火灾高温后钢筋混凝土短柱轴压性能数值分析

金浏, 李潇雅, 杜修力*, 蒋安桐

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

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

收稿日期: 2019-07-07; 接受日期: 2019-10-09; 网络版发表日期: 2020-04-14

国家重点研发计划(编号: 2016YFC0701100)和国家自然科学基金(批准号: 51822801, 51978022)资助项目

摘要 火灾高温影响钢筋混凝土(RC)结构的承载力和耐久性, 火灾高温作用后钢筋混凝土结构的力学行为引起了国内外学者的广泛关注. 本文考虑钢筋和混凝土材料力学性能在高温后的退化效应, 以及钢筋与混凝土之间的非线性粘结-滑移行为, 建立了火灾高温后RC短柱轴压性能研究的三维数值模型. 在验证了三维数值模型合理性的基础上, 进一步分析了受火方式、受火时间和配箍率对RC短柱轴压力学性能的影响规律, 揭示了RC短柱的破坏模式和失效机制. 结果表明: 考虑钢筋与混凝土间黏结滑移的数值模型, 能更为有效地描述RC短柱在高温后的破坏行为; 随着受火时间和受火面的增加, RC短柱的峰值承载力、轴压刚度及延性系数不断降低; 室温下RC短柱的峰值承载力随配箍率增加而增大, 但随着受火时间增加, 配箍率对峰值承载力的影响逐渐减小.

关键词 RC柱, 火灾高温后, 粘结滑移, 轴压性能, 破坏模式

1 引言

我国发生的建筑火灾每年约有15万起, 全世界范围内发生的建筑火灾每年约有360万起^[1]. 火灾高温除了导致人类生命财产损失, 对工程结构的安全性和耐久性也造成严重损伤. 混凝土是热惰性材料, 在高温作用下, 混凝土结构的力学性能发生不同程度的劣化^[2], 受到外力作用时, 截面内部受力不均, 承载能力降低, 结构发生破坏时无明显变形, 从而产生脆性破坏的特征^[3]. 钢筋混凝土(RC)结构现已广泛应用于建筑及工程结构中, RC柱作为主要的承重构件, 火灾高温作用可能导致其局部甚至整体破坏, 工程结构承载力下降, 对建筑物的使用寿命产生影响. 因此, 深入研究

火灾高温对RC柱力学行为演化和损伤破坏机理具有重要的工程意义, 且对工程结构及建筑灾后寿命周期的预测、损伤评估以及加固设计提供基础.

吴波等人^[4]开展了RC方形柱和异形柱高温下轴压试验, 其结果表明受火面越多, 耐火极限越低, 且异形柱的耐火极限低于方形柱. Abdurraheem和Kadhum^[5]对活性粉末RC柱火灾后的延性和刚度进行了试验研究, 发现火灾后柱子的初始刚度和割线刚度都大幅下降. Wu和Xu^[6]研究了“+”截面轴向约束混凝土柱的轴压性能, 发现“+”截面柱相较于方形柱会产生显著的附加轴力. Martins和Rodrigues^[7]对不同截面尺寸的RC柱进行耐火极限试验, 发现随着截面尺寸的增加, 柱的耐火极限也不断提高. 杨建平等人^[8,9]对相邻两面

引用格式: 金浏, 李潇雅, 杜修力, 等. 火灾高温后钢筋混凝土短柱轴压性能数值分析. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1509–1520

Jin L, Li X Y, Du X L, et al. Numerical analysis of axial compressive behavior of reinforced concrete short columns after exposure to fire (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1509–1520, doi: 10.1360/SST-2019-0240

与三面受高温作用的RC柱进行试验,发现不均匀受火使得破坏模式呈现双向偏心特征。Bikhiet等人^[10]研究了不同强度RC柱在高温后的残余承载力,结果表明残余承载力的降低与混凝土强度的增加呈线性关系,强度每增加5 MPa,残余承载力下降5%。王志伟等人^[11]、Huo等人^[12]对高温后RC短柱进行试验研究,发现随着温度的增加,柱的轴压刚度和延性系数不断下降。数值模拟方面,Kodur等人^[13]对高性能混凝土柱的耐火性能进行数值研究,分析了荷载、截面尺寸、混凝土强度等参数对耐火性能的影响,并提出一种预测高性能混凝土柱耐火性能的方法。Kodur和Raut^[14]对不同受火方式下的RC柱进行数值研究,建立了考虑RC柱双向受弯状态下耐火性能的简化计算公式。

总体来说,已有的大量研究工作促进了对RC柱受火灾高温作用后破坏模式及损伤机理的认识。尽管如此,仍存在众多问题有待深入研究和讨论。如:试验主要针对缩尺模型,不能完全反映实际工程状态下的受力情况和破坏模式,且试验结果具有一定的离散性,只能从宏观上描述破坏现象,不能深入揭示构件的破坏机理;数值模拟方面大部分假定钢筋与混凝土之间黏结完好,未考虑两者之间的黏结-滑移行为,难以反映材料之间的相互作用机制,因此进一步研究RC柱受火灾高温作用的破坏模式和失效机制十分必要。

