

火灾下钢筋混凝土结构热弹塑性变形分析

王振清, 朱大雷, 韩玉来, 乔 牧

(哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要:为了研究钢筋混凝土结构在火灾作用下的力学性能,利用弹塑性理论,根据材料不同的屈服法则,分别给出了钢筋和混凝土材料考虑温度变形和徐变变形热弹塑性问题的增量本构方程。考虑钢筋和混凝土力学性能随温度的变化,编制程序对钢筋混凝土简支板进行了非线性分析,并利用相关文献的试验结果,对本构方程的正确性和适用性进行了验证。对火灾作用下 1 榀单层单跨钢筋混凝土框架进行了非线性分析,并给出了部分节点位移随受火时间的变化规律。结果表明,钢筋混凝土结构在高温下会产生很大变形,钢筋混凝土框架梁柱节点位移随受火时间变化的曲线并不是呈单调变化趋势,有拐点存在,梁柱节点竖向位移值小于梁跨中节点值。

关键词:火灾;钢筋混凝土;热弹塑性;本构方程;框架

中图分类号:TU313.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)01-0078-06

Deformation Analysis of Thermo-Elastic-Plastic on Reinforced Concrete Structure Subjected to Fire

WANG Zhen-qing, ZHU Da-lei, HAN Yu-lai, QIAO Mu

(College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, P. R. China)

Abstract: To investigate the mechanical behavior of reinforced concrete structure subjected to fire, the incremental thermo-elastic-plastic creep constitutive equations of steel and concrete in consideration of temperature and creep deformation were obtained based on different yield rules and the elastic-plastic theories. The nonlinear analysis for reinforced concrete simply supported slab was carried out with consideration the variation of the mechanical properties of steel and concrete with temperature. The effectiveness and applicability of the constitutive equations were verified with the test results from relevant literature. The nonlinear analysis was employed for one-bay one-storey reinforced concrete frame under fire and the variation of displacement at partial nodes was analysed. It was found that the reinforced concrete structure at a high temperature would have a significant deformation. And the displacement change curves of beam-column joints of reinforced concrete frame were not monotonous trend and there were inflexion points. The vertical displacement values of beam-column joints were less than those at midspan of cross-beam.

Key words: fire; reinforced concrete; thermo-elastic-plastic; constitutive equations; frame

钢筋混凝土结构是目前最常用的建筑结构形式之一,由于火灾的频繁发生促使许多专家学者对钢筋混凝土材料的高温力学性能和结构的抗火性能进

行了试验研究^[1-5],得到了许多可靠的数据。在理论分析方面学者们也进行了大量的研究工作,得到了一些高温下钢筋混凝土构件和结构的分析方法^[6-8]。

收稿日期:2009-06-28

基金项目:高等学校博士学科点科研专项基金(20060217010)

作者简介:王振清(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事防灾减灾工程断裂与损伤研究,(E-mail) wangzhenqing@hrbeu.edu.cn。

文献[9]研究了火灾高温对钢筋混凝土梁抗火性能的影响,建立了钢筋混凝土梁在火灾条件下的分析模型,并进行了数值计算;文献[10]在热弹塑性理论的基础上,考虑了材料性能随温度的变化,导出了钢筋混凝土受弯构件热弹塑性问题的应力-应变-温度耦合本构方程,并进行了有效的验证;文献[11]将混凝土分为弹性区和塑性区来分别计算其强度,建立了火灾场简支梁截面内混凝土应力和梁极限抗弯承载力的计算公式。

在钢筋混凝土结构中持续发展的高温使得强度和弹性模量等钢筋混凝土的力学性能大大降低,其应力处于弹性和弹塑性状态,并且混凝土和钢筋都具有显著的高温徐变效应^[12]。对于此类复杂问题,已不能采用解析法求解。基于此,根据混凝土和钢筋的不同屈服法则,推导出了火灾下钢筋混凝土考虑高温徐变的热弹塑性增量本构方程,通过对钢筋混凝土简支板分析,并与相关文献试验结果进行比较,使增量本构方程得到了验证。对火灾作用下1榀单层单跨钢筋混凝土框架进行了热弹塑性分析,并给出了部分节点位移随受火时间的变化规律。

