高温下钢筋混凝土梁抗冲击性能的细观数值分析

金浏¹, 张仁波¹, 徐建东², 兰钰昌¹, 杜修力^{1*}

1. 北京工业大学城市减灾与防灾防护教育部重点实验室, 北京 100124;

2. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司天津分公司, 天津 300458

* E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn

收稿日期: 2017-03-14; 接受日期: 2018-03-07; 网络版发表日期: 2018-05-24

国家重点研发计划(编号: 2016YFC0701100)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB058000)资助项目

摘要 结合混凝土细观结构特征, 考虑高温下钢筋和混凝土细观组分力学性能退化行为及材料的应变率效应, 建立了钢筋混凝土梁细观数值分析模型, 研究了高温经历时间和落锤冲击能量对钢筋混凝土梁抗冲击性能的影响. 主要分析了高温下钢筋混凝土梁在冲击荷载作用下的破坏过程、冲击力时程、支座反力时程和跨中位移反应. 研究表明: 细观数值模型由于考虑了细观组分的非均质性, 获得了较为合理的温度场分布; 随着加热时间的增加, 混凝土梁在冲击荷载作用下破坏更加严重, 冲击力持续时间和跨中最大位移增大, 但是冲击力峰值减小; 随着冲击能量的增大, 钢筋混凝土梁的剪切破坏更加严重, 冲击力峰值增大, 跨中最大位移随冲击能量增大而线性增加.

关键词 钢筋混凝土梁, 三维细观数值模型, 高温, 率效应, 抗冲击性能

1 引言

火灾通常伴随偶然性爆炸同时发生, 从而对建筑结构造成更严重的破坏. 如: 天津港“8.21”爆炸事故, 由于易燃品起火引起相邻危险化学品发生爆炸, 对建筑结构和人类生命财产造成巨大威胁.

在火灾中, 结构受弯构件(如梁或板)位于房间上部, 温度最高, 通常受损最为严重. 任晓虎等人^[1]采用落锤冲击试验机 and 高温试验炉, 考察了受火时间、冲击能量对常温和火灾下钢管混凝土梁抗冲击性能的影响. Chen等人^[2]通过分离式霍普金森压杆试验研究了高温和冲击联合作用下普通混凝土材料的动态抗压强

度, 发现高温时混凝土也具有明显的应变率效应, 并提出了混凝土高温时抗压强度和割线模量的动态放大系数的经验公式. 基于试验的研究成果, 部分学者也在数值模拟方面开展了一系列的工作. Ruan等人^[3]应用试验验证后的考虑高温和应变率效应的混凝土模型, 研究了钢筋混凝土柱在不同火灾场景下的静态承载力和爆炸荷载作用下的动态响应. Zhai等人^[4]模拟了混凝土梁在火灾与爆炸联合荷载作用下的动力响应.

各国学者已针对爆炸和火灾对结构的影响方面分别进行了大量的研究, 但由于爆炸荷载和火灾高温作用对结构的损伤机理完全不同, 因此两者联合作用对结构构件行为影响的研究少见.

引用格式: 金浏, 张仁波, 徐建东, 等. 高温下钢筋混凝土梁抗冲击性能的细观数值分析. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 651–661

Jin L, Zhang R B, Xu J D, et al. Mesoscale simulations of the impact resistance performance of rein-forced concrete beams exposed to high temperature (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 651–661, doi: 10.1360/N092017-00075

实际上, 高温与爆炸或冲击联合作用方面一般分3种研究方向: 火灾(高温)时混凝土抗冲击性能研究^[1,5]; 火灾(高温)冷却后混凝土抗冲击性能研究^[4,6-8]; 混凝土冲击作用后在火灾(高温)作用下破坏研究^[9,10]。火灾(高温)环境下往往引发易燃易爆危险品的爆炸, 对结构产生冲击破坏, 本文旨在讨论火灾(高温)下钢筋混凝土构件的抗冲击性能。

混凝土破坏行为与其细观结构密切相关, 混凝土是由砂浆及其内部随机分布的骨料、初始缺陷等组成的非均质复合材料, 其内部组成的非均质性, 导致了混凝土力学性质特别是强度的随机性和离散性。这种随机离散性将影响混凝土中在高温时的热传导过程和冲击荷载作用时的裂缝扩展路径和结构的破坏强度。