本文结合三维数值分析模型,考虑钢筋与混凝土材料在高温后的退化效应和两者之间的黏结-滑移行为,着重研究高温冷却后RC柱的轴压性能,分析普通强度RC短柱承载力、轴压刚度及延性的变化,研究受火方式和受火时间对高温后RC短柱轴压性能的影响,对构件的破坏机制以及材料之间的相互作用进行详细分析。

2 钢筋混凝土柱数值分析模型

张家铭等人^[15]对6根设计强度等级为C45的RC短柱进行了不同火灾模式的高温全过程作用后轴压力学性能试验,对柱的破坏过程和力学性能变化进行了详细描述。本文将该试验中室温下RC柱作为参照,构建如图1所示三维数值模型,编号“SN06”。试件尺寸及配筋情况如图2所示。

RC柱尺寸为300 mm×300 mm×900 mm,混凝土采用设计强度等级C45。纵筋和箍筋均采用HRB400级钢筋,配筋率为1.13%,体积配箍率为0.68%,保护层厚度

为20 mm,钢筋力学性能参数见表1。

2.1 钢筋混凝土柱几何模型

本文采用“顺序耦合”分析方法进行高温后RC柱的轴压力学性能研究,模拟过程如下。

(1) 温度场分析:对RC柱进行标准火灾升温传热分析,获得RC柱内部温度。

(2) 力学性能分析:在上步温度场结果的基础上,确定不同材料在高温后的力学性能,模拟轴压试验过程。

进行RC短柱温度场分析时,混凝土采用八节点六面体线性传热单元,钢筋采用双节点线性传热单元。力学性能分析时,钢筋采用梁单元,并且建立的数值模型部件名称和节点编号要与温度场分析时保持一致。本文在保证计算精度的前提下,为减少计算量和计算时

图1 (网络版彩图)RC柱的有限元模型。(a)加载方式;(b)数值模型

Figure 1 (Color online) Numerical model of the RC column. (a) Loading mode; (b) numerical model.

图2 试件几何尺寸及配筋图

Figure 2 Cross-section size and rebar arrangement.

表 1 室温下钢筋力学参数

Table 1 Mechanical parameters of steel bars at room temperature

材料参数	箍筋	纵筋
直径 (mm)	8	18
屈服应力 f_y (MPa)	512	520
极限应力 f_u (MPa)	621	630
弹性模量 E_s (GPa)	200	200

间, 将混凝土网格尺寸设定为10 mm, 钢筋网格尺寸设定为5 mm. 钢筋与混凝土之间的黏结-滑移行为采用文献[16]提出的“钢筋-混凝土黏结单元”来表征, 单元为二节点单元, 长度为0, 在 x , y , z 方向分别具有一个平移自由度和一个转动自由度, 本文为简化计算, 假定相对滑移仅在钢筋与混凝土之间的纵向产生.

2.2 热本构模型和参数

RC柱表面和内部热传导方程^[17,18]:

$$Q = k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h_c(T_f - T_c) + \sigma \varepsilon(T_f - T_c), \quad (1)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q, \quad (2)$$

式中, Q 为从外部传递的热量; k 表示导热系数; T 是温度; Γ 代表传热面; n 是热表面 Γ 的外法线; h_c 和 ε 表示对流系数和辐射系数; T_f 和 T_c 分别代表环境温度和RC柱的表面温度; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ^[19], 是斯特藩-玻尔兹曼常数. 另外, ρ 和 c 分别表示密度和比热容; t 代表时间; q 代表RC柱内部产生的热量; 在传热分析中, $q=0$.

室温下混凝土的热工参数: 导热系数 k 为 $1.95 \text{ W}/(\text{m K})$ 、密度 ρ_c 为 $2400 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、比热容 c 为 $874 \text{ J}/(\text{kg K})$. 混凝土考虑温度对热工参数的影响规律, 采用Eurocode 2^[20]的建议, 分别如图3和4所示, ρ_{ct} 表示不同温度下混凝土的密度.

钢筋的热工参数采用《建筑钢结构防火技术规范》(CECS 200: 2006)^[21]中的建议值, 其密度、导热系数和比热容取值分别为 $7850 \text{ kg}/\text{m}^3$, $45 \text{ W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$ 和 $600 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$.

2.3 本构模型和力学参数

2.3.1 本构关系

混凝土塑性损伤模型最早由Lubliner等人^[22]提出,

图 3 (网络版彩图)混凝土导热系数和比热容随温度的变化
Figure 3 (Color online) Evolution of thermal conductivity and specific heat for concrete with temperature.

