

引用本文:金 浏,林曼芳,李潇雅,等.不同尺寸钢筋混凝土短柱高温后抗震性能分析[J].建筑科学与工程学报,2021,38(5):15-25.
JIN Liu, LIN Man-fang, LI Xiao-ya, et al. Analysis of Seismic Performance of Reinforced Concrete Short Columns with Different Sizes After High Temperature[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(5): 15-25.

DOI:10.19815/j.jace.2021.02031

不同尺寸钢筋混凝土短柱高温后抗震性能分析

金 浏,林曼芳,李潇雅,张仁波

(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)

摘要:为了研究不同尺寸钢筋混凝土短柱在高温和地震耦合作用下的力学行为,建立了火灾高温后钢筋混凝土(RC)短柱抗震性能研究的三维数值模型,对 12 个几何形状相似、尺寸大小不同的 RC 柱进行不同受火时间后的水平反复加载试验。在验证模型有效性的基础上,研究了受火时间和截面尺寸对 RC 柱温度场分布、破坏模式、低周反复荷载下的骨架曲线、位移延性、刚度退化、抗剪承载力等的影响规律和失效机制;基于模拟数据和经典的 Bazant 尺寸效应思想,提出了考虑混凝土强度尺寸效应影响及受火时间、尺寸影响的双参数修正的钢筋混凝土柱抗剪承载力实用计算公式。结果表明:火灾后截面尺寸越大的 RC 柱温度差异越大,受热越不均匀,角筋比其他纵筋升温快,保护层有助于延缓钢筋温度的升高;构件高温后刚度退化较常温时平缓;高温后构件尺寸越大,刚度退化越迅速;构件抗剪承载力随受火时间增长而降低,并受构件截面尺寸的影响;提出的钢筋混凝土柱抗剪承载力实用计算公式可供火灾后大尺寸钢筋混凝土柱安全性鉴定作参考。

关键词:RC 短柱;高温;抗震性能;截面尺寸;抗剪承载力

中图分类号:TU375.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2021)05-0015-11

Analysis of Seismic Performance of Reinforced Concrete Short Columns with Different Sizes After High Temperature

JIN Liu, LIN Man-fang, LI Xiao-ya, ZHANG Ren-bo

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

Abstract: In order to study the mechanical performance of reinforced concrete short columns with different sizes under the coupling action of high temperature and earthquake, the three-dimensional numerical model was established to study the seismic behavior of reinforced concrete (RC) short columns after high temperature fire. The horizontal repeated loading tests of 12 RC columns with similar geometry and different sizes after different fire duration were carried out. On the basis of verifying the validity of the model, the influence law and failure mechanism of fire time and cross-sectional size on RC column temperature field distribution, destruction mode, skeleton curve under low cyclic loading, displacement ductility, stiffness degradation, and shear-resistant carrying capacity were studied. Based on the simulation data and the classical idea of the size effect of Bazant, a practical calculation formula of shear bearing capacity of reinforced

收稿日期:2021-02-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51822801,51978022)

作者简介:金 浏(1985-),男,江苏泗阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:kinglew2007@163.com。

concrete columns was proposed by introduction of two parameters considering the size effect of concrete strength and the influence of fire duration. The results show that the larger the cross-section size of RC column is, the greater the temperature gradient and the more uneven of the temperature field are. The temperature rise of corner reinforcement is faster than that of other longitudinal reinforcements. The concrete cover can help delay the rise of steel bar temperature. The rate of stiffness degradation after high temperature is slower than that at ordinary temperature. The larger the member size is, the faster the stiffness degradation is. The shear bearing capacity of reinforced concrete columns decreases with the increase of fire duration and is affected by the cross-section size of members. The proposed practical calculation formula of shear bearing capacity of reinforced concrete columns can be used as a reference for safety determination of large-size reinforced concrete columns after fire.

Key words: RC short column; high temperature; seismic performance; cross-section size; shear bearing capacity

0 引言

在可燃物集中的城市环境中,尽管防火与消防技术不断发展,火灾仍然频繁发生,从而造成巨大损失。作为目前应用最为广泛的结构形式之一,尽管钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)结构的抗火性能优于木结构和钢结构等,但在火灾作用下,其内部钢筋、混凝土等材料的力学性能、内力分布与原先设计状态相比会发生较大改变,从而导致结构严重变形甚至倒塌,使其可靠度下降^[1-3]。因此,有必要开展火灾后混凝土材料及结构的力学性能研究。

作为结构的主要承重构件之一,钢筋混凝土柱的轴压与偏压性能得到了较为充分的研究^[4-5]。然而,火灾高温后 RC 柱的抗震性能研究却仍然不够系统。吴波等^[6-7]对高温后 RC 柱抗震性能进行试验研究,结果表明 RC 柱在火灾后的破坏模式由以钢筋屈服为特征的弯曲型破坏转变为以压区混凝土压碎、保护层剥落、纵筋压屈为特征的脆性破坏。Bikhiet 等^[8]、Chen 等^[9]对 RC 短柱不同受火时间后抗震性能的试验研究表明,高温后构件的强度、刚度、变形能力和耗能能力均随着温度的增加而明显降低。工程结构中的 RC 短柱由于刚度大、延性差、耗能小^[10],往往首先发生剪切脆性破坏,从而引起整个结构灾难性破坏^[11]。

此外,由于混凝土材料本身的非均质性及其力学非线性,以及钢筋与混凝土相互作用的高度复杂性,导致 RC 短柱破坏还受到尺寸效应的影响^[12-13]。目前,国内外学者对大尺寸 RC 柱力学性能尺寸效应做了大量的研究工作。Li 等^[14]指出由于钢筋混凝土相互作用的高度复杂性,RC 短柱脆性压-剪破

坏受到尺寸效应的影响。李振宝等^[15]对常温下 RC 短柱抗震性能的尺寸效应进行了试验研究,张帅等^[16]的细观数值分析结果表明 RC 短柱的抗剪强度、位移延性系数、耗能能力等抗震性能指标均表现出明显的尺寸效应。

受火后 RC 短柱的抗震性能、常温下 RC 柱的尺寸效应已有一定的研究,但是对于受火后结构尺寸对 RC 短柱抗震性能的影响还很少有人探讨。由于试验条件有限,仅仅依靠试验研究高温后大尺寸 RC 柱的抗震性能还有较大的难度^[17-18]。鉴于此, Jin 等^[19]建立了细观数值模型,对高温后不同轴压比 RC 短柱的抗震性能进行了较为系统的分析。在此基础上,本文结合尺寸效应理论^[12-13],进一步扩展探讨,关注构件尺寸与受火持续时间对 RC 短柱抗震性能的影响,对构件破坏机理进行分析,进而提出了考虑受火时间、截面尺寸影响的双参数钢筋混凝土柱抗剪承载力实用计算公式,为火灾后大尺寸钢筋混凝土柱安全性鉴定及损伤加固设计提供参考。

