

三面受火后混凝土短柱受剪承载力的数值计算

林碧兰¹, 李丹², 徐玉野²

(1. 厦门理工学院 材料科学与工程学院, 福建 厦门 361024;
2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于有限元软件 ABAQUS 建立火灾后混凝土短柱推覆过程的数值分析模型, 并对火灾后 7 根混凝土短柱的试验结果进行模拟分析, 建议模型分析参数. 分析水平力方向、受火时间、轴压比、剪跨比、截面尺寸、箍筋间距对三面受火后混凝土短柱受剪承载力的影响规律. 基于自编的有限元程序计算三面受火后混凝土截面抗压强度的平均折减系数, 提出三面受火后混凝土柱受剪承载力的实用计算方法. 研究结果表明: 数值模型对火灾后混凝土短柱受剪承载力的预测较准.

关键词: 钢筋混凝土; 短柱; 火灾; 受剪承载力; 数值模型

中图分类号: TU 375.3

文献标志码: A

火灾后混凝土结构的剩余承载性能是进行灾后结构鉴定和加固设计的基础, 目前已取得一定的进展^[1-6]. 徐玉野等^[1]编制了火灾后混凝土柱压弯性能的有限元分析程序, 并建立了火灾后混凝土方形柱剩余压弯承载力的实用计算公式. 唐跃峰等^[2]进行了火灾后混凝土受压柱的破坏形态、变形特点和剩余承载力等的试验研究. 吴波等^[3-4]进行了轴向约束混凝土柱火灾后轴压承载力和轴压刚度的试验研究, 以及火灾后混凝土柱强度、刚度、延性和滞回特性等抗震性能的试验研究. Chen 等^[5]进行了火灾后混凝土柱双向偏压力学性能的试验研究. Huo 等^[6]进行了有初始轴压力作用的混凝土短柱在全过程火灾后轴压承载力、刚度和延性的试验研究. 现有研究主要集中在火灾后混凝土柱式构件的正截面承载性能方面, 而有关其斜截面受剪性能方面的研究少有报道. 本文以较易发生剪切破坏的混凝土短柱为试验对象, 在 7 根四面受火后混凝土短柱和 1 根未受火混凝土短柱抗震性能的试验研究^[7-8]基础上, 进一步建立火灾后混凝土短柱推覆过程的有限元模型, 并建议三面受火后短柱受剪承载力实用计算式.

1 有限元模型及其试验验证

1.1 单元类型和网格划分

利用有限元软件 ABAQUS 建立数值分析模型. 高温下热分析时, 混凝土采用 8 节点三维实体单元 DC3D8, 钢筋采用 2 节点杆单元 DC1D2. 高温后推覆过程分析时, 混凝土采用三维实体 8 节点缩减积分单元 C3D8R, 钢筋采用忽略横向剪切作用的三维 2 节点杆单元 T3D2, 混凝土和钢筋间用 Embedded 进行自由度耦合, 不考虑钢筋和混凝土之间滑移. 高温后推覆过程分析的网格划分与高温下热分析的网格相同, 网格划分过程中, 混凝土以钢筋的位置进行切分, 确保划分过程中钢筋和混凝土共节点. 建立的混凝土短柱试件的有限元模型, 如图 1 所示.

1.2 材料性能

混凝土(硅质骨料)和钢筋的热工性能(包括热传导系数、体积比热、热膨胀系数)采用加拿大学者 Lie 等建议的公式^[9]. 高温后钢筋的力学性能基本能恢复, 假定其应力-应变关系与未受火时的相同,

收稿日期: 2014-01-20

通信作者: 徐玉野(1978-), 男, 副教授, 主要从事混凝土结构抗灾的研究. E-mail: yuyexu@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908091); 福建省自然科学基金资助项目(2012J05099, 2012J01221); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划资助项目(11FJRC03)

采用理想弹塑性模型. 混凝土采用塑性损伤本构模型, 经反复试算建议了塑性势能方程和屈服面方程的基本参数取值: 膨胀角为 45° ; 流动偏心率为 0.1; 混凝土双轴等压屈服强度与单轴抗压强度比值为 1.16; 拉压子午线上第二应力不变量比值为 $2/3$. 混凝土的受拉软化性能采用混凝土破坏能量准则描述, 对于 C20 混凝土, 断裂能取 $40 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; 对于 C40 混凝土, 断裂能取为 $120 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; 对于其他等级混凝土, 断裂能通过内插或外插得到^[10]. 高温后混凝土的受压应力-应变关系采用陆洲导建议的模型^[11].