针对上述问题, 本研究在前期开展的钢筋混凝土梁抗冲击性能细观数值研究^[11]的基础上, 进一步对经历不同时间高温时的钢筋混凝土梁进行了落锤冲击试验, 并对钢筋混凝土梁的抗冲击性能进行了对比分析, 为灾后结构构件损伤评估与安全加固提供理论支持。

2 钢筋混凝土梁细观数值分析模型

以Fujikake等人^[12]开展的试验为模拟对象, 来研究高温作用对钢筋混凝土梁抗冲击性能的影响规律与机制。Fujikake等人^[12]采用落锤冲击装置研究钢筋混凝土梁的抗冲击性能。试验梁截面尺寸及配筋情况如图1所示, 梁体受拉侧和受压侧配2根直径为16 mm的带肋钢筋, 单侧配筋截面积为397 mm², 屈服强度为426 MPa; 箍筋直径为10 mm, 间距为75 mm, 屈服强度为295 MPa; 混凝土单轴抗压强度为42.0 MPa。

混凝土力学性能及破坏行为与其微/细观结构密切相关。在细观层次上, 常将混凝土看作由骨料颗粒、砂浆基质以及两者之间的界面过渡区(ITZ)组成的三相非均质复合材料^[13-15]。参考文献^[16]的工作, 骨料颗粒假定为球形, 体积分数为30%, 最小等效粒径为10 mm, 最大等效粒径为30 mm。采用经典的“取-放”

图1 (网络版彩图)试件截面尺寸及配筋(单位: mm)

法^[17]将骨料颗粒投放在砂浆基质中, 并将骨料周围的薄层设定为界面过渡区, 生成混凝土三维细观数值模型。将有限元网格投影到该骨料结构上, 然后根据各相组分在网格中的位置判定单元类型(如: 骨料单元、砂浆基质单元及界面单元), 并依单元类型赋予相应的材料特性。在此基础上, 插入钢筋笼, 生成如图2所示的三维细观钢筋混凝土梁数值模型。

对于混凝土细观组分, 采用六面体单元来进行划分网格, 单元网格尺寸为5 mm, 混凝土梁共划分约50万个实体单元(8节点线性减缩积分单元); 钢筋采用梁单元划分网格, 划分约3600个单元。力学分析中总自由度约为175万。这里需要说明的是, 界面过渡区的实际厚度约为20~50 μm^[15,17], 但考虑到计算量的限制, 采用该界面厚度来进行数值计算是不可行的。下文数值模拟中, 单元网格尺寸及界面相的尺寸设定为5 mm。关于界面厚度取值的合理性, 已在文献^[11]中进行了论证, 这里不再赘述。

3 钢筋混凝土梁热传导分析

3.1 材料热工参数

当沿矩形梁长度方向施加温度荷载时, 瞬态传热分析相当于在矩形横截面的二维问题, 热传导方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] \quad (1)$$

其中, T 为温度(℃), k 为导热系数, c 为比热容, ρ 为密度, x 和 y 为空间坐标, t 为时间。传热分析中, 单元类型为8节点线性热传导单元。

因混凝土构件截面钢筋含量较少, 且被混凝土包

图2 (网络版彩图)钢筋混凝土梁细观力学分析模型

裹, 故其温度场分析计算时, 暂且不考虑钢筋的影响, 即钢筋的温度由包裹钢筋的混凝土温度决定. 混凝土的配合比、水分含量以及骨料类型等几种因素影响着混凝土材料的热工系数, 主要包括导热系数、比热容、质量密度等^[18,19], 且多以温度相关的表达式来表示导热系数和比热容, 即认为对特定组分的混凝土, 导热系数和比热容只与温度有关.

在查阅文献^[20-22]及部分参数假定的基础上, 采用的混凝土各组分的导热系数、比热容和密度见表1.

3.2 边界/荷载条件

建筑结构遭受火灾时, 经常发生梁三面受火的情况, 且三面受火对简支梁的挠度反应最为不利^[23], 因此本文对钢筋混凝土梁采用三面受火分析. 在钢筋混凝土梁三面施加温度荷载, 采用ISO834标准温升曲线^[4], 曲线公式为 $T=T_0+345\lg(8t+1)$, 其中 $T_0(^{\circ}\text{C})$ 初始环境温度, $T(^{\circ}\text{C})$ 为 $t(\text{min})$ 时刻的温度幅值, 升温曲线见图3, 温度施加边界如图4.

