

文章编号: 1006-7329(1999)03-0041-04

钢筋混凝土火灾下热湿耦合热过程研究

8
41-44

冯雅¹, 陈启高¹, 王尔其²

TU(375.01
TU111-1

(1. 重庆建筑大学 城市规划学院 400045; 2 中国建筑西南设计研究院, 成都 610081)

摘要 对钢筋混凝土在火灾高温作用下热湿迁移机理进行分析, 提出了混凝土在高温作用下热湿传递模型, 通过数值模拟和实测数据分析, 表明模型基本能反映混凝土在火灾作用下的实际过程。

关键词 火灾; 热湿传递; 钢筋混凝土

中图分类号 TU111.1 TU111.22 **文献标识码** A

在火灾温度作用下, 钢筋混凝土构件温度场的确定, 是建筑结构烧损程度强度和弹性模量力学性能评估中一项重要内容。也是计算钢筋混凝土构件火灾后的残存强度和制定修复加固方案的主要依据。但在进行钢筋混凝土构件受火灾温度作用计算分析时, 国内所进行的研究^[1,2,3], 基本未涉及材料中含湿量和化学分解而引起的相变蒸发影响, 国外有关文献[4,5,6]所进行的研究也主要采用材料干燥过程中热湿迁移模型。因此, 忽视材料构件在高温作用下, 材料内部空隙所含自由水、物理吸附水和结晶水脱水相变所产生的温度停滞现象, 以及材料化学变化所产生的热过程, 用一般常物性热传导方程来描述钢筋混凝土在高温作用下复杂的热、湿迁移过程, 这与实际热过程尚有一定的距离。本文尝试采用热、湿迁移耦合模型来描述这一热过程, 通过数值模拟和实验测试, 验证所建立混凝土构件受火灾作用模型的正确性来分析这一过程的变化规律。

1 混凝土构件热、湿传递模型

1.1 数学物理模型

混凝土是由粗、细骨料(碎石)、水泥、沙、水等构成的多孔材料, 材料中含有物理吸附水、结晶水和部分液态水和水蒸汽, 当材料在火灾作用下, 温度迅速增加, 材料内部吸附平衡受到破坏, 物理吸附水脱出变为水蒸汽。随着温度升高, 水泥中所含结晶水分解以及化学热过程产生, 使材料内部形成热、水份耦合传递的热过程。本文根据 Luikov 非平衡热力学关系式和文献[7]中有关多孔材料内部热、水份迁移基本模型, 建立混凝土在火灾高温作用下热过程模型。

$$\begin{cases} \rho C \frac{\partial t}{\partial \tau} = \nabla (\lambda + L \rho_1 D_T) \nabla t + \nabla (L \rho_1 D_w) \nabla u \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} = \nabla (D_s \nabla u) + \nabla (D_T \nabla T) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u 材料中含水率 (kg/kg); τ 时间 (s); t 温度 (K); ρ 混凝土密度 (kg/m³); λ 导热系数 (W/m·K); C 混凝土比热 (J/kg·K); D_T 材料中水份热扩散系数 (m²/s·K); D_w 水分等温扩散系数 (m²/s); D_s 材料中水蒸汽等温度扩散系数 (m²/s); L 为水的汽化潜热, 它包括物理吸附水脱水, 结晶水热分解和液体水汽化潜热三部分 (J/kg); ρ_1 水蒸汽的密度 (kg/m³)。

边界条件: 在混凝土火灾过程中, 表面存在辐射换热和对流换热二种形式, 在边界上热平衡方

收稿日期: 1998-09-11

作者简介: 冯雅, (1959-), 男, 四川雅安市人, 重庆建筑大学博士, 高级工程师, 从事建筑热工研究。

程可表示为:

$$-\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial n} + L \rho_1 D_w \frac{\partial u}{\partial n}\right) \Big|_{\Gamma} = h_c (t_s - t_a) + q_{rad} \quad (2)$$