1 钢筋混凝土柱数值分析模型

1.1 几何模型

李振宝等^[15]对 6 根几何关系相似但尺寸不同的 RC 短柱,进行了水平荷载作用下的单调和反复加载试验。本文将该试验中编号 JF-2-5-0.6 的钢筋混凝土柱作为参照,设计了 4 组 RC 短柱,构建如图 1(a)所示三维数值模型。RC 短柱几何尺寸分别为 300 mm×300 mm×600 mm, 500 mm×500 mm×1 000 mm, 700 mm×700 mm×1 400 mm, 900 mm×900 mm×1 800 mm, 剪跨比均为 2, 纵筋配筋率为 1.51%, 体积配箍率为 0.38%~0.39%, 轴压

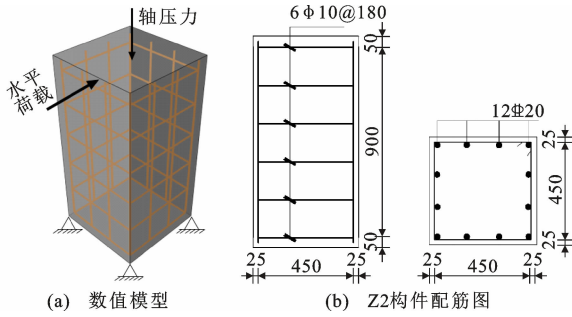


图 1 RC 短柱的数值模型及 Z2 构件配筋(单位:mm)

Fig. 1 Numerical Model of RC Short Column and Rebar Arrangement of Member Z2 (Unit:mm)

表 1 构件尺寸及配筋参数

Table 1 Specimen Dimensions and Reinforcement Configuration

构件编号	截面尺寸	柱高 H/mm	轴压力 N/kN	实配纵筋	实配箍筋	保护层厚度/mm
Z1	300 mm×300 mm	600	1 012.5	12Φ12	Φ8@210	25
Z2	500 mm×500 mm	1 000	2 812.5	12Φ20	Φ10@180	25
Z3	700 mm×700 mm	1 400	5 512.5	12Φ28	Φ12@190	40
Z4	900 mm×900 mm	1 800	9 112.5	12Φ36	Φ14@200	55

注: $N=n_i f_c A$, N 为柱轴向压力, A 为截面面积, f_c 为混凝土抗压强度, n_i 为轴压比。

传热分析,获得 RC 短柱内部温度。

(2)力学性能分析:基于已有温度场,确定不同材料在高温后的力学性能,模拟低周水平反复加载过程中 RC 短柱的力学行为。

进行 RC 短柱温度场分析时,混凝土采用 DC3D8 八节点六面体线性传热单元,钢筋采用 DC1D2 双节点线性传热单元,钢筋和混凝土之间选用 tie 约束。力学性能分析时,混凝土采用 C3D8R 八节点六面体减缩积分单元,钢筋采用 T3D2 桁架单元,本文采用文献[21]中的钢筋-混凝土黏结单元来模拟纵向钢筋与混凝土之间的非线性黏结滑移行为,并假定箍筋和混凝土之间黏结良好。建立的数值模型部件名称和节点编号与温度场分析时保持一致。

1.2 热本构模型和参数

1.2.1 热传导方程

RC 短柱表面和内部温度场分析基于热传导的基本微分方程^[22-23],即

$$Q = k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = h_c (T_f - T_c) + \sigma \epsilon (T_f - T_c) \quad (1)$$

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

式中: Q 为从外部传递的热量; k 为导热系数; T 为温度; Γ 为传热面; n 为传热面的外法线; h_c 和 ϵ 分别为对流系数和辐射系数; T_f 和 T_c 分别为环境温度和 RC 短柱的表面温度; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$

比为 0.25,模型几何尺寸和配筋参数如表 1 所示。纵筋采用 HRB 400 级钢筋,箍筋采用 HPB 300 级钢筋,模型中钢筋屈服强度取实测值,纵筋屈服强度为 440 MPa,箍筋屈服强度为 360 MPa,钢筋弹性模量为 200 GPa,混凝土轴心抗压强度按试验取 45 MPa,混凝土弹性模量为 32.5 GPa,Z2 构件配筋见图 1(b)。

本文采用顺序耦合分析方法^[20]进行高温后钢筋混凝土短柱抗震性能及尺寸效应研究,模拟过程如下:

(1)温度场分析:对 RC 短柱进行标准火灾升温

$W \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,为斯特藩-玻尔兹曼常量; ρ 和 c 分别为密度和比热容; t 为时间; q 为 RC 短柱内部产生的热量,在传热分析中 $q=0 \text{ J}$ 。

1.2.2 材料热工性能

参照文献[24]分别确定混凝土密度 ρ 、热传导系数 λ_c 、比热容 C_c 和热膨胀系数 α_c 随温度变化公式,如式(3)~(6)所示,其中 $20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}$ 。

$$\rho = 2400 - 0.56T \quad (3)$$

$$\lambda_c = 0.012 \left(\frac{T}{120} \right)^2 - 0.24 \frac{T}{120} + 2 \quad (4)$$

$$C_c = -4 \left(\frac{T}{120} \right)^2 + 80 \frac{T}{120} + 900 \quad (5)$$

$$\alpha_c = (0.008T + 6) \times 10^{-6} \quad (6)$$

高温对钢筋的力学性能及热工性能影响显著,而钢筋密度在高温条件下变化不明显,密度取 $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。参考文献[24],[25],钢筋的热传导系数 λ_s 、比热容 C_s 和热膨胀系数 α_s 随着温度变化而变化,即

$$\lambda_s = \begin{cases} 54 - 3.33 \times 0.01T & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \\ 27.3 & 800^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (7)$$

$$C_s = \begin{cases} 425 + 7.73 \times 0.1T - 1.69 \times 10^{-3} T^2 + 2.2 \times 10^{-6} T^3 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C} \\ 666 - \frac{13002}{T-738} & 600^\circ\text{C} < T \leq 735^\circ\text{C} \\ 545 - \frac{17820}{T-731} & 735^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C} \\ 650 & 900^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (8)$$

$$\alpha_s = \begin{cases} 0.8 \times 10^{-8} (T-20) + 1.2 \times 10^{-5} & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 750^\circ\text{C} \\ 0 & 750^\circ\text{C} < T \leq 860^\circ\text{C} \\ 2.0 \times 10^{-5} & 860^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (9)$$

1.3 本构模型和参数

1.3.1 本构关系

本文采用耦合材料高温退化效应的混凝土塑性损伤模型^[26]来描述 RC 短柱轴压状态下混凝土的力学行为,其单轴压缩或拉伸状态下的特征曲线如图 2 所示,其中, d_c 为混凝土单轴受压损伤演化参数, d_t 为混凝土单轴受拉损伤演化参数, E_0 为初始弹性模量, f_t 为混凝土抗拉强度,混凝土受拉刚度恢复系数取值为 0。钢筋材料采用二折线弹性-强化模型,如图 3 所示,其中, f_y, ϵ_y 分别为钢筋屈服强度和屈服应变, f_u, ϵ_u 分别为极限强度和极限应变, E_s 为钢筋弹性模量。