3.3 高温结果分析

图5可见钢筋混凝土梁在三面高温时每隔15 min

表1 细观组分热工参数^{a)}

组分	导热系数 k (W/(m K))	比热容 c (J/(kg K))	密度 ρ (kg/m ³)
骨料	3.15 [*]	880 ^{**}	2750
界面	0.7	1000	2450
砂浆	1.9 [*]	1175 ⁺	2750

a) 其中“*”取自文献^[20], “**”取自文献^[21], “+”取自文献^[22]

图3 (网络版彩图)ISO834标准温升曲线

图4 (网络版彩图)对混凝土梁边界施加高温(单位: mm)

图5 (网络版彩图)不同时刻梁横截面的温度场分布. (a) 宏观数值模拟; (b) 细观数值模拟

的不同时刻横截面的温度场分布. 总体来讲, 温度场的等值分布呈一个“U”形, 在某一个时刻混凝土梁的温度由外到内逐渐降低, 并且随着升温时间的增加混凝土梁的温度逐渐升高, 靠近加热边界处的升温更加明显, 在加热时间为60 min时, 混凝土梁下侧受拉钢筋处的温度达到了700 $^{\circ}\text{C}$.

通过对比图5(a)宏观模拟结果和图5(b)细观模拟结果可以看出, 虽然混凝土梁的温度荷载对称分布, 但是由于考虑了混凝土的非均质性以及骨料的随机分布, 故不同时刻横截面的温度场分布是不对称和不均匀的.

图6为不同时刻混凝土梁纵截面(距梁侧表面40 mm处)温度场分布, 在纵截面上温度场也是非均匀分布的, 同时温度梯度随着升温时间的增加逐渐向梁顶面扩散.

4 高温下钢筋混凝土梁抗冲击行为

4.1 高温下考虑应变率效应的钢筋力学性能

高温时钢筋力学性能见图7, 本文采用文献^[24]建议的公式来表征钢筋在高温下力学性能(主要是屈服

图6 (网络版彩图)不同时刻纵截面的温度场分布

图7 (网络版彩图)高温时钢筋力学性能退化规律

强度和弹性模量)的退化.

$$f_{yT}/f_y = (100.19 - 0.0159T) \times 10^{-2}, \quad (2)$$

$$20^\circ\text{C} < T < 600^\circ\text{C},$$

$$f_{yT}/f_y = (121.4 - 0.0512T) \times 10^{-2}, \quad (3)$$

$$600^\circ\text{C} \leq T \leq 900^\circ\text{C},$$

$$E_{sT}/E_s = (100.5 - 0.0265T) \times 10^{-2}, \quad (4)$$

$$20^\circ\text{C} \leq T \leq 900^\circ\text{C},$$

式中, f_{yT} , E_{sT} 为高温后钢筋屈服强度、弹性模量; f_y , E_s 为钢筋在常温下的屈服强度、弹性模量.

这里, 钢筋采用图8所示的双线性模型, 其中高温

图8 钢筋的双线性模型

时屈服应变 $\epsilon_{yT} = f_{yT}/E_{sT}$, 强化模量 $\mu = 0.01$ [25]. “o-a”段表示钢筋弹性阶段, “o-b”表示钢筋的强化阶段, “o-a”段表示钢筋高温退化后弹性阶段, “o-b”表示钢筋高温退化后的强化阶段. 钢筋在动态加载下存在应变率效应, 并且纵筋会显著影响构件的抗弯刚度, 因而将影响构件在冲击荷载作用下的位移响应 [26,27].

从图7可知, 由于模拟工况情况下钢筋弹性模量和屈服强度的退化小于10%, 这里参考文献 [3,26], 钢筋(纵筋和箍筋)应变率效应采用Cowper-Symonds模型来描述, 钢筋屈服应力 σ_y 为

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \left(\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{\text{eff}} \right), \quad (5)$$

式中, σ_0 为初始屈服应力; ϵ_{eff} 为等效塑性应变; E_p 为塑性硬化模量; β 为硬化参数; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; C , P 为常数, 这里取 $C = 40 \text{ s}^{-1}$, $P = 5$ [11].

塑性硬化模量 E_p 为

$$E_p = EE_t / (E - E_t), \quad (6)$$

式中, E 为初始弹性模量; E_t 为塑性切线模量.