1.3 边界条件和分析步骤

利用 ABAQUS 软件进行高温下温度场分析. 升温前, 试件内部各点温度均匀, 且等于环境温度. 升降温过程中, 环境温度一般取 ISO 834 标准升降温曲线, 但与试验结果对比时, 环境温度取试件明火试验时炉膛内实测升降温曲线, 炉壁温度取为 0.9 倍的炉膛温度. 受火面的对流换热系数取 $25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, 辐射系数取 $0.5 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$; 未受火面的对流换热系数取 $9 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$. 钢筋与混凝土之间采用点面 Tie 约束, 使得不同材料在几何位置相同的单元节点处具有同样的温度.

由于高温后钢筋和混凝土材料的本构关系主要与各点经历的最高过火温度有关, 因此, 利用 Python 编程语言对高温下温度场分析结果进行后处理. 编制 1 个循环嵌套程序, 对每个节点在每个分析步中经历的温度进行比较, 提取模型中各节点的编号和经历的最高过火温度存入可供后续计算读取的 temp.fil 文件, 将该文件从预定义场中导入 step-1 中, 作为火灾后推覆过程模拟的初始条件.

利用 ABAQUS 软件进行高温后混凝土短柱推覆过程的数值模拟. 试件底端按固定端约束, 分 2 个荷载步施加作用: 1) 建立参考点 RP1 与加载面耦合, 将竖向荷载施加于参考点上并保持恒定; 2) 建立参考点 RP2 与水平加载面耦合, 在 RP2 点上施加位移曲线进行水平位移控制加载. 通过建立参考点与加载面耦合可以避免直接施加集中力, 导致加载点过早开裂或压碎造成的收敛困难.

1.4 计算结果及分析

文献[7]进行了 7 根明火加热后钢筋混凝土短柱试件和 1 根未受火对比试件的低周反复荷载试验. 试件的截面尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 纵向钢筋采用对称配筋, 每侧配置 $3 \Phi 20$, 纵筋配筋率为 2.79%, 纵筋保护层厚度为 30 mm, 箍筋采用 $\Phi 8 @ 100$, 体积配箍率为 0.837%.

利用 ABAQUS 计算的温度-时间($\theta-t$)关系曲线与文献[7]的试件 Z2 和 Z4 中埋设的各测点实测结果对比, 如图 2 所示. 从图 2 可以看出: 1) 温度场分析结果与试验结果大体上吻合; 2) 数值模拟结果与试验结果之间存在误差的主要原因是数值模拟中未考虑水分蒸发和迁移的影响, 热电偶的埋设位置误差、热工参数本身存在一定离散性等原因也会造成一定误差.