式中, $\lambda = \lambda + L \rho_1 D_T$ 为混凝土综合导热系数; h_c 对流换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$); t_s 混凝土表面温度; t_a 混凝土受火灾时环境温度, 考虑混凝土为灰体, 则

$$q_{rad} = \epsilon_r \sigma (T_a^4 - T_s^4) \quad (3)$$

将(3)式代入(2)有

$$-\left(\lambda_c \frac{\partial t}{\partial n} + L \rho_1 D_w \frac{\partial u}{\partial n}\right) \Big|_{\Gamma} = h (t_s^4 - t_a^4) \quad (4)$$

h 为综合换热系数

$$h = h_c + \epsilon_r \sigma (T_a^2 + T_s^2) (T_a + T_s) \quad (5)$$

式中, ϵ_r 综合辐射系数。

$$\epsilon_r = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1}{\epsilon_s} - 1} \quad (6)$$

ϵ_a 空气的辐射率 ($\epsilon_a = 1$); ϵ_s 材料表面的辐射率 ($= 0.8 \sim 0.9$); σ 斯蒂芬-波耳茨曼常数 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$); T_a 火焰空气绝对温度; $T_s = t_s + 273(\text{K})$, T 材料表面绝对温度, $T_s = 273 + t_s(\text{K})$ 。

湿边界条件, 有

$$D_T \frac{\partial t}{\partial n} + D_x \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = -h_w (u - u_w) \Big|_{\Gamma} \quad (7)$$

式中 h_w 水分交换系数 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$); u_w 火灾时混凝土周围环境含湿率 (kg/kg), 在火灾实际过程中 $h_w = 0$, 则

$$D_T \frac{\partial t}{\partial n} + D_w \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = 0$$

可表示为:

$$\left(D_s + \frac{L \rho_1 D_w D_T}{\lambda}\right) \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \frac{h}{\lambda_c} (t_s - t_a) \quad (8)$$

1.2 物性参数的确定

λ 混凝土导热系数, 它是与温度、材料中碎石、沙、水泥等粗、细骨架以及配合比例有关的物性参数, 取

$$\lambda = 1.7 - 0.015 t \quad (\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}) \quad (9)$$

ρ 为混凝土容量, 也是随温度升高, 水泥、沙、碎石等材料分解而发生变化, 根据以下公式计算

$$\rho(t) = 2400 - 0.56 t \quad (10)$$

L 水的汽分潜热, 随着受火温度的升高, 由以下几个阶段构成, 第一阶段自由水蒸发潜热, 由以下公式确定

$$L_{d1} = 2.49 \times 10^3 - 2.324 t \quad (\text{kJ}/\text{kg}) \quad (11)$$

第二阶段混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在 400°C 以上后脱水而产生的蒸发潜热

$$L_{d2} = 3.49 \times 10^3 - 2.324 t \quad (\text{kJ}/\text{kg}) \quad (12)$$

第三阶段混凝土在温度 600°C 以上, 骨料中石英组份体系发生突变而产生的潜热

$$L_{d3} = 2.97 \times 10^3 - 2.324 t \quad (\text{kJ}/\text{kg}) \quad (13)$$

D_w 材料中水蒸汽等温度扩散系数, 它与温度、压力以及材料中空隙直径分布有关, 由以下公式^[8]确定

$$D_w = 2.56 \times 10^{-6} \left(\frac{t}{T_0}\right)^{1.25} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (14)$$

式中 T_0 为绝对材料参考温度, $T_0 = 298.2 \text{ K}$ 。

D_w 水分等温扩散系数,由以下公式^[8]确定

$$D_w = 4.05 \times 10^{-7} \exp\left(6.74 \frac{\rho_0 u}{\rho_w \varepsilon_0}\right) \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (15)$$