图 4 (网络版彩图)混凝土密度随温度退化规律
Figure 4 (Color online) Evolution of density for concrete with temperature.

Lee和Fenves^[23]在此基础上, 进一步考虑混凝土结构的刚度退化和不可逆损伤, 改进后的模型可适用于动态或循环加载. 混凝土在单轴压缩或拉伸状态下的特性曲线如图5(a)所示. 因此, 本文采用耦合材料高温退化效应的混凝土塑性损伤模型来描述RC短柱轴压状态下混凝土的力学行为.

钢筋材料采用二折线弹性-强化模型, 如图5(b)所示. 根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)^[24], 取其规定的黏结滑移本构模型以描述钢筋与混凝土之间的黏结滑移行为, 如图5(c)所示, 具体参数见表2.

2.3.2 温度退化效应

火灾高温持续作用, 会导致混凝土与钢筋材料性

图 5 本构模型. (a) 塑性损伤模型; (b) 钢筋双折线模型; (c) 黏结应力-滑移曲线

Figure 5 Constitutive models. (a) Plasticity damage model; (b) bilinear elasticplastic model for steel rebar; (c) bond stress-slip relationship between concrete and steel rebar.

表 2 室温下黏结滑移本构模型参数

Table 2 Bond-slip constitutive model at room temperature

特征点	黏结应力 τ (N/mm ²)
劈裂点(cr)	$2.5f_{tr}$
峰值点(u)	$3f_{tr}$
残余点(r)	f_{tr}

能退化. 本文采用朱伯龙等人^[25]通过试验建立的高温后混凝土强度退化规律和路春森等人^[26]研究的高温

后混凝土弹性模量的退化模型, 如图6(a)所示, f_{ct} 和 E_{ct} 分别表示不同温度下混凝土的立方体抗压强度和弹性模量. 室温下取混凝土抗压强度 f_c 为45 MPa, 抗拉强度 f_t 为4.5 MPa, 弹性模量 E_c 取32.5 GPa, 泊松比 ν 取0.2. 高温后钢筋强度、弹性模量退化规律分别采用吴波^[27]和沈蓉等人^[28]建立的变化规律, 如图6(b)所示, f_{yt} 和 E_{st} 分别表示不同温度下钢筋的屈服强度和弹性模量.

由于混凝土和钢筋的力学性能随温度变化, 二者之间的黏结强度也表现出相似的变化趋势. Ergün等

图 6 (网络版彩图)高温后力学性能退化规律. (a) 混凝土; (b) 钢筋; (c) 黏结强度

Figure 6 (Color online) Degradation of mechanical performance after high temperature. (a) Concrete; (b) steel bar; (c) bond strength.

人^[29]通过拉拔试验发现高温后钢筋与混凝土之间黏结强度的退化行为, 如图6(c)所示, 其中 τ_{u0} 和 τ_{ut} 分别表示室温下和不同温度时钢筋与混凝土间的峰值黏结强度. 本文采用该退化规律来描述高温后钢筋与混凝土之间的黏结性能.

2.4 荷载和边界条件

工程结构中, 柱子分为角柱、边柱、中柱, 即柱子在遭遇火灾时, 一般可分为沿柱长边方向相邻两面、三面、四面直接受火, 本文在此基础上扩展讨论单面和相对两面受火时的情况, 即研究上述5种情况下RC柱内部温度场的变化. 火灾升温曲线采用ISO 834曲线^[18]. 根据Eurocode 1^[30], 柱表面的热对流系数取为 $25\text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C})$, 热辐射系数取0.85.

高温后的轴压力学性能模拟, 参照实际试验情况, 采用位移加载曲线, 位移增长速度为 $0.4\text{ mm}/\text{min}$. 根据《建筑设计防火规范》(GB 50045-97)^[31]对建筑构件耐火等级分类, 柱的耐火极限为4个等级, 分别为3, 2.5, 2和0.5 h. 本工作选取5种工况在高温1 h后的轴压性能, 以及边柱和中柱在火灾持续时间分别为30, 60, 90, 120, 150和180 min后的轴压性能进行数值研究, 并讨论部分情况下配箍率对轴压承载力的影响, 试件编号及工况见表3所示.

3 数值分析模型验证

本节通过比较常温下数值模拟与物理试验结果, 验证数值方法的有效性.

室温下RC短柱的轴压性能试验破坏模式如图7所示. 数值模拟的破坏模式与物理实验相似, 但考虑钢筋与混凝土之间黏结滑移行为的RC短柱发生剪切破坏, 柱侧面出现一条斜裂缝, 角度约为 60° , 且沿纵筋保护层方向混凝土的破坏更为严重, 更符合实际物理试验得到的破坏结果, 表明RC短柱在轴向荷载作用下, 钢筋与混凝土之间发生不协调的变形. 观察两种情况下钢筋骨架的受力情况, 完好黏结时纵筋承受部分轴向荷载直至达到屈服, 考虑黏结滑移时, 箍筋主要约束混凝土的横向膨胀变形, 部分箍筋达到屈服强度, 纵筋承受的荷载并未达到屈服强度. 因此, 在进行RC短柱轴压性能数值研究时应当考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移行为.