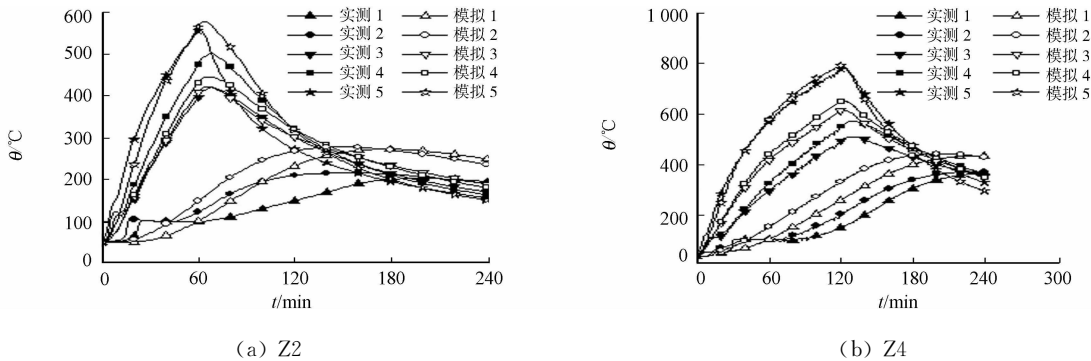


图 2 温度-时间关系曲线的数值模拟结果与试验结果的对比

Fig. 2 Comparison between numerical results and experimental results of the temperature-time curves

火灾后混凝土短柱受剪承载力的计算结果与文献[7]中试件 Z2~Z8 试验结果的对比情况, 如表 1 所示. 表 1 中: t_f 为受火时间; n 为轴压比; λ 为剪跨比; d 为箍筋直径; s 为箍筋间距; V_u 为受剪承载力实

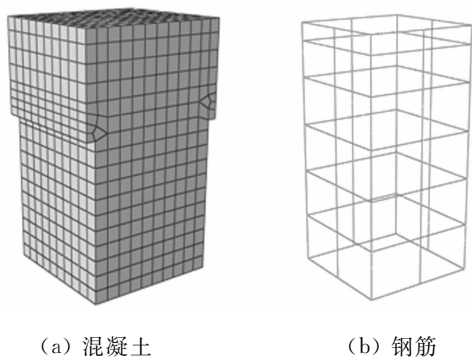


图 1 试件的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of the specimens

测值; V_u^c 为受剪承载力计算值; η 为计算值与实测值之间的相对误差. 从表 1 中可以看出:1) ABAQUS 对受剪承载力的模拟值与实测值吻合较好;2) 受剪承载力的计算值总体上略小于实测值,这可能是在温度场分析时未能考虑混凝土内水分蒸发和迁移的影响,导致内部混凝土最高过火温度的计算结果偏高,以及数值计算过程中未考虑过火温度对混凝土断裂能的影响.

表 1 受剪承载力的计算结果与试验结果的对比

Tab. 1 Comparison between numerical results and experimental results of shear strength

试件编号	t_f/h	n	λ	d/mm	s/mm	V_u^c/kN	V_u^e/kN	$\eta/\%$
Z2	1.0	0.2	1.78	8	100	297.4	273.6	-8.0
Z3	1.5	0.2	1.78	8	100	269.5	247.6	-8.1
Z4	2.0	0.2	1.78	8	100	230.8	219.3	-5.0
Z5	1.0	0.1	1.78	8	100	267.3	238.4	-10.8
Z6	1.0	0.3	1.78	8	100	288.3	294.0	2.0
Z7	1.5	0.2	1.58	8	100	284.2	281.9	-0.8
Z8	1.5	0.2	1.98	8	100	251.4	224.2	-10.8

火灾后混凝土短柱试件单向推覆过程的力-位移($F-\Delta$)关系曲线的计算值与文献[7]中试件 Z2~Z8 试验结果的对比情况,如图 3 所示. 从图 3 可以看出:ABAQUS 模拟的力-位移关系曲线的上升段趋势与试验值大致吻合,但模拟曲线的上升段斜率相对偏大,且下降段不明显. 力-位移关系曲线的试验值与计算值的差异除了上述最高过火温度计算的误差外,还可能由下列原因引起:1) 选择的火灾后材料本构关系与实际情况存在一定差异;2) 数值模拟未考虑钢筋与混凝土之间滑移和混凝土压碎、脱落的影响,这会使上升段斜率偏大.