1 热弹塑性徐变增量本构方程

火灾下钢筋混凝土构件内部温度场是瞬态的,而且分布很不均匀,材料的性能参数会随着温度的变化而变化。钢筋混凝土构件在火灾作用下属于复杂加载过程,全量型的本构方程已不能描述构件的整个加载路径,因此需建立温度、弹塑性、徐变等因素综合影响的增量本构方程。

对于同时考虑温度变形和徐变变形的情况,应变增量可以表示为:

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = d\boldsymbol{\varepsilon}^e + d\boldsymbol{\varepsilon}^p + d\boldsymbol{\varepsilon}^T + d\boldsymbol{\varepsilon}^c \quad (1)$$

式中 $d\boldsymbol{\varepsilon}$ 、 $d\boldsymbol{\varepsilon}^e$ 、 $d\boldsymbol{\varepsilon}^p$ 、 $d\boldsymbol{\varepsilon}^T$ 、 $d\boldsymbol{\varepsilon}^c$ 分别为总应变增量、弹性应变增量、塑性应变增量、温度应变增量和徐变应变增量。

火灾高温下,应力与弹性应变仍满足虎克定律 $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}_e : \boldsymbol{\varepsilon}^e$, 其增量形式为:

$$d\boldsymbol{\sigma} = d\mathbf{D}_e : \boldsymbol{\varepsilon}^e + \mathbf{D}_e : d\boldsymbol{\varepsilon}^e \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量, \mathbf{D}_e 为四阶弹性刚度张量,其表达式为:

$$\mathbf{D}_e = 2G\mathbf{I} + \lambda\mathbf{I} \quad (3)$$

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ 和 $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ 为拉梅常数, \mathbf{I} 为单位张量。需要指出的是这里的 E 和 ν 都是随温度变化的。

将式(1)代入式(2),则可以得到以弹性张量 \mathbf{D}_e

表示的增量应力应变关系,即:

$$d\boldsymbol{\sigma} = d\mathbf{D}_e : \boldsymbol{\varepsilon}^e + \mathbf{D}_e : (d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}^p - d\boldsymbol{\varepsilon}^T - d\boldsymbol{\varepsilon}^c) \quad (4)$$

温度应变为 $\boldsymbol{\varepsilon}^T = \alpha(T - T_0)\mathbf{I}$, 其增量形式为:

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^T = [(T - T_0) \frac{d\alpha}{dT} + \alpha] dT \mathbf{I} \quad (5)$$

式中 $T_0 = 20^\circ\text{C}$, α 为材料热膨胀系数。

设高温下材料的屈服函数表达式为:

$$F(\boldsymbol{\sigma}, K) = 0 \quad (6)$$

式中 $K = K(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_p, T)$, 其中 $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_p$ 为等效塑性应变。

采用相关联的流动法则,即塑性势面和屈服面重合,并且流动方向与屈服面正交,用数学公式表示这一假定,则有:

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (7)$$

式中 $d\lambda$ 为非负的待定因子。则有:

$$d\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_p = \left(\frac{2}{3} d\boldsymbol{\varepsilon}^p : d\boldsymbol{\varepsilon}^p\right)^{1/2} = d\lambda \left(\frac{2}{3} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}\right)^{1/2} \quad (8)$$

加载时应力点 $\boldsymbol{\sigma}$ 必须保持在加载面上,根据一致性条件则有 $dF = 0$, 由式(6)可得:

$$dF = \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} d\boldsymbol{\sigma} + \frac{\partial F}{\partial K} dK = 0 \quad (9)$$

由 $K = K(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_p, T)$ 可得:

$$dK = H' d\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_p + \frac{\partial K}{\partial T} dT \quad (10)$$

式中 $H' = \frac{\partial K}{\partial \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_p}$ 。