表 3 试件编号及工况说明^{a)}

Table 3 Serial number and description of specimens^{a)}

试件编号	受火时间 (min)	受火面
SN06	0	0
SO26	60	1
SR26	60	2
SA26	60	2
ST26	60	3
SF26	60	4

a) 试件编号中, 第一个字母“S”代表柱, 第二个字母“N, O, R, A, T, F”分别代表室温不受火、单面受火、相对两面受火、相邻两面受火、三面受火和四面受火; 第三个数字“0”代表受火时间为0 min, 数字“2”代表受火时间为60 min, 下文第三个数字1, 3, 4, 5, 6代表受火时间分别为30, 90, 120, 150, 180 min, 四面受火时表达相同; 第四个数字“6”代表体积配箍率为0.68%, 下文第四个数字3和1代表体积配箍率分别为0.38%和1.08%.

图 7 (网络版彩图)室温下RC短柱破坏模式. (a) 试验; (b) 混凝土; (c) 钢筋

Figure 7 (Color online) Failure patterns of RC short column at room temperature. (a) Tests; (b) concrete; (c) steel bar.

轴压试验后的荷载(N_u)-轴向应变(ϵ)关系曲线如图8所示, 其中轴向应变 $\epsilon=\Delta/h$, Δ 表示RC柱的轴向位移, h 表示RC柱的高, 取值为900 mm. 由图8可看出, 弹性阶段, 无论是否考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移, 曲线没有明显变化, 在达到柱子的峰值承载力之后, 压区混凝土被压碎导致承载力迅速下降, 考虑黏结滑移行为的曲线与物理试验结果更为接近. 轴压刚度 EA_t 取荷载(N_u)-轴向应变(ϵ)关系曲线上荷载值为 $0.4N_{ut}$ 点的切线刚度. 考虑黏结滑移和完好黏结情况下的峰值承载力和轴压刚度与试验结果差值分别在3%和15%之内, 结果吻合良好, 具体数值见表4.

综上所述, 建立的数值模型能够真实反映实际工况下RC短柱的轴压力学行为, 因此, 在该基础上可以进一步研究高温后RC短柱的轴压性能以及讨论各因

图 8 (网络版彩图)室温下荷载(N_u)-轴向应变(ε)关系曲线
Figure 8 (Color online) Load (N_u)-axial strain (ε) curve at room temperature.

素对轴压性能的影响,同时,需要在数值模拟中考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移行为。

4 高温后RC短柱的轴压性能分析

按照ISO 834标准火灾曲线对RC短柱进行升温,受火时间180 min,分析其高温冷却后的轴压性能。

4.1 受火方式对轴压性能影响

在上述5种受火方式下,受火时间为60 min时RC短柱截面的温度场如图9所示。混凝土受火面升温速度最快,受火面越多,其截面温度也快速增加。相较于SO26, SR26, ST26和SF26工况, SA26截面内部温度场呈现非轴对称的梯度变化,相邻受火两面相接的柱角温度最高,未受火两面相接的柱角基本是常温。

不同受火方式下受火60 min高温冷却后的RC短柱轴压破坏模式如图10(a)所示。其破坏形式与常温下相似,基本呈剪切破坏且沿纵筋方向的混凝土保护层由于不协调变形发生破坏。受火面混凝土的损伤程度

表 4 室温下数值模拟结果

Table 4 Numerical simulation results at room temperature

试件编号	峰值承载力 N_{ut} (kN)	N_{ut}/N_u	轴压刚度 EA_t ($\times 10^3$ kN)	EA_t/EA
SN06	3490	1	3084	1
完好黏结	3597	1.03	2722	0.88
滑移	3561	1.02	2667	0.86

图 9 (网络版彩图)不同受火方式下柱截面温度
Figure 9 (Color online) Cross-section temperature of columns at different fire modes.

相较于不受火面更为严重,并且随着受火面的增加,混凝土的损伤越来越严重,这与吴波等人^[4]对不同受火方式下的RC柱试验结果基本相似。上述现象产生的原因是高温后混凝土强度大幅退化,相较于未直接受到高温作用的混凝土,其承受轴向荷载的能力迅速下降;高温后钢筋与混凝土之间的黏结强度也迅速下降,导致两者之间的不协调变形增大,所以沿纵筋保护层方向的混凝土破坏更加严重;且受火面增加,柱截面内部温度梯度变化更大,承受轴向荷载时,内部发生较大的内力重分布,进一步导致破坏加重。内部钢筋骨架的破坏模式如图10(b)所示,其破坏趋势与混凝土恰好相反,由于高温后外部混凝土被压碎使承载力迅速下降,纵筋和箍筋承受轴向荷载的作用来不及发挥,因此,破坏程度越来越轻。

不同受火方式下的荷载(N_u)-轴向应变(ε)关系曲线

图 10 (网络版彩图)不同受火方式下破坏模式。(a) 混凝土; (b) 钢筋

Figure 10 (Color online) Failure patterns of columns at different fire modes. (a) Concrete; (b) steel bar.