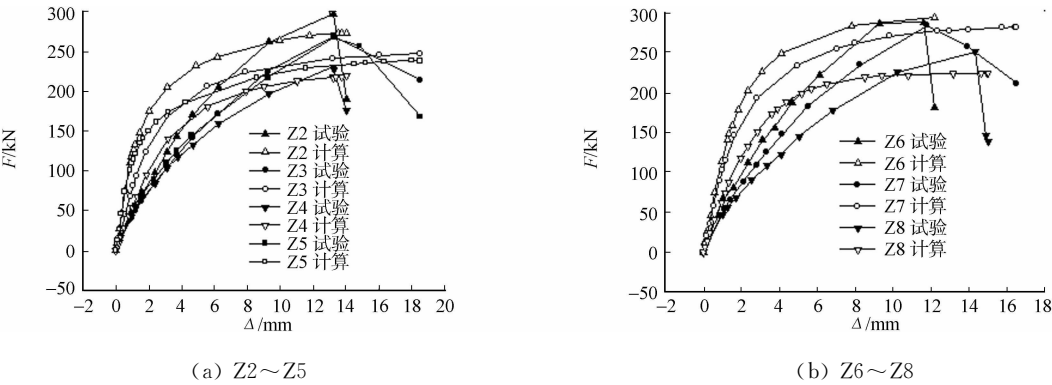


图 3 力-位移关系曲线的数值模拟结果与试验结果的对比

Fig. 3 Comparison of shear strength between numerical simulation and simplified calculation

2 影响因素分析

作为初步探讨,以三面受火后普通混凝土方形柱为研究对象,受火面的环境温度遵循 ISO 834 标准升降温曲线. 通过典型算例,分析水平力方向、受火时间、轴压比、剪跨比、截面尺寸、箍筋间距对受火后混凝土短柱受剪承载力的影响规律. 算例的基本条件:截面尺寸 a 为 300 mm;箍筋为 $\phi 8@100$;纵筋为 8 $\phi 20$;剪跨比 λ 为 1.78;受火时间 t_f 为 1 h;轴压比 n 为 0.2;混凝土保护层厚度 c 为 30 mm;纵筋与箍筋的屈服强度 f_y 分别为 484,425 MPa;混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 为 41.1 MPa. 当考察某些参数变化对受火后混凝土短柱受剪承载力的影响时,该部分参数再补充考虑其他取值情况.

对于三面受火的方式,当水平力沿对称轴方向时,水平力的方向存在 2 种可能,如图 4 所示. 图 4 中:方向 1 的受拉侧未受火,方向 2 的受压侧未受火. 2 种水平力方向下推覆过程的力-位移曲线,如图 5 所示. 从图 5 可以看出:1) 2 个方向的力-位移关系曲线大致重合,水平力的方向对三面受火后混凝土短柱推覆过程影响较小;2) 方向 1 的受剪承载力略小于方向 2,二者相差 1.4%. 水平荷载通常是反复荷载,受剪承载力是 2 个方向的较小值,因此,在后续的受剪承载力计算分析中,水平力的方向取方向 1.

三面受火后混凝土柱的受剪承载力 V_u 随受火时间 t 的变化情况,如图 6 所示. 从图 6 可以看出:三

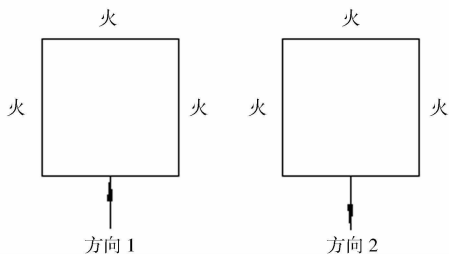


图 4 水平力加载方向

Fig. 4 Direction of horizontal force

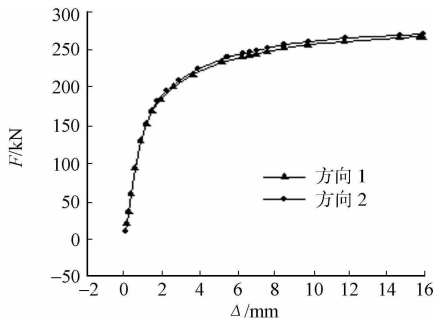


图 5 不同水平力方向下力-位移关系曲线

Fig. 5 Force-displacement curves for different load directions

面受火后短柱的受剪承载力随受火时间的增加近似呈线性降低。

三面受火后混凝土柱的受剪承载力 V_u 随轴压比 n 的变化情况,如图 7 所示。从图 7 可以看出:火灾后混凝土短柱的受剪承载力,当轴压比小于 0.3 时,随轴压比的增大而线性增大;当轴压比为 0.3~0.5 时,变化不大;当轴压比大于 0.5 时,随轴压比的增大反而下降。可见,轴压比在一定范围内对柱子的受剪承载力是有利的,这与未受火时轴压力对混凝土短柱受剪承载力的影响规律一致。