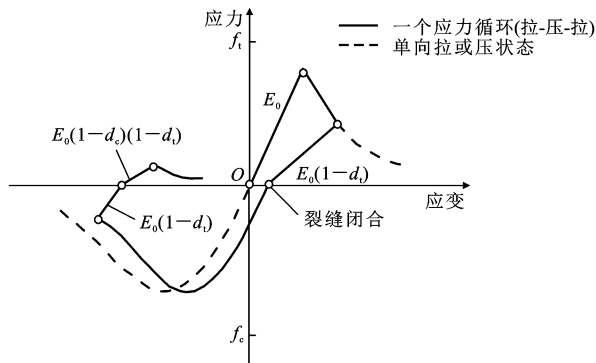


图 2 混凝土本构模型

Fig. 2 Constitutive Model of Concrete

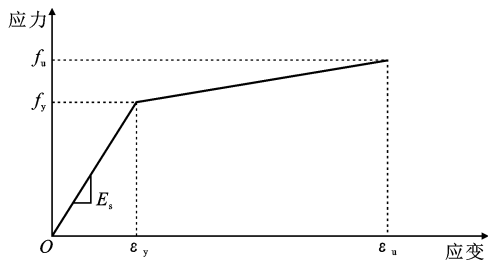


图 3 钢筋本构模型

Fig. 3 Constitutive Model of Steel Rebar

1.3.2 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能退化。本文采用文献^[27]高温后混凝土强度退化规律[式(10)]和高温后混凝土弹性模量的退化模型(表 2),其中 $f_c(T)$ 为不同温度下混凝土的轴心抗压强度, $E_{ct}(T)$ 为不同温度下的混凝土弹性模量。

$$f_c(T) = \begin{cases} f_{c,r} & 0^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C} \\ [1.0 - 0.0015(T-200)]f_c & 200^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C} \\ [0.25 + 0.003(600-T)]f_c & 500^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C} \\ [0.25 - 7.5 \times 10^{-4}(T-600)]f_c & 600^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $f_{c,r}$ 为常温下混凝土的轴心抗压强度。

表 2 模型参数取值

Table 2 Values of Model Parameters

$T/^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700	800
$E_{ct}(T)/E_c$	0.75	0.40	0.38	0.30	0.20	0.10	0.05	0.05

注: E_c 为常温下混凝土弹性模量。

1.4 荷载和边界条件

构件的热传递方式主要包括外部的热辐射、热对流和内部的热传导。根据欧洲规范^[28],柱表面的热对流系数取为 $25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,热辐射系数取 0.85,采用四面均匀受火方式。本文采用 ISO 834 火灾升温曲线^[22],加热时间取 0, 60, 90 min (在柱编号后以 A, B, C 进行区分)。试件底端固定约束,顶端施加轴心竖向荷载,并在侧面施加水平往复荷载。为了让计算过程更容易收敛,采用位移控制加载。力的施加都是作用于参考点上,通过参考点与加载面的耦合可以避免因直接施加集中力导致出现数值奇异和负特征值。

2 数值分析模型验证

为了验证钢筋混凝土短柱数值模型的有效性,将常温下与高温下数值模拟结果分别与试验结果^[15,29]进行对比,如图 4~6 所示,其中 P 为荷载, Δ 为位移。

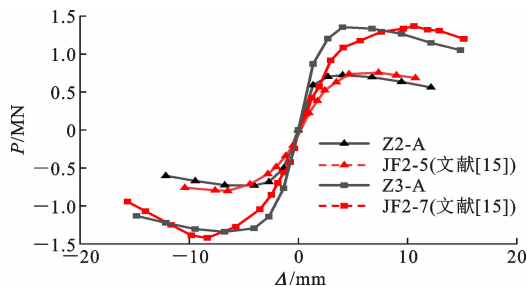


图 4 数值模拟与常温试验 $P-\Delta$ 曲线对比

Fig. 4 Comparison of $P-\Delta$ Curves Between Numerical Simulation and Test at Room Temperature

由图 4 可知,常温下构件的骨架曲线数值模拟结果与文献^[15]的试验结果趋势基本一致。由图 5,6 可知,构件 Z1(300 mm×300 mm×600 mm)在

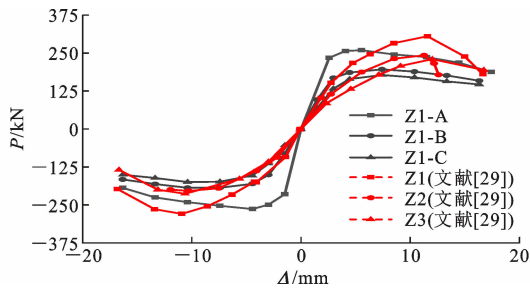
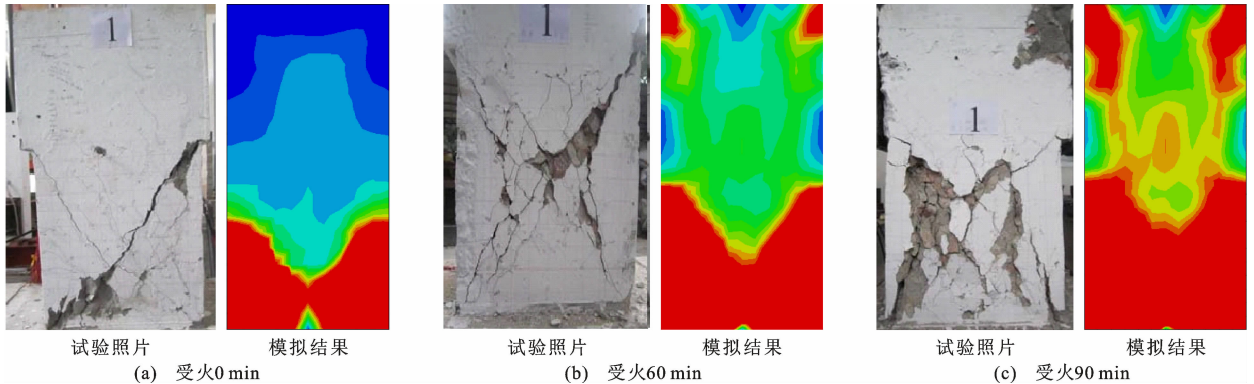
图 5 数值模拟与高温后试验 $P-\Delta$ 曲线对比Fig. 5 Comparison of $P-\Delta$ Curves Between Numerical Simulation and Test After High Temperature

图 6 RC 短柱模拟与试验破坏形态对比

Fig. 6 Comparison of Failure Modes Between Simulation and Test for RC Short Columns