如图11(a)所示,随着受火面的增加,峰值承载力减小,峰值应变增大,且受火面越多,曲线下降段越平缓,这是因为受火面增加温度迅速上升,混凝土材料出现软化.其轴压刚度呈现相似的变化趋势,如图11(b)所示,这是因为受火面增加导致材料的力学性能下降,弹性模量减小.延性系数取 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ 表示,其中 Δ_u 为极限位移,本文取荷载(N_u)-轴向应变(ϵ)关系曲线中峰值承载力下降15%时对应的位移; Δ_y 为屈服位移,本文取荷载(N_u)-轴向应变(ϵ)关系曲线中峰值承载力对应的位移.不同受火方式下RC短柱轴压后的延性系数如图11(c)所示,SA26工况下的延性系数最小,其余工况下,延性系数随着受火面的增加而逐渐减小,这可以归因于相对两面受火导致RC短柱内部温度极其不均匀,相邻两面的混凝土受高温作用损伤严重,柱子达到峰值荷载后,由于相邻受火两面的混凝土被压碎,类似于偏心受压状态,承载力相较于其他工况快速下降.

4.2 受火时间对轴压性能影响

本小节主要研究边柱及中柱在经受不同火灾高温时间冷却后轴压力学性能的变化,设定受火时间分别为30, 60, 90, 120, 150和180 min,受火方式为三面和

四面受火.不同时间下RC短柱截面温度场的变化如图12所示,截面温度场呈现梯度变化趋势,且随着受火时间的增加,柱截面的高温区域逐渐扩大,高温作用90 min时,柱截面的最高温度达到1100℃.

边柱、中柱在不同时间高温作用冷却后的轴压破坏模式如图13(a)和14(a)所示.无论是三面还是四面受火,随着受火时间的增加,在轴向荷载的作用下其破坏程度越严重.受火时间为30 min时,边柱和中柱的破坏形式与常温下差别不大,当火灾高温作用时间超过90 min时,混凝土在轴压状态下破坏严重,整个RC短柱表面的混凝土均达到最大等效塑性应变.随着受火时间的增加,温度不断升高,纵筋与混凝土之间的黏结强度逐渐下降,两种材料之间的不协调变形增大,导致保护层附近混凝土破坏逐渐严重.

边柱和中柱在不同受火时间后钢筋骨架的破坏模式如图13(b)和14(b)所示.对于边柱,受火时间小于90 min时,混凝土强度下降幅度较小,箍筋所在处温度在500℃~600℃之间,钢筋强度下降相对较小,箍筋对核心混凝土均产生约束效应;受火时间超过90 min后,相较于直接受到高温作用的三面,未直接受到高温作用一面的箍筋产生较大的塑性变形,原因是温度逐渐

图11 (网络版彩图)不同受火方式参数分析. (a) 荷载(N_u)-轴向应变(ϵ)关系曲线; (b) 轴压刚度; (c) 延性系数

Figure 11 (Color online) Parameter analysis at different fire modes. (a) Load (N_u)-axial strain (ϵ) curve; (b) axial compressive rigidity; (c) ductility.

图 12 (网络版彩图)不同受火时间时柱截面温度. (a) 边柱; (b) 中柱

Figure 12 (Color online) Cross-section temperature of columns at different fire durations. (a) Side column; (b) center column.

图 13 (网络版彩图)边柱破坏模式. (a) 混凝土; (b) 钢筋

Figure 13 (Color online) Failure patterns of side columns. (a) Concrete; (b) steel bar.

增加(超过600℃)导致受火面混凝土强度迅速下降,并呈现高温软化效果,钢筋强度下降到原有强度的65%(受火180 min),箍筋对核心混凝土的约束作用降低,不受火面混凝土通过对流、热传导方式进行传热,强度下降相对较小,同侧核心混凝土承担大部分轴向荷载,箍筋对其产生约束,直至达到最大塑性变形.中柱钢筋骨架的破坏模式变化趋势与边柱相似,但由于四面受火导致温度升高速度更快,超过60 min后,箍筋强度便大幅下降,失去约束作用.