4.2 高温下细观组分应变率效应

试验研究 [28-30] 表明混凝土高温下的弹性模量、抗压和抗拉强度均随温度升高而显著下降, 并且混凝土高温后强度受混凝土强度等级、骨料类型、配合比和升温速度的影响, 并且高温下混凝土的应力-应变曲线形状与常温下基本一致 [31]. 由于混凝土砂浆和界面材料在高温下的应变率性能试验研究存在不足, 没有可

以直接应用的力学性能计算公式, 因此, 本文暂假定高温下混凝土砂浆和界面的力学性能退化规律与混凝土材料相同. 混凝土力学性能退化采用式(7)~(9)表征, 具体如下.

高温下混凝土的抗压强度^[29]为

$$\frac{f_{cT}}{f_c} = \frac{1}{1 + 24 \times (T - 20)^6 \times 10^{-17}}. \quad (7)$$

高温下混凝土的抗拉强度^[28]为

$$\frac{f_{tT}}{f_t} = 1 - 0.001T. \quad (8)$$

欧洲规范^[32]给出混凝土的弹性模量随温度变化的表达式为

$$\frac{E_{cT}}{E_c} = (1.084 - 1.384 \times 10^{-3}T), \quad (9)$$

式中, f_{cT} , f_{tT} , E_{cT} 为高温下混凝土的抗压强度、抗拉强度、弹性模量; f_c , f_t , E_c 为混凝土在常温下的抗压强度、抗拉强度、弹性模量. 高温下混凝土力学性能退化规律如图9所示.

在常温下, 研究^[16,33]认为骨料强度较高, 在冲击过程中一般不会发生破坏, 骨料可认为是弹性体. 研究^[34]表明: 高温时, 岩石的峰值应力、弹性模量均有不同幅度的降低; 经历的温度越高, 降低的幅度越大; 岩石的弹性模量与应变率之间没有明确的关系^[35]. 文献^[36,37]研究表明, 即使高温后骨料的静力强度有所降低, 但依然比混凝土抗压强度高. 因此, 本文只考虑骨

料弹性模量的降低对构件动力响应的影响, 为便于计算, 将高温后骨料弹性模量的降低简化成线性关系, 认为在800℃时弹性模量为常温下的50%^[36].

关于高温后混凝土材料的应变率效应还没有普遍的认识, 因此本文参考文献^[4]的工作, 仅考虑材料强度的放大行为, 即细观组分的应变率效应用其强度的增大系数DIF(即动态强度/静态强度)来表示, 认为混凝土在高温下的应变率效应与常温下一致. 采用CEB规范^[38]中给出的公式来表征混凝土抗压强度的放大效应(CDIF). 由于骨料在高温后强度依然高于混凝土材料强度, 所以对骨料的应变率效应不予考虑.

4.3 细观组分本构模型与材料参数

Grote等人^[39]试验研究表明砂浆力学性能与混凝土类似, 因此可以采用塑性损伤模型^[40,41]来描述其力学行为. 过渡区界面本质上是一层孔隙率较高的砂浆, 故其力学行为亦可以用该本构模型来表征^[42].

该混凝土损伤模型的核心是假定混凝土的破坏形式是拉伸和压缩破坏, 由各向同性的损伤变量来表征混凝土的拉伸断裂和压缩破坏导致的刚度退化, 其可表达为

$$\sigma = (1 - d)D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) = D^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}), \quad (10)$$

式中, d 代表刚度退化变量, 其值介于0~1之间, 其中0表示无任何损伤, 1则表示完全失效. 而弹性刚度的退化是由与失效机制(压碎和开裂)密切相关的损伤造成的; D_0^{el} 代表初始无损伤状态的材料各向同性线弹性刚度; ε^{pl} 代表塑性应变张量; D^{el} 代表材料损伤为 d 时的刚度.

该本构模型不仅能够表征混凝土在外荷载作用下的塑性永久变形, 而且能够描述混凝土由于损伤累积而导致的刚度退化及达到强度后的材料软化力学行为, 得到了广泛运用, 如文献^[17,33,43].

混凝土及其细观组分的力学参数如表2所示, 表2中各参数具体物理意义详见文献^[17,42]. 文献^[11]采用表2的材料参数进行了钢筋混凝土梁在常温下抗冲击性能的数值模拟研究, 获得了与试验结果比较吻合的分析结果.