将式(10)代入式(9)后得:

$$dF = \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : d\boldsymbol{\sigma} + H' \frac{\partial F}{\partial K} d\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_p + \frac{\partial F}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial T} dT = 0 \quad (11)$$

徐变规律在空间应力状态下可表示为^[13]:

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^c = \varphi(\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^c, T, t) dt \quad (12)$$

则徐变应变增量为:

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^c = \frac{3\varphi}{2} s dt \quad (13)$$

式中 $d\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^c$ 、 $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ 、 $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^c$ 、 s 、 T 、 t 分别为等效徐变应变增量、等效徐变应变、等效应力、应力偏量张量、温度和时间。

将式(5)、(7)、(13)代入式(4),并考虑到(8)式,整理后得应力增量:

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}_e : \left(d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}^c - \frac{d\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_p}{\left(\frac{2}{3} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}\right)^{1/2}} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} - d\boldsymbol{\varepsilon}^c \right) \quad (14)$$

式中 $d\boldsymbol{\varepsilon}^0$ 为:

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^0 = \left(\frac{d\mathbf{D}_e^{-1}}{dT} : \boldsymbol{\sigma} + (T - T_0) \frac{d\alpha}{dT} \mathbf{I} + \alpha \mathbf{I} \right) dT \quad (15)$$

此项为火灾下混凝土和钢筋的材料属性随温度变化产生的应变增量。

将式(14)左乘 $\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}$, 并利用式(11)可得:

$$d\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_p = \frac{\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : \mathbf{D}_e : (d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}^0 - d\boldsymbol{\varepsilon}^c) + \frac{\partial F}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial T} dT}{\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : \mathbf{D}_e : \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \left(\frac{2}{3} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right)^{-\frac{1}{2}} - H' \frac{\partial F}{\partial K}} \quad (16)$$

将 $d\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_p$ 代入式(14), 即可得到火灾下钢筋混凝土构件考虑高温徐变的一般热弹塑性本构方程:

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}_{ep} : (d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}^0 - d\boldsymbol{\varepsilon}^c) - d\boldsymbol{\sigma}^0 \quad (17)$$

考虑到材料参数随温度的变化, 则有:

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}_{epT} : (d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}^0 - d\boldsymbol{\varepsilon}^c) - d\boldsymbol{\sigma}^0 \quad (18)$$

式中 \mathbf{D}_{epT} 为热弹塑性矩阵, 其表达式为 $\mathbf{D}_{epT} = \mathbf{D}_{eT} - \mathbf{D}_{pT}$, \mathbf{D}_{eT} 和 \mathbf{D}_{pT} 分别为热弹性矩阵和热塑性矩阵, 且有

$$\mathbf{D}_{pT} = \frac{\mathbf{D}_{eT} : \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \otimes \left(\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right)^T : \mathbf{D}_{eT}}{-H' \left(\frac{2}{3} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\partial F}{\partial K} + \left(\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right)^T : \mathbf{D}_{eT} : \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}} \quad (19)$$

$d\boldsymbol{\sigma}^0$ 为初始应力增量, 其表达式为:

$$d\boldsymbol{\sigma}^0 = \frac{\mathbf{D}_{eT} : \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \frac{\partial F}{\partial K} \frac{\partial K}{\partial T} dT}{-H' \left(\frac{2}{3} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} : \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\partial F}{\partial K} + \left(\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right)^T : \mathbf{D}_{eT} : \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}} \quad (20)$$

2 火灾下混凝土的热弹塑性徐变本构方程

常温下对于混凝土材料, 屈服函数一般可表示为:

$$F(\boldsymbol{\sigma}, K) = F(\boldsymbol{\sigma}) - K = 0 \quad (21)$$

式中 K 表示与加载史塑性功有关的参数, 它反映了混凝土材料内部性质或状态的改变。 $F(\boldsymbol{\sigma})$ 为应力张量不变量的标量函数, 对于混凝土等摩擦性材料通常采用 Drucker-Prager 屈服函数^[14]。在研究火

