行了低能量冲击下 4 根 SFRC 梁的抗火性能实验,实际上,当能量较大时,冲击荷载将对梁造成更严重的破坏,从而影响其传热与力学性能。并且,本文仅考虑了先冲击加载后火灾升温这一荷载顺序,由于两种荷载作用本身的巨大差异,改换加载顺序将导致不同的结果。因而需要在后续工作中开展更多的实验,并结合理论分析与数值模拟等手段对这些问题进行系统深入的研究。

参考文献:

- [1] 方秦, 赵建魁, 陈力. 爆炸与火荷载联合作用下钢梁耐火极限的数值分析 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(S1): 62–68.
FANG Qin, ZHAO Jiankui, CHEN Li. Numerical simulation of fire resistance of steel beams subjected to blast and fire [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S1): 62–68.
- [2] 方秦, 杨石刚, 陈力, 等. 天津港“8·12”特大火灾爆炸事故建筑物和人员损伤破坏情况及其爆炸威力分析 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(3): 12–18.
FANG Qin, YANG Shigang, CHEN Li, et al. Analysis on the building damage, personnel casualties and blast energy of the “8·12” explosion in Tianjin port [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(3): 12–18.
- [3] 吴波, 唐贵和. 近年来混凝土结构抗火研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 110–121.
WU Bo, TANG Guihe. State of the art of fire resistance study on concrete structures in recent years [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 110–121.
- [4] 公伟, 胡克旭. 自密实混凝土结构抗火研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(3): 1–9.
GONG Wei, HU Kexu. Progress of research on fire resistance of self-compacting concrete structures [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(3): 1–9.
- [5] DAUDEVILLE L, MALÉCOT Y. Concrete structures under impact [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2011, 15(S1): 101–140.
- [6] 宁建国, 周风华, 王志华, 等. 强冲击荷载下钢筋混凝土的本构关系、破坏机理与数值方法 [J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(4): 323–331.
NING Jianguo, ZHOU Fenghua, WANG Zhihua, et al. Constitutive model, failure mechanism and numerical method for reinforced concrete under intensive impact loading [J]. Scientia Sinica: Technologica, 2016, 46(4): 323–331.
- [7] HAO H, HAO Y, LI J, et al. Review of the current practices in blast-resistant analysis and design of concrete structures [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(8): 1193–1223. DOI: 10.1177/1369433216656430.
- [8] 任晓虎, 霍静思, 陈柏生. 高温后钢管混凝土短柱落锤动态冲击试验研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 67–73. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.11.015.
REN Xiaohu, HUO Jing-si, CHEN Baisheng. Dynamic behaviors of concrete-filled steel tubular stub columns after exposure to high temperature [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(11): 67–73. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.11.015.