4.4 钢筋/混凝土相互作用

由于钢筋与混凝土相互作用力学行为的高度复杂性, 目前尚未得到统一的理论与力学模型, 且在火灾和

图9 (网络版彩图)高温时混凝土力学性能的退化

表 2 混凝土细观组分及钢筋力学参数^{a)}

力学参数	骨料	砂浆 基质	界面 过渡区	混凝土	纵筋	箍筋
抗压强度 (MPa)	—	40*	32.5^	42*	—	—
抗拉强度 (MPa)	—	4.0*	3.25^	4.2*	—	—
弹性模量 (GPa)	70*	30*	25^	35*	210*	210*
泊松比	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3*	0.3*
屈服强度 (MPa)	—	—	—	—	426*	295*
截面面积 (mm ²)	—	—	—	—	198.5	78.5

a) “*”数据为实测值, “^”为反复试算选值, 其他力学数据为默认值

冲击荷载作用下, 钢筋/混凝土间界面的力学行为(黏结及滑移等非线性)将变得尤为复杂(即: 存在温度效应和应变率效应)。鉴于此, 为简化钢筋与混凝土相互作用力学行为以及提高模型的计算效率, 本文暂假定钢筋与混凝土黏结完好, 两者界面间不产生分离及滑移等非线性行为, 将钢筋“嵌入”混凝土中。该处理方法同文献[44~46]。

4.5 边界/荷载条件

数值模拟中, 试验梁被“绑定”在底座上, 即两者间为理想黏结, 如图2所示。

因冲头以外部分不影响接触碰撞, 将落锤形状简化为直径90 mm的半球形, 如图2所示, 落锤质量为400 kg, 材料为钢材。落锤冲头和梁体之间采用面-面接触(即“互不侵入”条件)。数值模拟时选取加热时间分别为0, 15, 30和45 min条件下温度场分布。此外, 数值模拟时为了节省计算时间, 基于能量守恒定律确定4种工况下落锤自由落体撞击钢筋混凝土梁时的初速度($v = \sqrt{2gH}$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$), 分别为1.715, 2.425, 3.429及4.85 m/s。

4.6 高温下钢筋混凝土梁抗冲击模拟结果

图10给出了工况($h=1.2 \text{ m}$, $t=45 \text{ min}$)下, 试件在冲击荷载作用下的加速度、速度和最大主应变变化过程。可以看出: 加速度从接触点逐渐向支座两端传递; 冲击初期, 速度分布呈现“条带状”, 之后由于梁体运动, 使速度分布逐渐趋向均匀; 冲击过程中的材料变形也主要集中在跨中区域, 并且最先产生的是垂直于梁长度方向的弯曲裂缝, 之后产生大面积的剪切变形,

梁呈现剪切破坏特征。

4.6.1 破坏模式

图11为各工况下梁体的破坏情况。在落锤高度 $h=0.15 \text{ m}$, 加热时间 $t=0 \text{ min}$ 时, 由于冲击速度较小, 梁体只在跨中区域出现了多条由梁底部往上开展的竖向裂缝。同样落锤高度, 即 $h=0.15 \text{ m}$, 但加热时间 $t=45 \text{ min}$ 时, 剪切裂缝逐渐开展, 梁体呈现剪切破坏特征。当 $h=0.30 \text{ m}$, $t=0 \text{ min}$ 时, 混凝土梁体出现明显的剪切裂缝, 并且随着加热时间的延长剪切裂缝逐渐连通, 最后多条细裂缝演变成一条主要斜裂缝。当 $h=0.60 \text{ m}$, $t=0 \text{ min}$ 时, 梁体冲击区域混凝土局部压碎, 当加热时间延长, 钢筋保护层处混凝土产生明显局部破坏; 当 $h=1.20 \text{ m}$, $t=0 \text{ min}$ 时, 由于混凝土梁已经明显破坏, 高温加热只是略微增加了跨中区域的破坏面积, 并没有明显改变混凝土梁的破坏特征。

图12为各工况模拟后混凝土梁内部的拉损伤情况。试件剖面区域由于更靠近冲击部位, 以及混凝土界面薄弱层的存在, 因此该区域破坏要比梁体表面严重。通过图12可以直观地观察混凝土和钢筋连接处的局部破坏。

4.6.2 冲击力

图13给出了各试件冲击力时程曲线的对比。在相同的冲击速度下, 随着试件加热时间的增加, 冲击力峰值略微降低, 降低幅度不是特别明显。在相同的冲击速度下, 随着构件受火时间的延长, 构件的刚度和强度降低, 冲击力作用的时间明显延长, 这是由于钢材和混凝土材性随温度的升高明显劣化。在相同的受