灾作用下混凝土的热弹塑性徐变模型时采用 Drucker-Prager 屈服函数, 其屈服条件为:

$$F(\boldsymbol{\sigma}, K) = \beta \mathbf{I}_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (22)$$

式中:

$$\mathbf{I}_1 = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{I} = \text{tr} \boldsymbol{\sigma} \quad (23)$$

应力张量 $\boldsymbol{\sigma}$ 可以写成 2 部分之和, 即:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{s} + \boldsymbol{\sigma}_m \mathbf{I} \quad (24)$$

其中 \mathbf{s} 为应力偏量张量, $\boldsymbol{\sigma}_m$ 为静水应力, 也称为平均主应力, 可由下式确定:

$$\boldsymbol{\sigma}_m = \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{I} \quad (25)$$

由上面 3 式可知:

$$\mathbf{s} : \mathbf{I} = 0 \quad (26)$$

则式(22)中的 J_2 可表示为:

$$J_2 = \frac{1}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s} = \frac{1}{2} (s_\rho)^2 \quad (27)$$

式中 $s_\rho = (\mathbf{s} : \mathbf{s})^{\frac{1}{2}}$ 为应力偏量 \mathbf{s} 的模。

β, K 为与混凝土材料性质有关的参数。日本学者野口博^[15]建议:

$$\beta = 0.07, K = -\frac{0.88}{\sqrt{3}} |f_{cpT}| \quad (28)$$

其中 f_{cpT} 为高温下混凝土柱体抗压强度, 按文献[4]所给公式进行计算。

由式(22)和式(28)可知:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = 0.07 \mathbf{I} + \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{s} \\ \frac{\partial F}{\partial K} = -1 \\ \frac{\partial K}{\partial T} = -\frac{0.88}{\sqrt{3}} \frac{\partial f_{cyT}}{\partial T} \end{cases} \quad (29)$$

式中 $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ 为等效应力。

将式(29)代入式(18)–(20)可得火灾下混凝土的热弹塑性徐变本构方程:

$$d\boldsymbol{\sigma}_c = \mathbf{D}_{cepT} : (d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}^0 - d\boldsymbol{\varepsilon}^c) - d\boldsymbol{\sigma}_c^0 \quad (30)$$

式中 $d\boldsymbol{\sigma}_c$ 为混凝土应力增量。混凝土热弹塑性矩阵为:

$$\mathbf{D}_{cepT} = \mathbf{D}_{ceT} - \mathbf{D}_{cpT} = \mathbf{D}_{ceT} - \frac{\mathbf{D}_{ceT} : \left(0.07 \mathbf{I} + \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{s} \right) \otimes \left(0.07 \mathbf{I} + \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{s}^T \right) : \mathbf{D}_{ceT}}{H' \left[\frac{2}{3} \left(0.07 \mathbf{I} + \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{s} \right) : \left(0.07 \mathbf{I} + \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{s} \right) \right]^{\frac{1}{2}} + \left(0.07 \mathbf{I} + \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{s}^T \right) : \mathbf{D}_{ceT} : \left(0.07 \mathbf{I} + \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{s} \right)} \quad (31)$$

混凝土的初始应力增量 $d\boldsymbol{\sigma}_c^0$ 为:

$$d\boldsymbol{\sigma}_c^0 = \frac{\frac{0.88}{\sqrt{3}} \mathbf{D}_{ceT} : \left(0.07 \mathbf{I} + \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{s} \right) \frac{\partial f_{cyT}}{\partial T} dT}{H' \left[\frac{2}{3} \left(0.07 \mathbf{I} + \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{s} \right) : \left(0.07 \mathbf{I} + \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{s} \right) \right]^{\frac{1}{2}} + \left(0.07 \mathbf{I} + \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{s}^T \right) : \mathbf{D}_{ceT} : \left(0.07 \mathbf{I} + \frac{\sqrt{3}}{2} \mathbf{s} \right)} \quad (32)$$