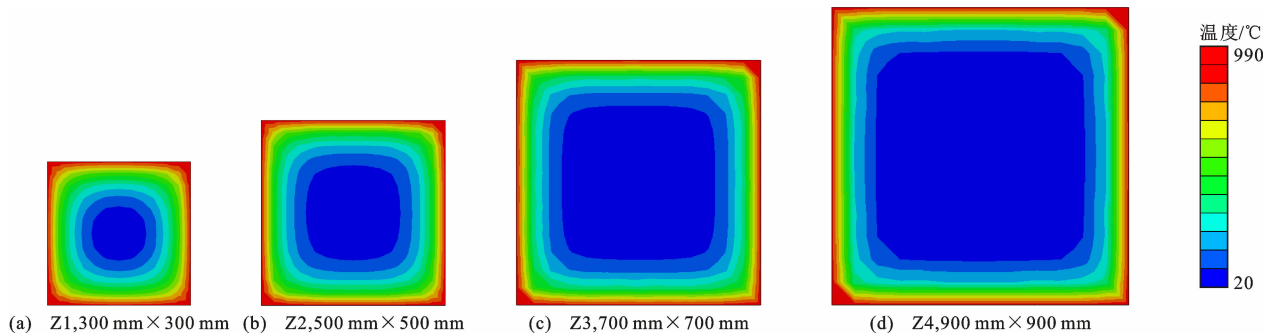


图 7 受火 90 min 后不同截面尺寸 RC 短柱温度云图

Fig. 7 Temperature Nephograms of RC Short Columns with Different Cross-section Sizes After 90 min Fire

分布,且随着截面尺寸增加,柱截面受高温影响区域的相对比例逐渐减小,仅集中在截面边缘 100 mm 左右的宽度范围内。在相同的受火时间下,不同截面尺寸 RC 短柱的外表温度均在 995 °C 左右,中心温度随尺寸增大从 175 °C 变成 20 °C。换言之,由于混凝土是热惰性材料,温度由外向内传导较慢,截面尺寸越大,混凝土吸收能量并将其传递到内部需要更多的时间。在一定时间后,尺寸较大构件内部测点因距离表面热源较远,吸收的热量较少,不足以使构件内部温度快速上升。截面尺寸越大的柱子内外温度差异越大。

4 个不同截面 RC 短柱四面均匀受火 90 min

受火 0, 60, 90 min 后模拟所得的骨架曲线和破坏形态与文献[29]试验中的结果相似,从而表明本文数值模拟方法的可靠性,说明其可以反映几何形状相似的钢筋混凝土构件在不同温度后水平荷载低周反复作用下的破坏过程和破坏模式。

3 模拟结果分析和讨论

3.1 温度场

图 7 为不同截面 RC 柱四面均匀受火 90 min 时的温度云图。可以明显看出截面温度场呈现梯度

时,钢筋的温度变化如图 8, 9 所示,其中 c 为保护层厚度。由于各柱保护层厚度逐渐增加,钢筋温度依次降低,4 根纵向角筋受影响最大,温度比其他位置纵筋高出约 200 °C。这是由于角筋处在相邻 2 个受火交界面处,受高温面积较其他纵筋大,同时受到来自 2 个受火面传导的热量,温度会相互耦合,形成光滑的等温线,即最终截面内等温线分布逐步趋向于同心圆分布。

3.2 破坏模式

不同尺寸 RC 短柱在常温以及 60, 90 min 两种受火时间后的水平反复推拉加载破坏模式如图 10 所示。由图 10 可知,柱的破坏区域集中在 RC 短柱

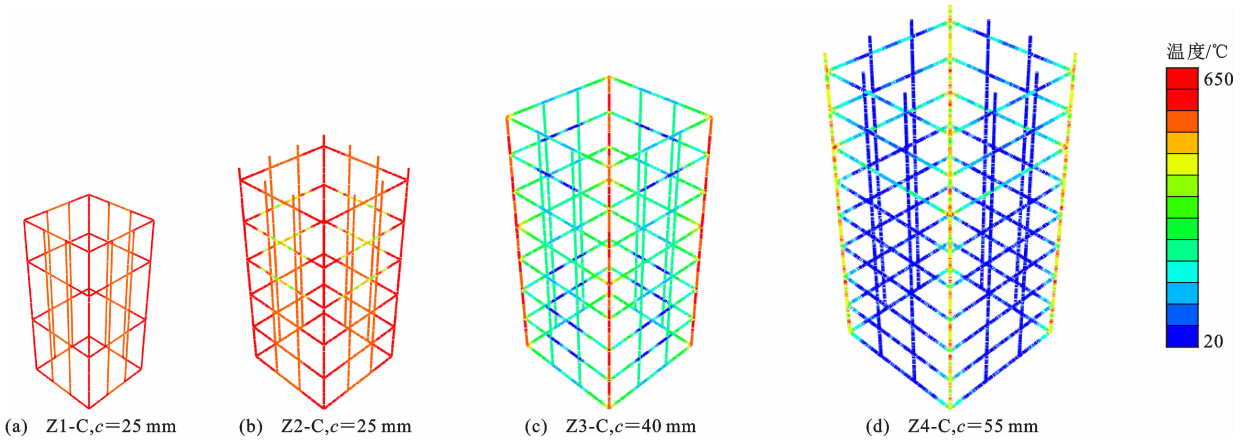


图 8 受火 90 min 后不同保护层厚度下的钢筋温度云图

Fig. 8 Steel Rebar Temperature Nephograms with Different Protective Layer Thicknesses After 90 min Fire

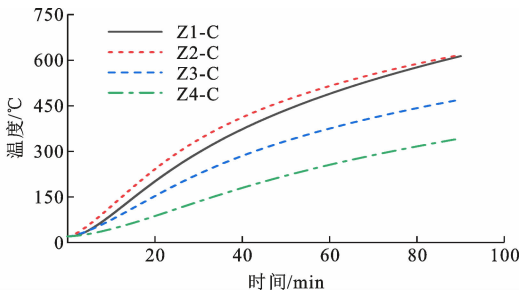


图 9 钢筋处的温度曲线

Fig. 9 Temperature Curves at Position of Rebar

的根部。随着受火时间增加,同一尺寸 RC 短柱表面左右两侧靠近根部区域的破坏面积增大,说明其

破坏更加严重。这是由于随着受火时间增加,温度上升,混凝土和钢筋强度下降,箍筋对核心混凝土的约束作用降低,从而导致混凝土破坏逐渐严重。

在相同的受火时间下,随着尺寸增大,最终破坏模式逐渐由受剪破坏向受弯破坏转变,这是由于尺寸较小时,RC 短柱截面受高温影响的区域较大,高温后材料强度降低,混凝土与钢筋相互作用减弱,RC 短柱延性变差,从而表现出受剪破坏;随着尺寸增大,RC 短柱内部高温影响区域减小,承载能力损失较少,仍然能够保持较好的整体性及延性,从而使破坏更偏向于受弯破坏。