式中 ρ_0 混凝土绝干状态下密度 (kg/m^3); ρ_w 含湿混凝土密度 (kg/m^3); ε_0 混凝土绝干条件下的空隙率,取 $\varepsilon_0 = 0.22(\text{m}^3/\text{m}^3)$ 。

D_T 水分热扩散系数 (m^2/s),随混凝土含湿量 u 呈非线性变化,由以下公式^[8]确定

$$D_T = 4.47 \times 10^{-11} \exp(6.52 u) \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (16)$$

2 计算方法

以混凝土矩形梁为例,采用有限容积法将方程和边界条件离散,用显式和隐式格式相结合方法,在时间步长较短,满足显式格式收敛条件时,采用显式格式,此时不必求解代数方程组,只须进行矩阵乘法计算,节约时间。但显示格式在较大时间步长时,用隐式格式进行。此时求解方程组采用迭代法,对每一时间步长,采用时段初始时刻的温度和含水率,求出各物性参数,再解方程求出新的温度场和湿度场,然后用新的温度和湿度值重新确定各物性参数,重新求解方程,重复以上过程直到迭代收敛。为了提高收敛速度,采用交替方向隐式格式迭代 (ADI) 方法,迭代格式具有欠松弛性质,对于非线性问题求解较为合适,在任一方向的扫描,隐式格式具有三结点关系,只是变量为双变量,故用双变量三对角矩法求解方程。

3 计算和实测分析

图1所示为钢筋混凝土截面尺寸为 $250 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 构件耐火试验,按照国际火灾标准升温试验曲线进行升温试验和计算,其表达式为

$$t = t_0 + 345 \lg(1 + 8\tau)$$

式中, τ —升温时间 (min); t — τ 时刻炉温 ($^\circ\text{C}$); t_0 —炉内初始温度,取 $t_0 = 20^\circ\text{C}$ 。

同时假定梁为均匀介质材料,三面受火,非受火面为楼板面处于自然对流状态,并根据实验取对流换热系数 $h_c = 23 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 。受火面对流换热系数 h_c 可取 6.97,实验是利用公安部四川消防研究所 GB9978-88 耐火试验炉进行测试,炉内升温控

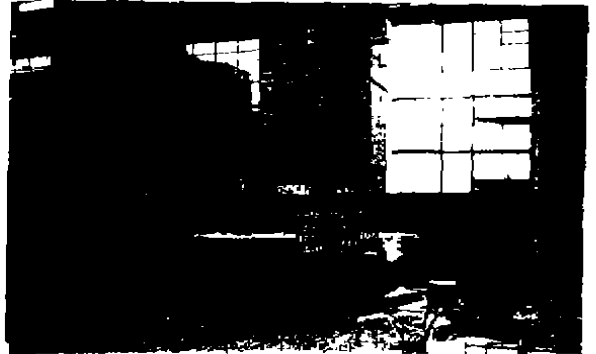


图1 钢筋混凝土梁耐火试验

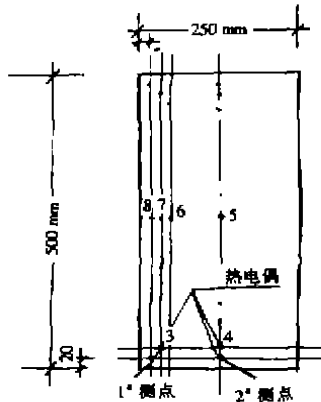


图2 梁截面热电偶装置图

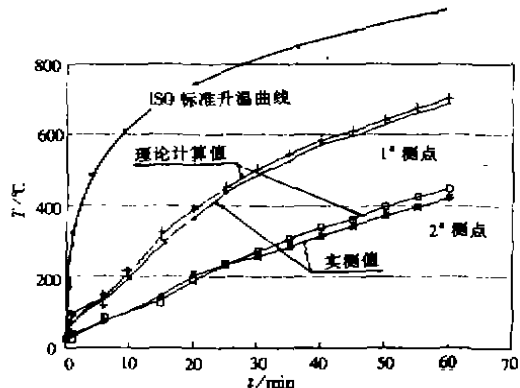


图3 测点计算值和实验值分布曲线

制及温度测试采用计算机控制和自动数据输出。试件为 C20 混凝土, 配合比为水:水泥:砂:石 = 0.6:1:2.30:5.91, 构件试验前初始温度为 24℃, 含水率为 7%。图 2 为混凝土梁截面测温点热电偶(0.25 mm 镍铬-镍硅铠装热电偶)布置图。