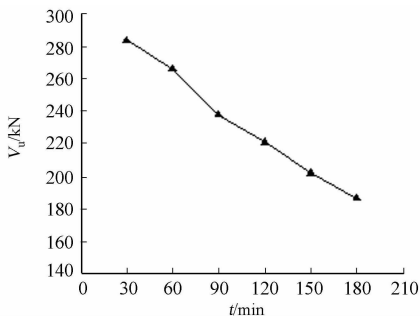


图 6 受剪承载力随受火时间的变化情况

Fig. 6 Variation of shear strength with fire exposure time

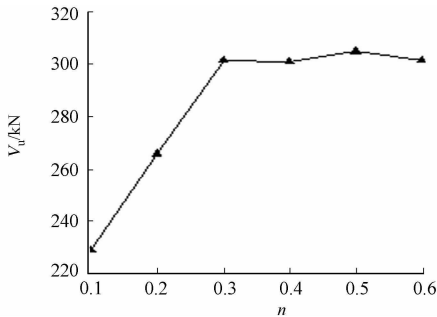


图 7 受剪承载力随轴压比的变化情况

Fig. 7 Variation of shear strength with axial compressive ratio

三面受火后混凝土柱的受剪承载力 V_u 随剪跨比 λ 的变化情况,如图 8 所示。从图 8 可以看出:火灾后柱子的受剪承载力随剪跨比的增大而降低。三面受火后混凝土柱的受剪承载力 V_u 随方形柱截面尺寸 a 的变化情况,如图 9 所示。从图 9 可以看出:火灾后柱子的受剪承载力随截面尺寸的增大呈线性增加。三面受火后混凝土柱的受剪承载力 V_u 随箍筋间距 s 的变化情况,如图 10 所示。从图 10 可以看出:火灾后柱子的受剪承载力随箍筋间距的增大呈线性降低。

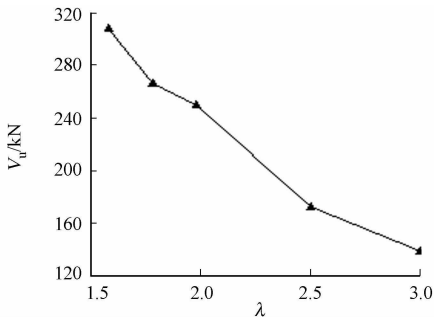


图 8 受剪承载力随剪跨比的变化情况

Fig. 8 Variation of shear strength with shear span ratio

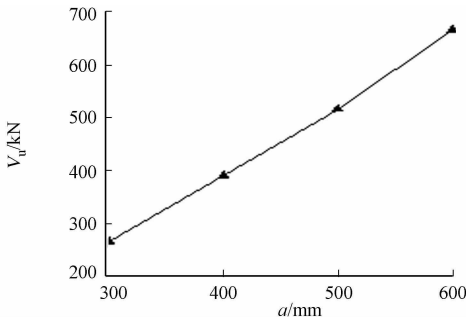


图 9 受剪承载力随截面尺寸的变化情况

Fig. 9 Variation of shear strength with sectional dimension

3 三面受火后混凝土柱受剪承载力的实用计算式

借鉴文献[12]中未受火钢筋混凝土柱受剪承载力的计算公式和第 2 节中分析得到的各参数的影响

规律,建议采用下式计算三面受火后混凝土柱的受剪承载力 V_u ,即

$$V_u = 0.9 \frac{1.75}{\lambda + 1} k_c f_t b h_0 + 0.9 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.07 N. \quad (1)$$