3 火灾下钢筋的热弹塑性徐变本构方程

由于材料在考虑温度影响和不考虑温度影响时的后继屈服面在形式上式相似的,因此对于钢筋我们采用 Von-Mises 屈服条件,按各向同性硬化准则,则后继屈服函数可表示为:

$$F(\boldsymbol{\sigma}, K) = \frac{1}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s} - K(\bar{\boldsymbol{\epsilon}}_p, T) = 0 \quad (33)$$

由此可知:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{s} \\ \frac{\partial F}{\partial K} = -1 \end{cases} \quad (34)$$

将式(34)代入式(18)–(20)可得火灾下钢筋的热弹塑性徐变本构方程:

$$d\boldsymbol{\sigma}_s = \mathbf{D}_{sepT} : (d\boldsymbol{\epsilon} - d\boldsymbol{\epsilon}^0 - d\boldsymbol{\epsilon}^c) - d\boldsymbol{\sigma}_s^0 \quad (35)$$

式中 $d\boldsymbol{\sigma}_s$ 为钢筋应力增量。钢筋热弹塑性矩阵为:

$$\mathbf{D}_{sepT} = \mathbf{D}_{seT} - \mathbf{D}_{spT} = \mathbf{D}_{seT} - \frac{\mathbf{D}_{seT} : \mathbf{s} \otimes \mathbf{s}^T : \mathbf{D}_{seT}}{H'(\frac{2}{3} \mathbf{s} : \mathbf{s})^{\frac{1}{2}} + \mathbf{s}^T : \mathbf{D}_{seT} : \mathbf{s}} \quad (36)$$

钢筋的初始应力增量 $d\boldsymbol{\sigma}_s^0$ 为:

$$d\boldsymbol{\sigma}_s^0 = - \frac{\mathbf{D}_{seT} : \mathbf{s} \frac{\partial K}{\partial T} dT}{H'(\frac{2}{3} \mathbf{s} : \mathbf{s})^{\frac{1}{2}} + \mathbf{s}^T : \mathbf{D}_{seT} : \mathbf{s}} \quad (37)$$

4 结构非线性分析

在结构分析过程中采用平面有限元模型,如图 1 所示。混凝土采用矩形单元进行划分,忽略钢筋的横向抗剪作用,可将其作为一位杆单元来处理。考虑钢筋和混凝土的材料非线性和徐变应变、温度应变的结构增量平衡方程可表示为:

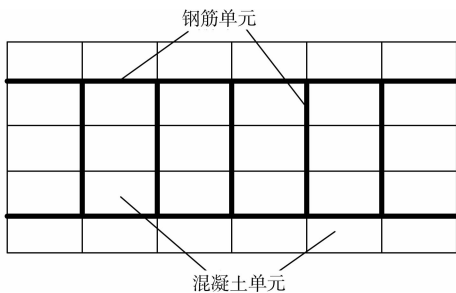


图 1 钢筋混凝土单元模型

$$\{\Delta P\} = [K_e] \{\Delta \delta\} \quad (38)$$

其中

$$\{\Delta P\} = \{\Delta P\}^j + \{\Delta P\}^c + \{\Delta P\}^T \quad (39)$$

式中: $[K_e]$ 为弹性刚度矩阵, $\{\Delta P\}^j$ 为外结点荷载增量列阵, $\{\Delta P\}^c$ 和 $\{\Delta P\}^T$ 分别为徐变应变和温度

应变产生的等效结点荷载增量列阵,按下式计算:

$$\{\Delta P\}^c = \int_v [B]^T [E_c] \{\Delta \boldsymbol{\epsilon}^c\} dv \quad (40)$$

$$\{\Delta P\}^T = \int_v [B]^T [E_c] \{\Delta \boldsymbol{\epsilon}^T\} dv \quad (41)$$