图 10 (网络版彩图)混凝土梁冲击荷载动力响应($h=1.2$ m, $t=45$ min). (a) 冲击荷载作用下加速度响应; (b) 冲击荷载作用下速度响应; (c) 冲击荷载作用下最大主应变

图 11 (网络版彩图)冲击后表面裂缝分布. (a) $h=0.15$ m; (b) $h=0.30$ m; (c) $h=0.60$ m; (d) $h=1.20$ m

火时间下, 随着冲击速度的增大, 冲击力峰值明显增大.

4.6.3 支座反力

图14给出了支座反力时程曲线, 其中支座反力为两端支座的反力之和. 在冲击开始瞬间, 各试件的支座反力出现瞬时向下的较小的负值, 当支座力达到负向峰值后, 即反向迅速增大到正向峰值, 随后支座反力的时程曲线表现出波动现象. 支座反力时程曲线表现出与冲击力时程曲线相似的变化趋势, 即在相同的

冲击速度下, 随着试件受火时间的延长, 支座反力峰值略微降低, 但是降低幅度不是特别明显. 在相同的冲击速度下, 支座反力作用的时间明显延长. 在相同的受火时间下, 随着冲击速度的增大, 支座反力峰值明显增大.

4.6.4 跨中位移

图15给出了在冲击荷载作用下钢筋混凝土梁跨中位移时程曲线. 可以看出, 在相同的冲击速度下, 随着试件加热时间增加, 混凝土材料性能随温度的升高明

图 12 (网络版彩图)试件内部损伤分布. (a) $h=0.15$ m; (b) $h=0.30$ m; (c) $h=0.60$ m; (d) $h=1.20$ m

图 13 (网络版彩图)受火时间对冲击力时程曲线的影响. (a) $h=0.15$ m; (b) $h=0.30$ m; (c) $h=0.60$ m; (d) $h=1.20$ m

显劣化,使梁的跨中变形更加明显,结构的破坏更加严重.当 $h=1.2$ m时,随着加热时间的延长,跨中位移增加更加明显,并且当加热45 min时,跨中位移下降段最平缓.

为了更明显地对比高温后梁的跨中位移,将高温后试件的跨中最大位移和残余位移绘成图16.通过对比可以发现,在常温时,混凝土梁跨中最大位移随落锤高度增加而线性增加,但是加热后,跨中最大位移随落锤下落高度而线性增加的斜率会明显改变.当高温时间为15和30 min时,跨中最大位移近似随落锤下落高度增加而线性增加,但是当加热时间为45 min时,跨中最大位移在落锤下落高度为1.2 m时发生明显改变增加.通过对比梁的残余位移也能发现,在高温以后,混凝土梁的残余位移随落锤高度增加的斜率也随加热时间的延长而增大.实际上,在加热时间为45 min,由于钢筋

和混凝土材料性能的严重退化,该混凝土梁的抗冲击性能发生明显的退化,在落锤下落高度为1.2 m时已经严重破坏,不能继续承受更大的冲击能量.

5 结论

本文以钢筋混凝土梁为研究对象,建立了钢筋混凝土梁细观尺度数值分析模型,研究了高温时间和落锤冲击能量对钢筋混凝土梁抗冲击性能的影响.通过对高温后钢筋混凝土梁冲击试验的数值模拟研究,可得到如下结论.

(1) 建立的细观尺度数值分析模型能够有效模拟混凝土在高温下的热传导行为,由于考虑了混凝土各个组分在高温下不同的导热参数,能够获得比宏观模型更加合理的温度分布.

图 14 (网络版彩图)受火时间对支座反力时程曲线的影响. (a) $h=0.15$ m; (b) $h=0.30$ m; (c) $h=0.60$ m; (d) $h=1.20$ m

图 15 (网络版彩图)受火时间对跨中位移时程曲线的影响. (a) $h=0.15$ m; (b) $h=0.30$ m; (c) $h=0.60$ m; (d) $h=1.20$ m

图 16 不同时间高温下梁跨中位移与落锤高度 h 关系. (a) 最大跨中位移; (d) 残余跨中位移

(2) 相同的冲击能量下, 随着加热时间的增加, 钢筋混凝土梁在冲击荷载作用下产生更多的破坏裂缝, 并且在混凝土内部靠近落锤的接触部位混凝土破坏更加严重.