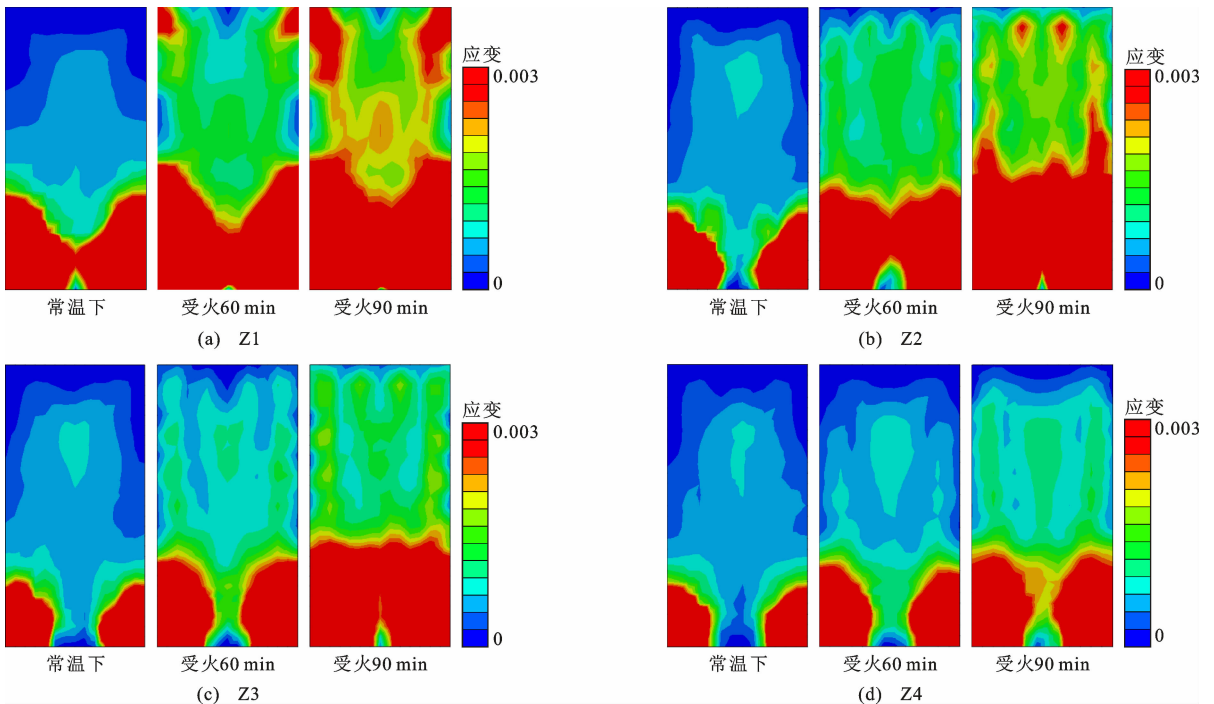


图 10 不同受火时间后的等效塑形应变云图

Fig. 10 Equivalent Plastic Strain Nephogram After Different Fire Durations

3.3 骨架曲线

高温后不同尺寸构件在低周反复荷载下各阶段的受力与变形特性采用骨架曲线来表示,即将同方向(推或拉)各次加载的荷载极值点依次相连得到的包络曲线。图 11 给出了不同受火时间后构件的骨架曲线,可以看出骨架曲线分为 3 个阶段:弹性阶段(开始加载至钢筋屈服,荷载和变形呈线性增长)、塑性发展阶段(钢筋屈服至峰值荷载,上升斜率明显变缓)、破坏阶段(下降段,峰值荷载下降到承载力的 85%)。

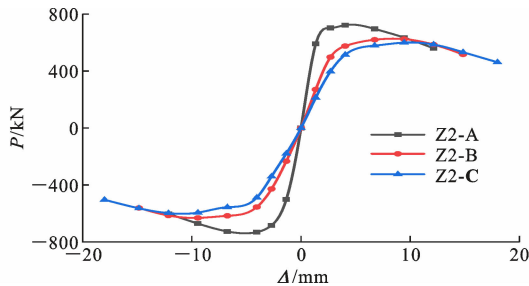


图 11 构件不同受火时间下的骨架曲线

Fig. 11 Skeleton Curves of Specimens Under Different Fire Durations

从图 11 可以看出,同一尺寸构件随受火时间增长,峰值荷载降低,极限变形增大。受火后构件的骨架曲线在弹性上升段斜率均小于常温下,说明受火后抗侧移刚度下降明显;在弹塑性发展阶段,受火后的峰值荷载降低,但变形性能有所增强;在破坏阶段,受火后的骨架曲线趋于扁平,下降段斜率较常温柱构件小,荷载随位移增加而曲线更平缓。

3.4 位移延性

本文采用位移延性系数来评价钢筋混凝土短柱的抗震性能,位移延性系数定义为试件的极限位移 Δ_u 和屈服位移 Δ_y 的比值^[30],即 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ 。 Δ_u 取荷载降低至 85% 峰值荷载时所对应的位移, Δ_y 采用能量等值法计算。

相同轴压比和剪跨比下,位移延性系数随钢筋混凝土短柱截面尺寸的变化情况见表 3。从表 3 可以看出:随着受火时间的增加,同一尺寸 RC 短柱的位移延性系数下降;受火后,随尺寸增大,RC 短柱的延性系数无明显变化规律。

3.5 刚度退化

采用弹塑性极限位移角^[31]描述钢筋混凝土短

表 3 构件骨架曲线的特征值

Table 3 Characteristic Values of Skeleton Curves of Specimens

构件编号	屈服位移/mm	屈服荷载/kN	峰值位移/mm	峰值荷载/kN	极限位移/mm	延性系数	弹塑性极限位移角
Z1-A	1.18	216.86	3.00	236.04	6.8	5.76	0.011
Z2-A	1.83	631.24	4.05	722.72	10.2	5.57	0.010
Z3-A	2.62	1 180.89	4.05	1 354.87	12.2	4.66	0.009
Z4-A	3.27	2 031.72	6.75	2 236.81	16.8	5.14	0.009
Z1-B	3.19	159.01	6.24	178.66	13.5	4.23	0.023
Z2-B	3.62	551.06	7.83	626.79	15.0	4.14	0.015
Z3-B	4.50	1 036.74	9.45	1 211.16	16.8	3.73	0.012
Z4-B	5.17	1 786.79	11.12	2 048.11	19.5	3.77	0.011
Z1-C	3.90	146.40	6.65	161.89	13.7	3.51	0.023
Z2-C	4.59	527.70	7.67	595.48	15.8	3.44	0.016
Z3-C	5.43	994.41	10.57	1 153.18	19.3	3.55	0.014
Z4-C	6.07	1 681.50	15.00	1 930.53	23.0	3.79	0.013

柱抗侧移变形能力,弹塑性极限位移角 $\theta = \Delta_u / H$,其中 H 为柱高。从表 3 中可以看出,同一尺寸构件高温后的 RC 短柱弹塑性极限位移角大于常温下,说明高温后 RC 短柱的抗侧移刚度下降明显。相同受火条件下,随着尺寸增大,弹塑性极限位移角下降。