式(1)中: f_t 为混凝土轴心抗拉强度的设计值; f_{yv} 为箍筋抗拉强度的设计值; b 为柱截面的宽度; h_0 为柱截面的有效高度; A_{sv} 为配置的箍筋截面面积; s 为箍筋的间距; N 为与剪力设计值 V 相应的轴向压力设计值,当 N 大于 $0.3k_c f_c A$ 时,取 $0.3k_c f_c A$,此处, A 为构件的截面积, f_c 为混凝土轴心抗压强度的设计值, k_c 为三面受火后混凝土截面抗压强度的平均折减系数.式(1)中系数 k_c ,0.9(第二项式)是考虑火灾高温对混凝土、箍筋受剪贡献的降低.第一项式中 0.9 是考虑三面受火后混凝土短柱发生不对称烧损,截面的极强中心朝方向 1 的受拉侧偏移,相当于增大竖向荷载的偏心距,使受剪承载力降低.

将混凝土截面划分为很多网格,按文献[7]中给出的方法,利用有限元模型计算出混凝土截面内每个网格的最高过火温度,并代入火灾后混凝土的抗压强度公式,算出每个网格火灾后混凝土的抗压强度,进而计算出三面受火后混凝土截面抗压强度的平均折减系数 k_c . 其计算结果如表 2 所示.对于方形柱的其他截面尺寸和受火时间,通过查表插值可以算得 k_c .

对表 2 中的数据采用统计产品与服务解决方案(SPSS)软件进行非线性回归,可以得到 k_c 与截面尺寸 a ,受火时间 t 的关系式为

$$k_c = 0.747 + 0.953a - 0.294t + 0.0179t^2 - 0.799a^2 + 0.206at. \quad (2)$$

式(2)中: a,t 的单位分别为 m,h. 表 2 中的数据和式(2)的计算结果总体上吻合较好:二者的相关系数、后者与前者之比的平均值和均方差分别为 0.996,1.001 和 0.015.这表明式(2)具有较好的精度,可用于 k_c 的计算.

按照第 1 节的方法,利用 ABAQUS 进行 6 根混凝土柱三面受火后推覆过程分析,可计算得到其受剪承载力.利用简化计算公式(1)计算得到的受剪承载力 $V_{u,2}$ 与 ABAQUS 模拟计算的 6 根混凝土柱的受剪承载力 $V_{u,1}$ 的对比,如表 3 所示.表 3 中:试件编号 Zxxx-yyy,xxx 表示受火时间,单位为 min,yyy 表示轴压比.算例的基本参数:截面尺寸为 400 mm×400 mm;箍筋为 $\phi 8@100$;纵筋为 8 $\phi 20$;剪跨比 λ 为 1.78;受火时间为 60,120 min;轴压力 N 为 250,500,750 kN;纵筋与箍筋的屈服强度 f_y 分别为 484,425 MPa;混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 为 41.1 MPa;混凝土的轴心抗拉强度 f_t 为 2.43 MPa.从表 3 中可以看出:式(1)可用于三面受火后钢筋混凝土柱受剪承载力的实用计算.

表 3 受剪承载力模拟结果与简化计算结果的对比

Tab. 3 Comparison of simulation and simplified calculated shear strength

试件号	$V_{u,1}/\text{kN}$	$V_{u,2}/\text{kN}$	$V_{u,1}/V_{u,2}$	试件号	$V_{u,1}/\text{kN}$	$V_{u,2}/\text{kN}$	$V_{u,1}/V_{u,2}$
Z60-0.1	338.6	315.4	1.07	Z120-0.1	316.0	286.5	1.10
Z60-0.2	391.4	332.9	1.18	Z120-0.2	355.6	304.0	1.17
Z60-0.3	438.7	350.4	1.25	Z120-0.3	387.0	321.5	1.20

4 结论

基于有限元软件 ABAQUS 建立的火灾后混凝土短柱推覆过程的数值模型,分析相关因素对三面受火后混凝土短柱受剪承载力的影响规律,并借鉴现有规范公式,提出三面受火后混凝土柱受剪承载力的实用计算方法,可以得到以下 3 点主要结论.