不同受火时间下边柱和中柱的荷载(N_u)-轴向应变(ϵ)关系曲线如图15所示,随着受火时间的增加,边柱和中柱在轴向荷载作用下,峰值承载力逐渐减小,峰值应变逐渐增加.取边柱和中柱在不同受火时间后的峰值承载力(N_{u0})与室温峰值承载力相比(N_{u0}),进行归一化

图 14 (网络版彩图)中柱破坏模式. (a) 混凝土; (b) 钢筋

Figure 14 (Color online) Failure patterns of center columns. (a) Concrete; (b) steel bar.

处理,可以得到峰值承载力比值与受火时间的变化趋势,如图16所示,两者呈线性下降趋势,但中柱的峰值承载力比值下降更快,是由于中柱的升温速度大于边柱.

轴压刚度的变化趋势如图17(a)所示,其随时间呈二次函数下降趋势,由于RC短柱主要由混凝土承受轴向荷载,前期混凝土强度下降迅速,超过120 min后,柱截面最大温度达到1000℃及以上,混凝土强度基本不再下降,因此刚度下降趋势变缓,曲线整体凸向时间轴.不同受火时间下,边柱和中柱的延性系数变化如图17(b)所示,随受火时间的增加延性系数逐渐较小,但两者之间的差异较大.在火灾高温作用时间不超过60 min时,中柱和边柱的延性系数基本一致,但受火时间大于60 min后,中柱的延性系数出现拐点,这可归因于四面受火60 min后,温度增长速度加快,混凝土和钢筋的强度都迅速下降,导致RC短柱的脆性增加,延性出现突然下降,超过90 min后,钢筋所在位置截面温度基本变化不大,延性系数趋于定值,但超过150 min后,由于混凝土受高温软化,下降段过于平缓,因此无法计算出准确的延性系数.

4.3 体积配箍率对峰值点影响

本小节对不同体积配箍率下边柱及中柱在火灾高温作用60, 120和180 min后的峰值承载力和峰值应变

图 15 (网络版彩图)荷载(N_u)-轴向应变(ε)关系曲线. (a) 边柱; (b) 中柱

Figure 15 (Color online) Load (N_u)-axial strain (ε) curve at room temperature. (a) Side column; (b) center column.

图 16 (网络版彩图)峰值承载力与受火时间退化关系

Figure 16 (Color online) Degradation between peak bearing capacity and different fire durations.

进行讨论, 体积配箍率分别为0.38%, 0.68%以及1.08%, 相对应的箍筋直径为6, 8和10 mm.

室温时不同配箍率下的荷载(N_u)-轴向应变(ε)关系曲线如图18(a)所示, 随着配箍率的增加荷载(N_u)-轴向应变(ε)关系曲线弹性阶段增长, 峰值承载力和峰值应变都增大, 但峰值应变的增加速度低于峰值承载力. 配箍率从0.38%增加至1.08%, 峰值承载力分别上升10.91%和7.63%, 峰值承载力增加幅度逐渐减小, 考虑增加配箍率对提高峰值承载力有一定的限值, 并且增加箍筋直径约束了混凝土内部微裂缝的发展, 增强对混凝土的约束, 使得极限承载力提高.

与室温情况比较, 边柱和中柱在火灾高温作用60, 120和180 min后(图18(b)和(c))的峰值承载力都下降, 受火180 min时峰值承载力分别下降到室温状态下的51.23%和35.29%; 但两种情况下的峰值点随着受火时间的增加基本不随配箍率的变化而变化, 证明随着受火时间的增加, 配箍率对峰值点的影响逐渐减小. 这可归因于: (1) RC短柱的承载力主要由混凝土承担, 高温后混凝土强度下降并出现软化效应, 导致承载力下

图 17 (网络版彩图)轴压刚度、延性随受火时间变化关系. (a) 轴压刚度退化; (b) 延性退化

Figure 17 (Color online) Relationship between the stiffness, ductility and fire durations. (a) Variation of axial compression stiffness; (b) degradation of ductility.

图 18 (网络版彩图)不同配箍率时荷载(N_u)-轴向应变(ε)关系曲线。(a) 常温; (b) 边柱高温后; (c) 中柱高温后

Figure 18 (Color online) Load (N_u)-axial strain (ε) curve at different stirrup ratios. (a) Room temperature; (b) side column after high temperature; (c) center column after high temperature.