RC 构件在往复荷载作用下的刚度退化特性可以用各级荷载作用下的环线刚度 K_i ^[30] 来描述,即

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (11)$$

式中: K_i 为第 i 级加载下的环线刚度; P_i, Δ_i 分别为

第 i 级加载下加载点的峰值荷载和相应位移;“+”和“-”分别表示正向加载与反向加载。

图 12 为各构件在常温、高温 60 min 和 90 min 后的加载环线刚度随位移角的退化曲线。根据图 12(b),(c) 曲线斜率转折变化可知,高温后构件的刚度随位移的变化过程可分为 3 个阶段:第 1 阶段为从试件开始加载到混凝土开裂阶段(ab 段),第 2 阶段从混凝土开裂到构件屈服阶段(bc 段),第 3 阶段从构件屈服到试件破坏阶段(cd 段)。对比不同受火时间的刚度退化曲线可知,常温下第 1 阶段刚度

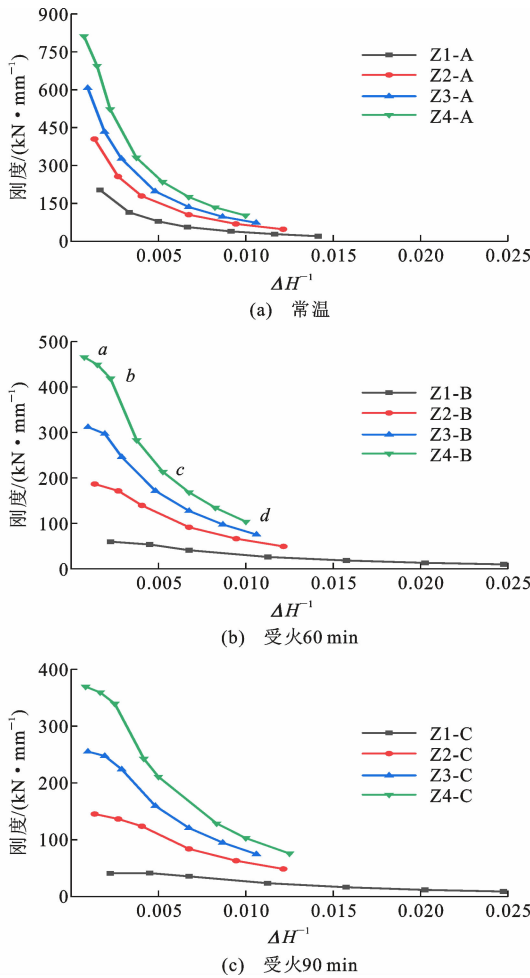


图 12 不同截面尺寸构件刚度退化曲线

Fig. 12 Stiffness Degradation Curves of Specimens with Different Section Sizes

退化最快;高温后第 1 阶段和第 2 阶段的刚度下降出现明显的速率变化,第 2 阶段退化速率高于第 1 阶段,这与开裂后钢筋暴露于高温而发生软化有关。另外,从图 13 可以看出,同一构件高温后刚度退化比常温平缓,尤其在第 1 阶段。这种现象产生的原因是混凝土在高温下的弹性模量和强度较常温下降明显,但混凝土应力-应变曲线总体呈现出随温度增加而渐趋扁平的趋势。随着温度的增高,由于混凝土和钢筋材料已经退化严重,外荷载引起的进一步刚度退化并不明显,因而试件高温后刚度退化总体较常温时平缓。试件尺寸越大,初始刚度越大,高温后大尺寸试件内部的温度场更加不均匀,从而产生较大的温度应力,而不均匀温度场使混凝土结构的截面应力和结构内力发生重分布,又可能导致刚度退化愈加迅速。

3.6 抗剪承载力

RC 短柱抗剪承载力与受火时间的关系见图

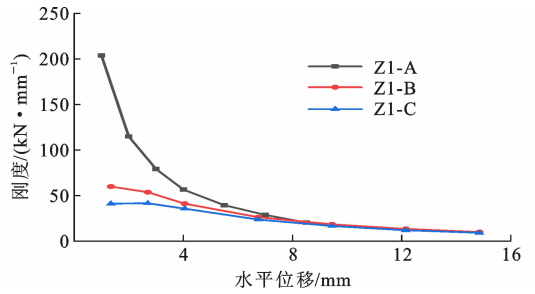


图 13 构件在常温、高温后的刚度退化曲线

Fig. 13 Stiffness Degradation Curves of Specimens Under Different Fire Cases

14。由图 14 可知,4 种构件高温后的承载力随受火时间呈线性变化规律,可采用式(12)形式进行拟合。

$$V_u^0 = Et + F \quad (12)$$

式中: V_u^0 为抗剪承载力; E, F 为与截面尺寸相关的常量,如图 15 所示。

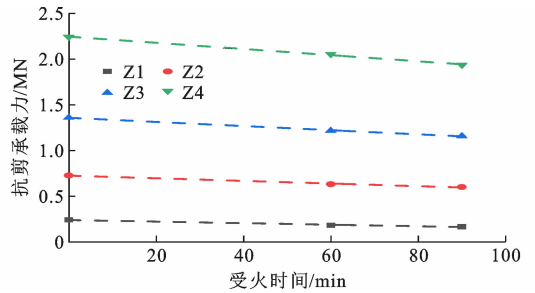


图 14 抗剪承载力与受火时间的关系

Fig. 14 Relationship Between Shear Capacity and Fire Duration

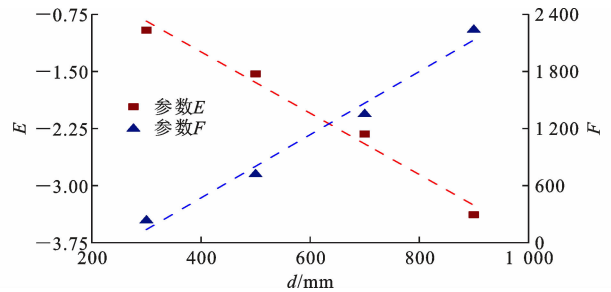


图 15 E, F 与截面长度 d 的关系

Fig. 15 Relationship Between E, F and Cross-section Length d

4 抗剪承载力计算

4.1 模拟结果与规范公式比较

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[26](以下简称《规范》)中 RC 柱斜截面抗剪承载力 V 计算公式为

$$V = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.07N \quad (13)$$

式中: λ 为试件的剪跨比; f_{yv} 为箍筋抗拉强度设计

值; A_{sv} 为箍筋的面积; s 为箍筋间距; b 为柱截面宽度; h_0 为柱截面的有效高度; N 为与剪力设计值 V 相应的轴向压力设计值,当 $N > 0.3f_cA$ 时,取 $0.3f_cA$, A 为试件的截面面积。