(3) 相同的冲击能量下, 随着加热时间的增加, 冲击力和支座反力峰值随着加热时间的增加而略微减小, 但是冲击力和支座反力持续时间增加的比较明显, 跨中位移也随加热时间的增加而增加.

需要说明的是, 针对高温后动态加载下钢筋/混凝土相互作用问题, 本文暂未考虑钢筋与混凝土之间黏结、滑移与分离等非线性力学行为。这种简单粗糙的

处理方法, 势必将会对高温后钢筋混凝土梁抗冲击行为产生影响。因此, 后续的研究工作中将继续完善本文的数值分析模型与方法。

参考文献

- 1 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. *振动与冲击*, 2012, 31: 110–115
- 2 Chen L, Fang Q, Jiang X, et al. Combined effects of high temperature and high strain rate on normal weight concrete. *Int J Impact Eng*, 2015, 86: 40–56
- 3 Ruan Z, Chen L, Fang Q. Numerical investigation into dynamic responses of RC columns subjected for fire and blast. *J Loss Prevent Proc*, 2015, 34: 10–21
- 4 Zhai C, Chen L, Xiang H, et al. Experimental and numerical investigation into RC beams subjected to blast after exposure to fire. *Int J Impact Eng*, 2016, 97: 29–45
- 5 霍静思, 任晓虎, 肖岩. 标准火灾作用下钢管混凝土短柱落锤动态冲击试验研究. *土木工程学报*, 2012, 45: 9–20
- 6 杨少伟, 刘丽美, 王勇威, 等. 高温后钢纤维活性粉末混凝土SHPB试验研究. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42: 25–29
- 7 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. *振动与冲击*, 2011, 30: 67–73, 84
- 8 霍静思, 何远明, 肖莉平, 等. 高温后钢管混凝土抗多次冲击力学性能试验研究. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2012, 39: 6–10, 86
- 9 胡开赢. 冲击受损后钢筋混凝土梁的耐火性能试验研究. 硕士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2016
- 10 窦国钦, 杜修力, 李亮. 冲击荷载作用下高强钢筋混凝土梁性能试验. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2014, 47: 1072–1080
- 11 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. *振动与冲击*, 2018, 37: 57–65
- 12 Fujikake K, Li B, Soeun S. Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation. *J Struct Eng*, 2009, 135: 938–950
- 13 Huang Y J, Yang Z J, Chen X W, et al. Monte Carlo simulations of meso-scale dynamic compressive behavior of concrete based on X-ray computed tomography images. *Int J Impact Eng*, 2016, 97: 102–115
- 14 Yan P, Zhang J, Fang Q, et al. 3D numerical modelling of solid particles with randomness in shape considering convexity and concavity. *Powder Tech*, 2016, 301: 131–140
- 15 金浏, 杜修力. 钢筋混凝土构件细观数值模拟分析. *水利学报*, 2012, 43: 1230–1236, 1242
- 16 Zhou X Q, Hao H. Mesoscale modelling of concrete tensile failure mechanism at high strain rates. *Comput Struct*, 2008, 86: 2013–2026
- 17 杜修力, 韩亚强, 金浏, 等. 骨料空间分布对混凝土压缩强度及软化曲线影响统计分析. *水利学报*, 2015, 46: 631–639
- 18 漆雅庆. 火灾下钢筋混凝土构件的非线性有限元分析研究. 硕士学位论文. 广州: 华南理工大学, 2011
- 19 顾敏峰. 高温下钢筋混凝土柱温度场模拟及力学性能研究. 硕士学位论文. 西安: 长安大学, 2012
- 20 Khan M I. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models. *Building Environ*, 2002, 37: 607–614
- 21 Waples D W, Waples J S. A review and evaluation of specific heat capacities of rocks, minerals, and subsurface fluids. Part 1: Minerals and nonporous rocks. *Nat Resour Res*, 2004, 13: 97–122
- 22 Zhao J, Zheng J, Peng G, et al. A meso-level investigation into the explosive spalling mechanism of high-performance concrete under fire exposure. *Cement Concrete Res*, 2014, 65: 64–75
- 23 陆洲导, 朱伯龙, 周跃华. 钢筋混凝土简支梁对火灾反应的试验研究. *土木工程学报*, 1993, 26: 47–54
- 24 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能. 北京: 科学出版社, 2003
- 25 曾翔. 冲击和快速加载作用下钢筋混凝土梁柱构件性能试验与数值模拟研究. 博士学位论文. 长沙: 湖南大学, 2014
- 26 田力, 朱聪, 王浩, 等. 碰撞冲击荷载作用下钢筋混凝土柱的动态响应及破坏模式. *工程力学*, 2013, 30: 150–155
- 27 李敏, 李宏男. 建筑钢筋动态试验及本构模型. *土木工程学报*, 2010, 43: 70–75
- 28 李凌志. 火灾后混凝土材料力学性能与温度、时间的关系. 硕士学位论文. 上海: 同济大学, 2006
- 29 过镇海, 李卫. 混凝土在不同应力-温度途径下的变形试验和本构关系. *土木工程学报*, 1993, 26: 58–69
- 30 李卫, 过镇海. 高温下砼的强度和变形性能试验研究. *建筑结构学报*, 1993, 14: 8–16
- 31 吴波, 马忠诚, 欧进萍. 高温后混凝土变形特性及本构关系的试验研究. *建筑结构学报*, 1999, 20: 42–49
- 32 Commission of the European Communities. Eurocode No. 2, Design of Concrete Structures. 1990

