

文章编号:1673-2049(2005)04-0011-04

三面受火钢筋混凝土梁温度场非线性分析

余志武,唐国庆,丁发兴

(中南大学 土木建筑学院,湖南 长沙 410075)

摘要:根据三面受火钢筋混凝土梁离散体积单元的能量守恒原理,建立了有限差分平衡方程,在合理确定混凝土热工参数基础上,采用增大混凝土质量热容的方法,考虑混凝土中自由水与结合水的物理化学反应对混凝土温度场的影响。通过编制三面受火钢筋混凝土梁截面温度场非线性有限差分程序,并结合火灾情况下钢筋混凝土梁温度场的试验结果,合理地确定了混凝土质量热容放大系数和混凝土表面换热系数的计算式。结果表明:三面受火钢筋混凝土梁温度场的计算结果与试验结果符合较好,为进一步研究火灾情况下钢筋混凝土梁力学性能和耐火极限提供了条件。

关键词:钢筋混凝土梁;火灾;温度场;有限差分;非线性分析

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Nonlinear analysis of temperature field of reinforced concrete beam with three surfaces exposing to fire

YU Zhi-wu, TANG Guo-qing, DING Fa-xing

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The finite difference equation was built by using elemental energy balance of reinforced concrete beam with three surfaces exposing to fire based on the thermal properties of concrete. The influence of the physical or chemical reaction of free or combined water in concrete on the temperature field of concrete was considered by magnifying the specific heat of concrete. The program for drawing up the nonlinear finite difference analysis of the temperature field within reinforced concrete beam with three surfaces exposing to fire was developed, and the magnifying coefficient of the specific heat of concrete and the formula for the thermal capacity of concrete were determined by matching the numerical results with experimental results from references. The results show that the calculated results accord with the experimental results and it is possible for further researches on the behaviors and fire resistance of reinforced concrete beam under fire condition.

Key words: reinforced concrete beam; fire; temperature field; finite difference; nonlinear analysis

0 引言

钢筋混凝土梁温度场计算是研究火灾情况下钢筋混凝土梁力学性能的前提,它的确定也是火灾后评估建筑物损伤程度和修复加固的必要环节。

对于三面受火的钢筋混凝土梁,其温度随时间而变化,材料的热工参数随温度或时间而变化。因此其温度场分析为一非线性瞬态导热问题,无法应用解析法求解,而有限差分法和有限元法则可以有效地解决此类问题。目前,中国学者董毓利^[1]建议采用对角线

收稿日期:2005-09-17

基金项目:国家自然科学基金项目(50578162);湖南省自然科学基金项目(03JJY3089)

作者简介:余志武(1955-),男,湖南临湘人,中南大学教授,博士生导师,工学硕士。E-mail:zhwyu@mail.csu.edu.cn

网格法解决此问题,并给出了具有复杂边界二维温度场的差分格式;时旭东、过镇海^[2]利用有限单元一差分混合分析法,即空间上有限元法与时间上有限差分法相结合的方法,对火灾情况下钢筋混凝土构件二维温度场进行了计算。

考虑到三面受火钢筋混凝土梁温度场的特殊性,并为了计算的简便,笔者采用有限差分法对其进行计算。为方便火灾情况下钢筋混凝土梁非线性有限元分析,笔者采用矩形网格法对钢筋混凝土梁截面进行划分,并基于离散体积单元的能量守恒原理,给出三面受火矩形截面二维温度场的差分格式。此外,采用增大混凝土质量热容的方法,考虑混凝土中自由水与结合水的物理化学反应所引起的温度滞后效应,并根据试验结果,合理确定了混凝土质量热容放大系数和混凝土受火面换热系数计算公式。

1 基本假定

(1) 导热系数 λ_c

混凝土导热系数 $\lambda_c/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ 按文献[3]确定

$$\lambda_c = \begin{cases} 1.355 & 293 K \leq T \leq 586 K \\ 1.7162 - 0.001241(T - 273) & T > 586 K \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 为物体内温度/ K 。

(2) 质量热容 C_c

混凝土质量热容 $C_c/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$ 可按欧洲混凝土结构设计规范^[4]确定

$$C_c = 900.0 + 80.0(T - 273)/120.0 - 4.0[(T - 273)/120.0]^2, \\ 293 K \leq T \leq 1473 K \quad (2)$$

(3) 质量密度 ρ_c

$$\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$$

2 温度场有限差分公式推导

传热过程是由导热、对流、辐射 3 种基本传热方式组成的。火灾情况下,火热气层通过这 3 种方式作用于结构;一般情况下,火热气层通过热辐射及对流给结构边界面传热,结构内部主要以导热方式传热。

2.1 导热方程

钢筋在钢筋混凝土结构中所占体积很小,且钢筋的导热系数值很大,在计算结构截面的温度场时可以忽略钢筋。此外,一般认为钢筋混凝土构件沿纵向的温度场相同,所求解的主要是截面的二维温度场问题。因此,钢筋混凝土结构的导热方程可简化为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_c \frac{\partial T}{\partial y}) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho_c C_c T) \quad (3)$$