该公式将 RC 柱抗剪承载力分成三部分:混凝土抗剪承载力 V_c 、箍筋抗剪承载力 V_{sv} 和轴压力对抗剪承载力的有利影响系数 V_N 。

为研究受火时间和截面尺寸对 RC 柱抗剪承载力的影响,将模拟所得的抗剪承载力与式(12)计算结果进行了比较,见图 16,其中,纵坐标为模拟值与《规范》公式[式(13)]计算值的比值(安全系数)。受火时间 0.5 h 后的抗剪承载力由式(12)计算获得。从图 16 可以看出,随着受火时间增加,柱承载力安全系数呈减小的趋势,受火时间从 30 min 增加至 90 min 时,同一尺寸构件安全系数减小了 14% 以上。相同受火条件下,不同尺寸构件的安全系数亦不尽相同。因此,计算高温后钢筋混凝土柱的抗剪承载力时需要考虑温度和尺寸的影响。

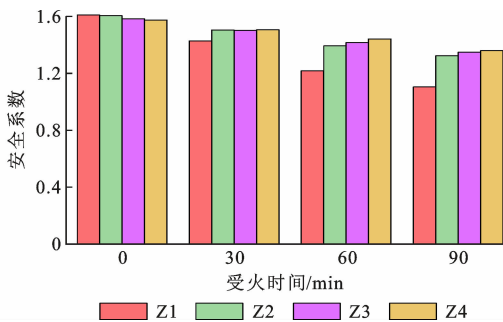


图 16 安全系数与截面尺寸、受火时间的关系

Fig. 16 Relationship Between Safety Coefficient and Cross-section Size, Fire Duration

4.2 对《规范》公式的修正

大量试验研究工作表明,常温下混凝土强度存在明显尺寸效应^[12-13,15-16],结合前文模拟结果分析可知,不同尺寸 RC 柱火灾后的抗剪承载力存在 2 个方面的影响:①混凝土材料强度尺寸效应的影响;②受火时间和构件尺寸的影响。本文在《规范》公式基础上引入 2 个参数综合考虑其影响,提出式(14)计算高温后钢筋混凝土柱的抗剪承载力 V_m 。

$$V_m = \frac{1.75}{\lambda + 1} \alpha_d \beta_{td} f_t b h_0 + 0.9 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.07 N \quad (14)$$

式中:0.9 为高温对箍筋受剪贡献的降低系数^[32];当 $N > 0.3\alpha_d \beta_{td} f_c A$ 时,取 $0.3\alpha_d \beta_{td} f_c A$; $\alpha_d \leq 1.0$,为材料强度尺寸效应影响系数,反映由于尺寸效应而带来的承载力减弱; $\beta_{td} \leq 1.0$,为受火时间和构件尺寸的影响系数。

4.2.1 常温下强度尺寸效应影响系数 α_d

Bazant^[33]根据断裂力学理论提出了适合混凝土材料和构件的尺寸效应理论公式,此处定义 α_d 为名义强度与混凝土材料强度之比($\alpha_d \leq 1.0$),即

$$\alpha_d = \frac{B}{\sqrt{1+d/D_0}} \quad (15)$$

式中: B, D_0 为通过回归分析得到的 2 个经验系数。

本文常温下安全系数 γ 约为 1.6,将前述常温下试验值 V_u^0 除以安全系数 1.6,并将其他参数代入到式(15)可求得各试件的 α_d 。为便于回归分析,将式(15)转化为线性方程,即

$$Y = A'X + C \quad (16)$$

$$\text{式中: } Y = 1/\alpha_d^2; X = d; A' = \frac{1}{D_0 B^2}; C = \frac{1}{B^2}.$$

将模拟数据进行线性拟合回归分析,可以得到式(15)的经验参数 $B = 1.04, D_0 = 6.00, \alpha_d = 1.04/\sqrt{1+d/6}$,考虑到 α_d 的性质及小尺寸试件实际情况,当 $\alpha_d > 1.0$ 时,取 $\alpha_d = 1.0$ 。

4.2.2 受火时间和构件尺寸的影响系数 β_{td}

高温后的安全系数 γ 也按 1.6 考虑,高温工况下 β_{td} 可表达为

$$\beta_{td} = \frac{V_u^0/\gamma - 0.9V_{sv} - V_N}{\alpha_d V_{c0}} \quad (17)$$

基于数值模拟结果, β_{td} 的计算值见表 4。

表 4 影响系数 β_{td} 取值

Table 4 Values of Influence Coefficient β_{td}

截面尺寸	不同受火时间(min)的 β_{td}		
	30	60	90
300 mm×300 mm	0.843	0.598	0.465
500 mm×500 mm	0.939	0.808	0.727
700 mm×700 mm	0.950	0.847	0.767
900 mm×900 mm	0.968	0.892	0.794

根据模拟结果分析可知,RC 短柱高温后的力学行为与受火时间和尺寸大小相关。由图 14,15 可知,RC 短柱承载力随受火时间增大而下降,采用式(18)的形式对影响系数 β_{td} 与受火时间、构件尺寸的关系进行回归分析,式中 K, M 为经验参数。

$$\beta_{td} = -K \frac{t}{d} + M \quad (18)$$

通过对表 4 数据进行二元回归分析,可得到 $K = 0.11, M = 1.03$,即 $\beta_{td} = -0.11t/d + 1.03$ 。式(18)中 $0.3 \text{ m} \leq d \leq 0.9 \text{ m}, 0.5 \text{ h} \leq t \leq 1.5 \text{ h}$,常温下 $\beta_{td} = 1.0$ 。

本文修正公式(14)的计算值与模拟结果 V_u^0 的对比见表 5,可知修正后的公式对高温后的大尺寸

表5 抗剪承载力计算值与试验值对比

Table 5 Comparison of Calculated and Test Values of

Shear Capacity

构件编号	抗剪承载力试验值/kN	抗剪承载力计算值/kN	安全系数
Z1-A	236.036	236.036	1.65
Z1-B	178.658	116.780	1.53
Z1-C	161.890	102.340	1.58
Z2-A	722.717	722.717	1.65
Z2-B	626.794	392.180	1.60
Z2-C	595.479	365.710	1.63
Z3-A	1 354.870	1 354.870	1.64
Z3-B	1 211.160	768.520	1.58
Z3-C	1 153.175	733.100	1.57
Z4-A	2 236.805	2 236.805	1.64
Z4-B	2 048.110	1 291.820	1.59
Z4-C	1 930.530	1 246.030	1.55

试件具有一定的安全保证率。

5 结 语

(1)火灾后截面温度场呈梯度分布,截面尺寸越大的RC短柱温差越大,受热越不均匀,角筋比其他纵筋升温快,保护层有助于延缓钢筋温度的升高。

(2)同一尺寸构件随受火时间增长,抗剪承载力降低,极限变形增大,位移延性系数下降,试件受火后抗侧刚度下降明显。

(3)试件的刚度在常温及高温后均受尺寸影响;试件高温后刚度退化总体较常温时平缓;高温后试件尺寸越大,刚度退化越迅速,混凝土开裂后的刚度退化速率高于开裂前。

(4)在数值模拟基础上,采用双参数法对《规范》公式进行修正,综合考虑尺寸效应和受火时间对钢筋混凝土柱抗剪承载力的影响,并具有一定的安全保证率。修正后的公式可供高温后大尺寸钢筋混凝土柱安全性鉴定参考。

参考文献:

References:

- [1] GERNAY T. Fire Resistance and Burnout Resistance of Reinforced Concrete Columns[J]. Fire Safety Journal, 2019, 104: 67-78.
- [2] MARTINS A M B, RODRIGUES J P C. Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns with Elastically Restrained Thermal Elongation [J]. Engineering Structures, 2010, 32(10): 3330-3337.
- [3] BIKHIET M M, EL-SHAFFEY N F, EL-HASHIMY H M. Behavior of Reinforced Concrete Short Columns

Exposed to Fire[J]. Alexandria Engineering Journal, 2014, 53(3): 643-653.