- 33 Du X, Jin L, Ma G. Numerical simulation of dynamic tensile-failure of concrete at meso-scale. *Int J Impact Eng*, 2014, 66: 5–17
- 34 朱合华, 闫治国, 邓涛, 等. 3种岩石高温后力学性质的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25: 1945–1950
- 35 卢志堂, 王志亮. 温度与冲击荷载耦合下花岗岩动力性质. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48: 143–149
- 36 邱一平, 林卓英. 花岗岩样品高温后损伤的试验研究. *岩土力学*, 2006, 27: 1005–1010
- 37 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性质初步研究. *岩土工程学报*, 2000, 22: 332–335
- 38 Comité Euro-International Du Béton. CEB-FIP Model Code 1990. Trowbridge, Wiltshire, UK: Redwood Books, 1993
- 39 Grote D L, Park S W, Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization. *Int J Impact Eng*, 2001, 25: 869–886
- 40 Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete. *Int J Solids Struct*, 1989, 25: 299–326
- 41 Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *J Eng Mech*, 1998, 124: 892–900
- 42 金浏, 杜修力. 加载速率及其突变对混凝土压缩破坏影响的数值研究. *振动与冲击*, 2014, 33: 187–193
- 43 李冬, 金浏, 杜修力. 钢筋混凝土柱轴心受压性能及尺寸效应的细观数值研究. *水利学报*, 2016, 47: 209–218
- 44 Cotsovos D M, Stathopoulos N D, Zeris C A. Behavior of RC beams subjected to high rates of concentrated loading. *J Struct Eng*, 2008, 134: 1839–1851
- 45 Yan B, Liu F, Song D Y, et al. Numerical study on damage mechanism of RC beams under close-in blast loading. *Eng Failure Anal*, 2015, 51: 9–19
- 46 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. *Eng Struct*, 2017, 149: 131–146

Mesoscale simulations of the impact resistance performance of rein-forced concrete beams exposed to high temperature

JIN Liu¹, ZHANG RenBo¹, XU JianDong², LAN YuChang¹ & DU XiuLi¹

¹The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Tianjin Branch of Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300458, China

Considering the degradation of the mechanical properties of steel and concrete under high temperature and the strain rate effect of the materials, a mesoscopic numerical analysis model of reinforced concrete beam are proposed based on the meso-structure of concrete. The influences of fire duration time and impact energy on the impact resistance behavior of concrete beams in fire are discussed. In this paper, the failure process of reinforced concrete beam subjected to impact load, the impact force time history, the reaction time of support and the displacement response in the middle span are analyzed. The results show that the mesoscopic numerical model can well simulate the heat transfer process of each components of concrete. With the increase of heating time, the concrete beam under the impact load is more serious, meanwhile the duration of the impact force and the maximum displacement of the span increase, but the impact force peak decreases; with the increase of impact energy, the shear failure of concrete beam is more serious, and the impact force peak increases. The maximum displacement increases linearly with the impact energy.

reinforced concrete beam, 3D mesoscopic simulation model, high temperature, strain rate effect, impact resistance behavior

doi: [10.1360/N092017-00075](https://doi.org/10.1360/N092017-00075)