式中 $[B]$ 为应变矩阵。

在 t_{i-1} 时刻,结点位移 $\{\delta\}$ 、总应变 $\{\boldsymbol{\epsilon}\}$ 、材料徐变应变 $\{\boldsymbol{\epsilon}^c\}$ 、温度应变 $\{\boldsymbol{\epsilon}^T\}$ 和结构各部分的应力 $\{\boldsymbol{\sigma}\}$ 均已知,计算出 t_{i-1} 和 t_i 时刻内由于钢筋和混凝土徐变、温度变化所发生的应变增量 $\{\Delta \boldsymbol{\epsilon}^c\}_i$ 和 $\{\Delta \boldsymbol{\epsilon}^T\}_i$, 然后根据式(40)和式(41)计算出 t_i 时刻的等效结点荷载增量 $\{\Delta P\}_i^c$ 和 $\{\Delta P\}_i^T$, 将其代入式(39)可得荷载增量 $\{\Delta P\}_i$ 。将 $\{\Delta P\}_i$ 分成 n 个荷载增量 $\{\Delta P\}$, 对每一荷载步长进行增量荷载分析。根据式(38)求出以刚度矩阵表示的位移增量 $\{\Delta \delta\}$, 转换到局部坐标系中根据单元端结点位移增量,采用本文推导的钢筋和混凝土的热弹塑性徐变增量本构方程计算出应变增量 $\{\Delta \boldsymbol{\epsilon}\}$, 由此可得总力学应变增量,再根据增量本构方程可得材料的切线弹性模量,进而得到单元的刚度矩阵。此时式(38)中 $\{\Delta P\}$ 和 $[K_e]$ 均已知,位移增量 $\{\Delta \delta\}$ 可求,进而可求出结构的结点位移 $\{\delta\}$ 。

5 试验验证

为了验证推导的火灾下钢筋和混凝土的热弹塑性徐变本构方程和求解方法的合理性和可靠性,编制了程序对文献[2]中的钢筋混凝土简支板试验进行了数值模拟,所受活荷载为 2.0 kN/m^2 ,板底保护层厚度为 20 mm ,采用 C30 混凝土,受力筋和分布筋均采用 I 级钢,其尺寸和配筋情况如图 2。混凝土破坏准则按应变值来确定,如下

$$\boldsymbol{\epsilon} \leq \boldsymbol{\epsilon}_{cu} = 0.0033 \quad (42)$$

当满足式(42)时,即认为当某点的应变达到极限值时就发生破坏。

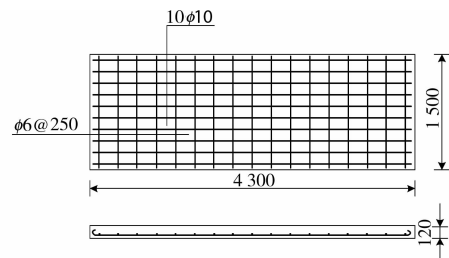


图 2 板的尺寸、配筋示意图

图 3 为计算所得的板在高温下的跨中挠度值与试验结果的比较情况。从图中可以看出利用推导的火灾下钢筋和混凝土的热弹塑性徐变本构方程求解

得出的挠度值与文献[2]所给的挠度试验值变化趋势保持一致,总体上吻合较好,这表明采用推导得出的钢筋和混凝土热弹塑性徐变增量本构方程进行高温计算分析是可行的,具有一定的适用性和有效性。

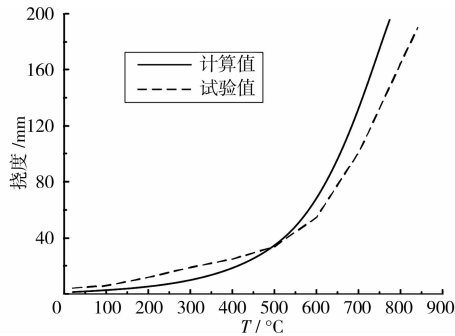


图 3 板跨中挠度-温度曲线

6 火灾下钢筋混凝土框架变形分析

采用推导的钢筋和混凝土热弹塑性本构方程对 1 榀单层单跨钢筋混凝土框架进行非线性分析。框架的尺寸和配筋方式如图 4 所示。在计算过程中梁和柱均按 3 面受火考虑,梁和柱按刚性连接考虑。为了分析简便,对框架上的典型节点 A 和 B 进行变形分析,如图 5 所示。