图 3 为钢筋混凝土保护层 $\alpha = 20$ mm, 主筋梁角和中心点温度测试值和计算值曲线。从曲线分布可看出, 在火灾持续的不同时刻, 理论计算值处处与实测值基本接近, 曲线在温度 100℃ 附近由于混凝土中含水蒸发, 使曲线在此温度有一定的停滞现象, 实验数据整体拟合程序都较好, 个别测点实测值与理论计算偏差大不排除测点位置在浇注过程中的偏差或高温情况下膨胀引起的位置偏移, 其整体误差都在 5% 以内。

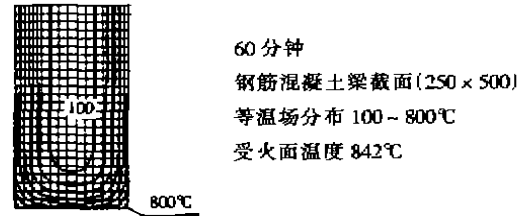


图 3-2 梁升温截面等场分布(计算值)

4 结 论

经过对钢筋混凝土在火灾高温作用下材料内部温度和湿度传递机理进行分析, 提出了混凝土在高温作用下热湿传递模型, 通过数值计算和实测比较, 表明模型基本能反映混凝土火灾作用的实际过程, 并为抗火设计温度场的确定提供依据。

参 考 文 献

- [1] 段文玺. 建筑结构火灾分析和处理[J]. 工业建筑, 1985, 7
- [2] 王守树, 等. 火灾温度作用下钢筋混凝土梁横截面温度场计算方法的研究报告[R]. 公安部四川消防科学研究所, 1990, 11
- [3] 胡克实, 朱伯龙. 结构受火灾作用的全过程分析方法[D]. 上海: 同济大学, 1992(12)
- [4] Morita, T. Wakamatsu, et al, Analysis of composite beams and frames at elevated temperature[J]. Fire Safety Science, 1991, 3: 761 ~ 770
- [5] Chen P, et al, A mathematical model of drying processes[J]. International Journal on Heat and Mass Transfer, 1989, 32: 29 ~ 310
- [6] Munukutla V. R, modeling of fire performance of concrete walls, Research Report 89/5. Department of civil Engineering, University of couterbury[R]. Christchurch, New zealand, 1989
- [7] Luikov. A. V, system of differential equations of heat and Mass transfer in capillarg - porous bodies[J]. Int J on Heat and Mass Transfer, 1974, 18: 313 ~ 321
- [8] 原田和典, コンクリートの高温時の熱物性値に关する研究, 日本建筑学会近畿支部研究报告集[R]. 第 29 号, 1989(计画系)

Coupled Heat and Moisture Transfer Progress of Reinforced Concrete Under Fire Disaster

FENG Ya¹, CHENG Qi-gao¹, WANG Er-qi²

(1. Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jianzhu University, Ching 400045, China; 2. Southwestern Architecture Design and Research Institute of China, 610081 China)

Abstract A coupled heat and moisture transfer model on reinforced concrete under high temperature was provided, then the heat and moisture transfer theory on reinforced concrete under fire disaster was analysed in this paper. The numerical simulation and field measurement data show that the model can roughly explain the actual heat and moisture transfer progress of reinforced concrete under fire disaster.

Key Words fire disaster; heat and moisture transfer; reinforced concrete