- [4] WU B, XU Y Y. Behavior of Axially-and-rotationally Restrained Concrete Columns with ‘+’-shaped Cross Section and Subjected to Fire[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(2): 212-218.
- [5] 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[J]. Fire Safety Journal, 2013, 59: 76-87.
- [6] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- WU Bo. Mechanical Properties of Reinforced Concrete Structures After Fire [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [7] 吴波, 马忠诚, 欧进萍. 高温后钢筋混凝土柱抗震性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 1999, 32(2): 53-58.
- WU Bo, MA Zhong-cheng, OU Jin-ping. Experimental Study on Seismic Properties of R. C. Columns After High Temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(2): 53-58.
- [8] BIKHIET M M, EL-SHAFFEY N F, EL-HASHIMY H M. Behavior of Reinforced Concrete Short Columns Exposed to Fire[J]. Alexandria Engineering Journal, 2014, 53(3): 643-653.
- [9] CHEN Y H, CHANG Y F, YAO G C, et al. Experimental Research on Post-fire Behavior of Reinforced Concrete Columns[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44: 741-748.
- [10] PROMIS G, FERRIER E, HAMELIN P. Effect of External FRP Retrofitting on Reinforced Concrete Short Columns for Seismic Strengthening [J]. Composite Structures, 2009, 88(3): 367-379.
- [11] HUANG L, XU L H, CHI Y, et al. Experimental Investigation on the Seismic Performance of Steel-polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete Columns [J]. Construction and Building Materials, 2015, 87: 16-27.
- [12] 杜修力, 金浏, 李冬. 混凝土与混凝土结构尺寸效应述评(I): 材料层次[J]. 土木工程学报, 2017, 50(9): 28-45.
- DU Xiu-li, JIN Liu, LI Dong. A State-of-the-art Review on the Size Effect of Concretes and Concrete Structures (I): Concrete Materials [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(9): 28-45.
- [13] 杜修力, 金浏, 李冬. 混凝土与混凝土结构尺寸效应述评(II): 构件层次[J]. 土木工程学报, 2017, 50

- (11):24-44.
DU Xiu-li, JIN Liu, LI Dong. A State-of-the-art Review on the Size Effect of Concretes and Concrete Structures (II): RC Members[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11):24-44.
- [14] LI D, JIN L, DU X L, et al. Size Effect Tests of Normal-strength and High-strength RC Columns Subjected to axial Compressive Loading [J]. Engineering Structures, 2016, 109:43-60.
- [15] 李振宝, 解咏平, 杜修力, 等. 钢筋混凝土短柱受剪性能尺寸效应研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(6):26-33.
LI Zhen-bao, XIE Yong-ping, DU Xiu-li, et al. Size Effect on Shear Behavior of Reinforced Concrete Short Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(6):26-33.
- [16] 张 帅, 金 浏, 李 冬, 等. 结构尺寸对钢筋混凝土短柱抗震性能影响: 细观分析[J]. 工程力学, 2018, 35(12):164-174.
ZHANG Shuai, JIN Liu, LI Dong, et al. Effect of Structural Size on Seismic Performance of Reinforced Concrete Short Columns — A Meso-scale Study[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(12):164-174.
- [17] HOOVER C G, BAZANT Z P. Cohesive Crack, Size Effect, Crack Band and Work-of-fracture Models Compared to Comprehensive concrete Fracture Tests [J]. International Journal of Fracture, 2014, 187(1):133-143.
- [18] JIN L, LI D, DU X L, et al. Experimental and Numerical Study on Size Effect in Eccentrically Loaded Stocky RC Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 143(2):04016170.
- [19] JIN L, LI X Y, ZHANG R B, et al. Meso-scale Modelling the Post-fire Seismic Behavior of RC Short Columns[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 120:105117.
- [20] 金 浏, 兰钰昌, 张仁波, 等. 高温下/后钢筋混凝土梁抗冲击性能: 细观分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50(2):116-126.
JIN Liu, LAN Yu-chang, ZHANG Ren-bo, et al. Impact Resistances of RC Beams at/After High Temperature: Meso-scale Analysis[J]. Scientia Sinica, Mechanica and Astronomica, 2020, 50(2):116-126.
- [21] HUANG Z. Modelling the Bond Between Concrete and Reinforcing Steel in a Fire[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11):3660-3669.
- [22] ISO-834, Fire-resistance Tests — Elements of Building Construction[S].
- [23] PURKISS J A. Fire Safety Engineering Design of Structures[M]. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [24] EN 1994-1-2; 2003, Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures — Part 1.2: General Rules — Structural Fire Design[S].
- [25] EN 1993-1-2; 2001, Eurocode 3: Design of Steel and Concrete Structures — Part 1.2: General Rules — Structural Fire Design[S].
- [26] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [27] 金 浏, 李满雅, 杜修力, 等. 火灾高温后钢筋混凝土短柱轴压性能数值分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(11):1509-1520.
JIN Liu, LI Xiao-ya, DU Xiu-li, et al. Numerical Analysis of Axial Compressive Behavior of Reinforced Concrete Short Columns After Exposure to Fire[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2020, 50(11):1509-1520.
- [28] EN 1991-1-2; 2002, Eurocode 1: Actions on Structures — Part 1-2: General Actions — Actions on Structures Exposed to Fire[S].
- [29] 杨清文. 火灾后钢筋混凝土短柱的抗震性能研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2012.
YANG Qing-wen. Study on Seismic Performance of Reinforced Concrete Short Columns After Fire[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2012.
- [30] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].
JGJ/T 101—2015, Specification for Seismic Test of Buildings[S].
- [31] GB 50011—2010, 建筑结构抗震设计规范[S].
GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [32] 徐玉野, 杨清文, 吴 波, 等. 高温后钢筋混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(8):12-19.
XU Yu-ye, YANG Qing-wen, WU Bo, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Reinforced Concrete Short Columns After Fire[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(8):12-19.
- [33] BAZANT Z P. Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(4):518-535.