降, 峰值应变增大; (2) 随着受火时间增加, 温度逐渐升高, 钢筋强度不断退化, 导致箍筋对核心混凝土的约束能力逐渐降低, 所以配箍率对峰值承载力和峰值应变的影响逐渐减弱。

5 结论

本文以RC短柱为研究对象, 考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移行为, 建立火灾高温作用后RC短柱轴压的三维数值模型, 并与物理试验结果进行比较, 验证了数值方法的合理性。进一步研究了火灾高温、冷却后RC短柱的轴压力学性能, 讨论了不同受火方式、受火时间以及体积配箍率对RC短柱轴压力学行为的影响, 可以得到如下结论。

(1) 建立的数值模型能够很好地描述RC短柱的轴

压力学行为, 考虑钢筋与混凝土之间黏结滑移的数值模拟结果与物理试验结果更加接近。

(2) 在相同受火时间下, 随着受火面数的增加, RC短柱的峰值承载力、轴压刚度和延性系数逐渐下降, 但相对两面受火时趋近于偏心受压, 其延性系数最小。

(3) 边柱和中柱的轴压承载力随受火时间增加而减小, 但中柱的减小程度更大; 受火时间增加, 两者的峰值承载力比值呈线性下降趋势, 轴压刚度呈二次函数下降。

(4) 配箍率对室温状态下RC短柱峰值点的影响大于火灾高温后, 且随着受火时间的增加, 配箍率对峰值点的影响逐渐减弱。

本文仅对不同受火方式及受火时间高温后RC短柱的轴压性能进行了初步探究, 后续工作将讨论更多因素(如不同混凝土强度、长细比以及循环往复加载)对RC柱力学性能的影响。

参考文献

- 1 Zheng W Z, Hou X M, Wang Y. Progress and prospect of fire resistance of reinforced concrete and prestressed concrete structures (in Chinese). J Harbin Inst Technol, 2016, 48: 1-18 [郑文忠, 侯晓萌, 王英. 混凝土及预应力混凝土结构抗火研究现状与展望. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48: 1-18]

- 2 Wang Y W. Experimental study on seismic behavior of reinforced concrete columns after different fire exposure cases (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Xiamen: Huaqiao University, 2017. 2–15 [王元武. 不同受火方式后钢筋混凝土柱抗震性能试验研究. 硕士学位论文. 厦门: 华侨大学, 2017. 2–15]
- 3 Zhang Y, Xu Z S. Research of flexural behavior of fire-damaged reinforced concrete beams strengthened with CFRP (in Chinese). *J Xi'an Univ Arch Tech (Nat Sci Ed)*, 2008, 40: 40–45 [张焱, 徐志胜. CFRP加固火灾损伤后钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2008, 40: 40–45]
- 4 Wu B, Tang G H, Wang C. Experimental study on fire resistance of RC columns with different faces exposed to fire (in Chinese). *Chin Civ Eng J*, 2007, 40: 27–31, 72 [吴波, 唐贵和, 王超. 不同受火方式下混凝土柱耐火性能的试验研究. 土木工程学报, 2007, 40: 27–31, 72]
- 5 Abdurhaem M S, Kadhum M M. Experimental investigation of fire effects on ductility and stiffness of reinforced reactive powder concrete columns under axial compression. *J Build Eng*, 2018, 20: 750–761
- 6 Wu B, Xu Y. Behavior of axially-and-rotationally restrained concrete columns with '+'-shaped cross section and subjected to fire. *Fire Saf J*, 2009, 44: 212–218
- 7 Martins A M B, Rodrigues J P C. Fire resistance of reinforced concrete columns with elastically restrained thermal elongation. *Eng Struct*, 2010, 32: 3330–3337
- 8 Yang J P, Shi X D, Guo Z H. Comparison of the mechanical behaviour between RC eccentric compression members heated on two and three surfaces (in Chinese). *Ind Construct*, 2000, 30: 34–37 [杨建平, 时旭东, 过镇海. 两面与三面高温下钢筋混凝土压弯构件的性能比较. 工业建筑, 2000, 30: 34–37]
- 9 Yang J P, Shi X D, Guo Z H. Experimental study on behaviour of eccentrically compressed reinforced concrete members under different heat-loading paths (in Chinese). *Eng Mech*, 2001, 18: 81–90 [杨建平, 时旭东, 过镇海. 两种升温-加载途径下钢筋混凝土压弯构件受力性能的试验及分析研究. 工程力学, 2001, 18: 81–90]
- 10 Bikhiet M M, El-Shafey N F, El-Hashimy H M. Behavior of reinforced concrete short columns exposed to fire. *Alexandria Eng J*, 2014, 53: 643–653
- 11 Wang Z W, Huo J S, Guo Y R. Effect of cooling method on mechanical behaviors of RC stub columns with sustained pre-load after exposure to high temperatures (in Chinese). *J Build Mater*, 2013, 16: 402–409 [王志伟, 霍静思, 郭玉荣. 降温方式对高温后钢筋混凝土短柱轴压力学性能的影响. 建筑材料学报, 2013, 16: 402–409]
- 12 Huo J S, Zhang J G, Wang Z W, et al. Effects of sustained axial load and cooling phase on post-fire behaviour of reinforced concrete stub columns. *Fire Saf J*, 2013, 59: 76–87
- 13 Kodur V K R, Wang T C, Cheng F P. Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns. *Cement Concrete Compos*, 2004, 26: 141–153
- 14 Kodur V, Raut N. A simplified approach for predicting fire resistance of reinforced concrete columns under biaxial bending. *Eng Struct*, 2012, 41: 428–443
- 15 Zhang J M, Chen J, Huo J S, et al. Experimental study of the effect of fire mode on axial compression mechanical properties of RC after exposure to entire fire process (in Chinese). *J Exp Mech*, 2017, 32: 70–78 [张家铭, 陈俊, 霍静思, 等. 火灾升降温模式对高温后钢筋混凝土轴压力学性能影响的试验研究. 实验力学, 2017, 32: 70–78]
- 16 Huang Z. Modelling the bond between concrete and reinforcing steel in a fire. *Eng Struct*, 2010, 32: 3660–3669
- 17 ISO-834. Fire-Resistance Tests-Elements of Building Construction. International Standard ISO 834: Amendment 1, Amendment 2, 1980
- 18 Purkiss J A. Fire Safety Engineering Design of Structures. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007
- 19 Cho B, Park D, Kim J, et al. Study on the heat-moisture transfer in concrete under real environment. *Constr Build Mater*, 2017, 132: 124–129
- 20 European Committee for Standardization. Eurocode 2: Design of Concrete Structures-Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design (EN 1992-1-2:2004). Brussels: the Committee, 2004
- 21 China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Code for Fire Safety of Steel Structure in Buildings, CECS 200: 2006 (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2006 [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. 北京: 中国计划出版社, 2006]
- 22 Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete. *Int J Solids Struct*, 1989, 25: 299–326
- 23 Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *J Eng Mech*, 1998, 124: 892–900
- 24 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures (GB 50010-2010)