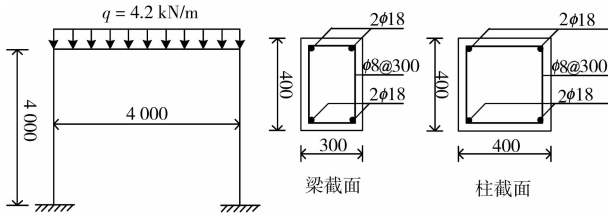


图 4 框架的尺寸和配筋方式

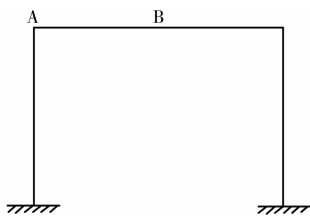


图 5 节点示意图

图 6—8 所示为节点 A 的水平、竖向位移和节点 B 的竖向位移。从图中可以看出:

1)在火灾高温作用下,梁产生轴向膨胀伸长,柱内侧受火使得柱产生向外弯曲的趋势,因此节点 A 在受火初期处于负向增长状态;随着温度的升高,柱外侧温度也随之升高,使得柱向外弯曲的趋势有所减弱甚至产生反向位移;当受火时间达到 90 min 左右时,由于柱的刚度大幅度降低,而梁的轴向高温膨胀仍在继续,因此节点 A 位移继续产生负向位移。

2)节点 A 和节点 B 的竖向位移变化趋势基本相同。由于火灾高温作用,在框架刚受火时,柱会产生竖向的伸长,因此节点 A 和 B 都产生正向位移;当温度继续升高时,柱产生向外弯曲并且随着材料的刚度降低,节点 A 和 B 的竖向位移始终保持负向增大趋势,直至框架破坏。由于节点 A 受到柱的约束作用,因此其竖向位移始终小于节点 B 值。

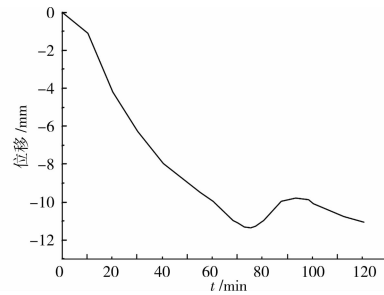


图 6 节点 A 的水平位移

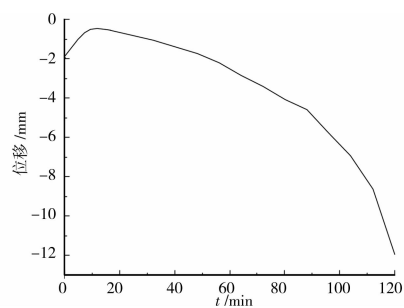


图 7 节点 A 的竖向位移

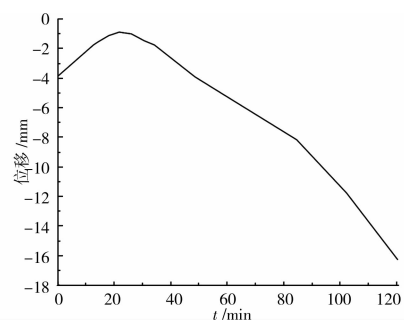


图 8 节点 B 的竖向位移

7 结论

基于热弹塑性徐变理论,考虑了材料性能随温度的变化,并根据混凝土和钢筋材料不同的屈服法则,导出了混凝土和钢筋材料热弹塑性徐变问题的增量本构方程。通过相关文献的试验结果对推导所得的本构方程进行了有效的验证。选取 1 榀单层单跨钢筋混凝土框架进行非线性分析,并得到以下结论:

1)钢筋混凝土结构在高温作用下截面刚度的降低主要是混凝土和钢筋弹性模量的降低,并且由于

高温膨胀作用,框架会产生很大变形。

2)火灾高温作用下,由于截面刚度的降低和高温膨胀作用,钢筋混凝土框架梁柱节点位移随受火时间变化的曲线并不是呈现单调变化趋势,有拐点存在。

3)框架梁跨中节点竖向位移与梁柱节点竖向位移变化趋势基本相同,由于柱的约束作用,梁柱节点竖向位移值小于梁跨中节点值。

参考文献:

- [1] LI GUO-QIANG, JIANG SHOU-CHAO, YIN YING-ZHI, et al. Experimental studies on the properties of constructional steel at elevated temperatures [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(12): 1717-1721.
- [2] 李晓东,董毓利,陈礼刚. 钢筋混凝土简支板火灾行为的试验研究[J]. 建筑技术, 2004, 35(4): 252-253.
LI XIAO-DONG, DONG YU-LI, CHEN LI-GANG. Testing study of behavior of simple supported reinforced concrete slabs under fire [J]. Architecture Technology, 2004, 35(4): 252-253.
- [3] 时旭东,过镇海. 高温下钢筋混凝土框架的受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(1): 36-45.
SHI XU-DONG, GUO ZHEN-HAI. Experimental investigation of behaviors of reinforced concrete frames at elevated temperature [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(1): 36-45.
- [4] 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[J]. 土木工程学报, 1993, 26(5): 58-69.
GUO ZHEN-HAI, LI WEI. Deformation testing and constitutive relationship of concrete under different stress-temperature paths [J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26(5): 58-69.
- [5] 钮宏,陆州导,陈磊. 高温下钢筋与混凝土本构关系的试验研究[J]. 同济大学学报, 1990, 18(3): 287-297.
NIU HONG, LU ZHOU-DAO, CHEN LEI. An experimental study of constitutive relationship between reinforced bar and concrete under elevated temperature [J]. Journal of Tongji University, 1990, 18(3): 287-297.
- [6] DANIEL DI CAPUA, ANTONIO R MARI. Nonlinear analysis of reinforced concrete cross-sections exposed to fire [J]. Fire Safty Journal, 2007, 42(2): 139-149.
- [7] KANG SEONGHOON, IM YONGTAEK. Three-dimensional thermo-elastic-plastic finite element modeling of quenching processs of plain-carbon steel in couple with phase transformation [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2007, 49: 423-439.
- [8] NECHNECH W, MEFTAH F, REYNOUARD J M. An elasto-plastic damage model for plain concrete subjected to high temperatures [J]. Engineering Structure, 2002, 24: 597-611.
- [9] DWAIKAT M B, KODUR V K R. A numerical approach for modeling the fire induced restraint effects in reinforced concrete beams [J]. Fire Safety Journal, 2007, 43(4): 291-307.
- [10] 王振清,苏娟,韩玉来,等. 火灾下钢筋混凝土受弯构件的弹塑性分析[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(2): 66-69.
WANG ZHEN-QING, SU JUAN, HAN YU-LAI, et al. Analysis of elastic-plastic of reinforced concrete flexural members under fire [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(2): 66-69.
- [11] 韩玉来,王振清,王永军,等. 火灾场钢筋混凝土简支梁抗弯性能分析[J]. 海军工程大学学报, 2007, 19(1): 76-80.
HAN YU-LAI, WANG ZHEN-QING, WANG YONG-JUN, et al. Analysis of bending capability of a reinforced concrete beam supported at both ends in fired field [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2007, 19(1): 76-80.
- [12] SEBASTJAN BRATINA, MIRAN SAJE, IGOR PLANINC. The effects of different strain contributions on the response of RC beams in fire [J]. Engineering Structures, 2006, 29(3): 418-430.
- [13] 穆霞英. 蠕变力学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1990.
- [14] DRUCKER D C, PRAGER W. Soil Mechanics and Plastic Analysis of Limit Design [J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1952, 10(2): 157-165.
- [15] 朱伯龙,董振祥. 钢筋混凝土非线性分析[M]. 上海:同济大学出版社, 1985.

(编辑 胡英奎)