- [9] 任晓虎, 霍静思, 陈柏生. 火灾下钢管混凝土梁落锤冲击试验研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 110–115.
REN Xiaohu, HUO Jingsi, CHEN Baisheng. Anti-impact behavior of concrete-filled steel tubular beams in fire [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 110–115.
- [10] PAN L, CHEN L, FANG Q, et al. A modified layered-section method for responses of fire-damaged reinforced concrete beams under static and blast loads [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2016, 7(4): 495–517. DOI: 10.1177/2041419616658384.
- [11] ZHAI C, CHEN L, XIANG H, et al. Experimental and numerical investigation into RC beams subjected to blast after exposure to fire [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 97: 29–45. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.06.004.
- [12] 方秦, 赵建魁, 陈力, 等. 爆炸与火荷载联合作用下钢柱变形与破坏的数值分析 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(4): 398–403.
FANG Qin, ZHAO Jiankui, CHEN Li, et al. Numerical simulation of deformation and failure of steel columns subjected to blast and fire [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 14(4): 398–403.
- [13] 赵建魁, 方秦, 陈力, 等. 爆炸与火荷载联合作用下 RC 梁耐火极限的数值分析 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(10): 873–880.
ZHAO Jiankui, FANG Qin, CHEN Li, et al. Numerical analysis of fire resistance of RC beams subjected to explosion and fire load [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015, 48(10): 873–880.
- [14] RUAN Z, CHEN L, FANG Q. Numerical investigation into dynamic responses of RC columns subjected for fire and blast [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 34: 10–21. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.01.009.
- [15] MORITA T, BEPPU M, SUZUKI M. An experimental study on the temperature and structural behavior of a concrete wall exposed to fire after a high-velocity impact by a hard projectile [J]. *Fire Safety Journal*, 2017, 91: 506–516. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.03.023.
- [16] CHOI S, LEE S, KIM J J. Impact or blast induced fire simulation of bi-directional PSC panel considering concrete confinement and spalling effect [J]. *Engineering Structures*, 2017, 149: 113–130. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.12.056.
- [17] 窦国钦, 杜修力, 李亮. 冲击荷载作用下钢纤维混凝土配筋梁性能试验 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(10): 864–872.
DOU Guoqin, DU Xiuli, LI Liang. Experiment on behavior of reinforced concrete beams with steel fiber under impact load [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015, 48(10): 864–872.
- [18] ISO. ISO 834-1 Fire resistance Test on Elements of Building Construction [S]. Switzerland: International Standards Organization, 1999.
- [19] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建筑构件耐火试验方法:GB/T 9978.1-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [20] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土结构技术规程: ECS38: 2004 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [21] 窦国钦, 杜修力, 李亮. 冲击荷载作用下高强度钢筋混凝土梁性能试验 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(12): 1072–1080.
DOU Guoqin, DU Xiuli, LI Liang. Experimental study on the behavior of high strength reinforced concrete beams under impact load [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2014, 47(12): 1072–1080.
- [22] JIN L, ZHANG R, DOU G, et al. Experimental and numerical study of reinforced concrete beams with steel fibers subjected to impact loading [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2018, 27(7): 1058–1083. DOI: 10.1177/1056789517721616.
- [23] LIAO W, LI M, ZHANG W, et al. Experimental studies and numerical simulation of behavior of RC beams retrofitted with HSSWM-HPM under impact loading [J]. *Engineering Structures*, 2017, 149: 131–146. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.07.040.
- [24] 金浏, 徐建东, 张仁波, 等. 钢筋混凝土梁抗冲击性能研究的细观数值模拟方法 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 57–65.
JIN Liu, XU Jiandong, ZHANG Renbo, et al. A mesoscale numerical method for the simulation of the impact resistance performance of reinforced concrete beams [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 57–65.
- [25] LUBLINER J, OLLIVIER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1989, 25(3): 299–326. DOI: 10.1016/0020-7683(89)90050-4.
- [26] LEE J, FENVES G. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892–900. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892).
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢纤维混凝土: JG/T 472-2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

- [28] XIAO S. Numerical study of dynamic behaviour of RC beams under cyclic loading with different loading rates [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2015, 67(7): 325–334. DOI: 10.1680/mac.14.00239.
- [29] CEB-FIP. Fib bulletin 55 CEB-FIP model code 2010 [S]. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete, 2010.
- [30] 中国工程建设标准化协会. 建筑钢结构防火技术规范: CECS 200: 2006 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [31] European Committee for Standardization. Design of concrete structures - Part 1-2: General rules-structural fire design: EN 1992-1-2: 2004 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [32] ABBAS A A, SYED MOHSIN S M, COTSOVOS D M. A simplified finite element model for assessing steel fibre reinforced concrete structural performance [J]. *Computers and Structures*, 2016, 173: 31–49. DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.05.017.

Mechanical behavior of SFRC beams subjected to both impact and fire loadings

ZHANG Renbo, JIN Liu, DU Xiuli, DOU Guoqin

(*Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

Abstract: To explore the mechanical behavior of SFRC beams subjected to both impact and fire loadings, 4 beams were tested with high-performance drop-weight test system, four point bending test machine and assembled electric furnace. The beams were firstly subjected to impact loadings and then exposed to fire with a constant load. During the test process, the crack patterns of beams were observed while the time histories of mid-span deflections and rebar strain were recorded. Then, the fire resistance of these beams was discussed. Based on the experiment, three-dimensional macroscopic finite element numerical model considering the effects of strain rate and high temperature was established. The impact loading process was simulated firstly; and then taking simulation results as the initial state, SFRC beams subjected to both fire and constant loading were simulated with a sequentially coupled thermal-stress analysis method. Moreover, considering the heterogeneity of concrete's internal structure, a meso-scale simulation was also conducted with the procedures similar to that in macroscopic simulation. Good agreement between both the macro-/meso-scale simulation results and the test results illustrates the rationality and effectiveness of the present numerical analysis methods. The advantages of mesoscopic model were indicated through the comparison of macro-/meso-scopic results. It has been found that when the impact energy is low, the local concrete is cracked but a small overall deformation is remained. Nevertheless, this degrades the fire resistance of SFRC beams to some extent. When the steel fiber dosage increases, resulting in an increasing shear strength of concrete matrix, the coexistence phenomenon of bending and shear cracks of beams under the impact load is changed to bending cracks as a dominant. Moreover, when subjected to elevated temperatures with a constant load, the distribution of cracks on the impact-damaged SFRC beams is relatively concentrated and a brittle failure occurs.

Keywords: steel-fiber reinforced concrete beam; impact loading; fire; mid-span displacement; finite element simulation

(责任编辑 王小飞)