1) 有限元软件 ABAQUS 对火灾后混凝土柱受剪承载力的预测较准.

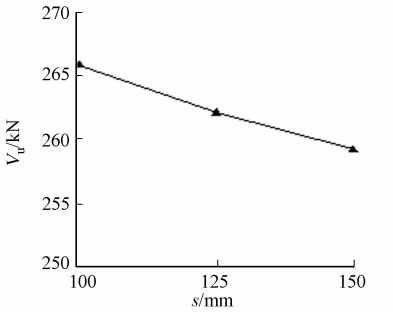


图 10 受剪承载力随箍筋间距的变化情况

Fig. 10 Variation of shear strength with stirrup spacing

2) 当水平力沿着三面受火后混凝土柱的对称面施加时,水平力的加载方向对三面受火后柱的受剪承载力影响不大.受火后混凝土短柱的受剪承载力随受火时间的增加、箍筋间距的增大近似呈线性降低,随截面尺寸的增大呈线性增加,随剪跨比的增大而降低.当轴压比小于 0.3 时,随轴压比的增大而线性增大;当轴压比为 0.3~0.5 时,变化不大;当轴压比大于 0.5 时,随轴压比的增大而降低.

3) 提出的三面受火后混凝土柱受剪承载力的计算式具有一定的安全保证率,可用于该类构件受剪性能的损伤评定.

参考文献：

[1] 徐玉野,王全凤.火灾后钢筋混凝土柱的剩余承载力研究[J].工程力学,2010,27(2):84-89.

[2] 唐跃峰,刘明哲,于长海,等.火灾后钢筋混凝土柱剩余承载力研究[J].宁波大学学报:理工版,2011,24(4):112-115.

[3] 吴波,李毅海.轴向约束钢筋混凝土柱火灾后剩余轴压性能的试验研究[J].土木工程学报,2010,43(4):85-91.

[4] 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.

[5] 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(5):741-748.

[6] HUO Jing-si,ZHANG Jia-guang,WANG Zhi-wei,et al. Effects of sustained axial load and cooling phase on post-fire behavior of reinforced concrete stub columns[J]. Fire Safety Journal,2013,59(7):76-87.

[7] 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.

[8] 林燕卿,徐玉野,杨清文,等.火灾后混凝土短柱的滞回性能和损伤评定[J].华侨大学学报:自然科学版,2013,34(5):563-569.

[9] LIE T T,CELIKKOL B. Method to calculate the fire resistance of circular reinforced concrete columns[J]. ACI Materials Journal,1991,88(1):84-91.

[10] 王玉钊,傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例详解[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:127-131.

[11] 陆洲导,朱伯龙,熊海贝,等.钢筋砼框架火灾后的加固修复研究[J].四川建筑科学研究,1995,21(3):7-12.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:56-57.

Numerical Calculation for the Shear Strength of Concrete Short Columns after 3-Face Heating

LIN Bi-lan¹, LI Dan², XU Yu-ye²

(1. College of Materials Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A numerical model for the push-over analysis of concrete short columns after fire was developed by ABAQUS, and some key finite element model parameters for the short columns were suggested through the numerical analysis of the tests of seven columns. The effects of horizontal force direction, fire exposure time, axial compressive ratio, shear span ratio, sectional dimension and stirrup spacing on the shear strength of concrete short columns after 3-face heating were investigated based on the numerical model. The average reduction coefficient of compressive strength in concrete sections after 3-face heating was calculated by a self-developed finite element program, and a practical calculation method for the shear strength of concrete columns after 3-face heating was proposed. The results indicate that: the shear strength of concrete short column after fire is well predicted by the established model.

Keywords: reinforced concrete; short column; fire; shear strength; numerical model

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)