- (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 [中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010]
- 25 Zhu B L, Lu Z D, Hu K X. Strain-stress relation of concrete and steel under high temperature (fire) (in Chinese). *Sichuan Build Sci*, 1990, 16: 37–43 [朱伯龙, 陆洲导, 胡克旭. 高温(火灾)下混凝土与钢筋的本构关系. *四川建筑科学研究*, 1990, 16: 37–43]
- 26 Lu C S, Qu L J, Xue W P, et al. The Design of Building Structure Fire Resistance (in Chinese). Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 1995. 34–39 [路春森, 屈立军, 薛武平, 等. 建筑结构耐火设计. 北京: 中国建材工业出版社, 1995. 34–39]
- 27 Wu B. Mechanical Properties of Reinforced Concrete Structures after Fire (in Chinese). Beijing: Science Press, 2003. 59–61 [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. 59–61]
- 28 Shen R, Feng L Y, Rong K. Assessment of mechanical properties of reinforcement after high temperature (in Chinese). *Sichuan Build Sci*, 1991, 17: 5–9 [沈蓉, 凤凌云, 戎凯. 高温(火灾)后钢筋力学性能的评估. *四川建筑科学研究*, 1991, 17: 5–9]
- 29 Ergün A, Kürklü G, Başpınar M S. The effects of material properties on bond strength between reinforcing bar and concrete exposed to high temperature. *Constr Build Mater*, 2016, 112: 691–698
- 30 European Committee for Standardization. Eurocode 1: Actions on Structures-Part 1-2: General Actions-Actions on Structures Exposed to Fire (EN 1991-1-2:2002). Brussels: the Committee, 2002
- 31 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Fire Protection of Building Design (GB 50016-2014) (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2014 [中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范: GB 50016-2014. 北京: 中国计划出版社, 2014]

Numerical analysis of axial compressive behavior of reinforced concrete short columns after exposure to fire

JIN Liu, LI XiaoYa, DU XiuLi & JIANG AnTong

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

The bearing capacity and durability of reinforced concrete (RC) structures can be affected by fire. The mechanical behavior of RC structures after exposure to high temperatures has attracted extensive attention from researchers. This paper considers the degradation effect of the mechanical properties of steel and concrete materials after high temperature and the bond-slip behavior between steel and concrete. A three-dimensional numerical model for studying the axial compression resistance of RC short columns after exposure to fire was established. Based on verifying the rationality of the numerical model, the effects of different faces exposed to fire, fire duration, and stirrup ratio on the axial compressive properties of RC short columns are further investigated. Hence, the failure modes and failure mechanisms of RC columns were revealed. The results reveal that the numerical model considering the bond-slip between steel bar and concrete can describe the failure mode of RC columns more effectively after exposure to high temperatures. With the increase of the duration of fire exposure on the faces, the peak load-carrying capacity, axial compression stiffness, and ductility decreased continuously. The increase of stirrup ratio increased the peak load-carrying capacity of RC short columns at room temperature. After high-temperature exposure, the peak load-carrying capacity increased proportionally with the stirrup ratio, but the degree of influence decreased gradually with the increase of specified fire duration.

RC columns, after high temperature, steel-concrete bond-slip, axial compression performance, failure mode

doi: [10.1360/SST-2019-0240](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0240)