式中: x, y 为物体内空间坐标; t 为时间。

2.2 方程的单值性条件

三面受火钢筋混凝土梁的单值性条件为:①钢筋混凝土梁的高度和宽度;②混凝土的导热系数 λ_c 、质量热容 C_c 、质量密度 ρ_c ;③初始时间条件 $T|_{t=0} = T_0$;④边界条件。

边界条件应满足:

(1) 构件受火面与火热气层之间的换热条件。构件受火面与火灾时热气层之间通过热辐射和对流传热,当火场温度已知时,属于第三类边界条件(已知与物体边界相接触的流体介质温度和换热系数),即

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = h_s(T_E - T_F) \Big|_s \quad (4)$$

式中: T_E 为受火面的温度; T_F 为热气层温度; n 为构件表面法线向量; h_s 为火灾时热气层与构件受火面之间的换热系数/ $(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$,文献[1]、[3]中建议 h_s 为

$$h_s = \sigma \epsilon \frac{T_F^4 - T_E^4}{T_F - T_E} \quad (5)$$

式中: σ 为 STEFAN-BOLTZMANN 常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot K^4)$; ϵ 为综合辐射系数,对于试验炉中混凝土梁取 $\epsilon = \epsilon_c \epsilon_f$, ϵ_c 为混凝土表面辐射系数, ϵ_f 为着火房间或试验炉的辐射系数,其中按文献[3]取 $\epsilon_c = 0.8$, $\epsilon_f = 0.75$ 。

董毓利^[1]认为:在计算火灾试验过程中构件的温度分布时可以将受火面的温度 T_E 看作常数,并等于试验炉中热烟气层的温度 T_F 。于是式(5)改写为

$$h_s = 4\sigma \epsilon_E T_F^3 \quad (6)$$

(2) 构件被火面与外界空气之间的换热条件。当环境温度已知时,也属于第三类边界条件,即

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = h_U(T_s - T_0) \Big|_s \quad (7)$$

式中: T_s 为被火面温度; T_0 为环境温度; h_U 为火灾时构件被火面与周围环境之间的散热系数/ $(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$,按文献[1]确定

$$h_U = 1.313(T_s - T_0)^{1/3} + \sigma \epsilon (T_s^4 - T_0^4)/(T_s - T_0) \quad (8)$$

2.3 单元划分和有限差分方程

对于矩形截面的钢筋混凝土梁,采用矩形网格划分法,图 1 为矩形截面的钢筋混凝土梁截面体积单元划分形式。X 方向划分成 M 份 ($i=1, 2, \dots, M$),除第一份和第 M 份之外,其余各份均为等份,长为 Δx ,第一份和第 M 份长为 $\Delta x/2$; Y 方向划分成 N 份 ($j=1, 2, \dots, N$),除第一份和第 N 份之外,其余各份均为

等份,长为 Δy ,第一份和第 N 份长为 $\Delta y/2$ 。

时间轴 t 被离散为 $0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, k\Delta t, (k+1)\Delta t, \dots$, 这里 Δt 是时间增量步长。如果认为在这个 $k\Delta t < t \leq (k+1)\Delta t$ 时间步长内是准稳定状态,在离散体积单元内,由能量守恒原理计算得 T^{k+1} 的表达式有 6 种情况:

(1) 内部单元 ($1 < i < M, 1 < j < N$)

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \frac{\Delta t}{2(\rho C)_{i,j}^k (\Delta x)^2} [(T_{i-1,j}^k - T_{i,j}^k) \cdot (\lambda_{i-1,j}^k + \lambda_{i,j}^k) + (T_{i+1,j}^k - T_{i,j}^k) (\lambda_{i+1,j}^k + \lambda_{i,j}^k)] + \frac{\Delta t}{2(\rho C)_{i,j}^k (\Delta y)^2} [(T_{i,j-1}^k - T_{i,j}^k) (\lambda_{i,j-1}^k + \lambda_{i,j}^k) + (T_{i,j+1}^k - T_{i,j}^k) (\lambda_{i,j+1}^k + \lambda_{i,j}^k)] \quad (9)$$

(2) 底面受火边界单元 ($1 < i < M, j=1$)

$$T_{i,1}^{k+1} = T_{i,1}^k + \frac{\Delta t}{2(\rho C)_{i,1}^k (\Delta x)^2} [(T_{i-1,1}^k - T_{i,1}^k) \cdot (\lambda_{i-1,1}^k + \lambda_{i,1}^k) + (T_{i+1,1}^k - T_{i,1}^k) (\lambda_{i+1,1}^k + \lambda_{i,1}^k)] + \frac{\Delta t}{(\rho C)_{i,1}^k (\Delta y)^2} [(T_{i,2}^k - T_{i,1}^k) (\lambda_{i,2}^k + \lambda_{i,1}^k) + 2\Delta y h_s (T_F - T_{i,1}^k)] \quad (10)$$

(3) 顶面被火边界单元 ($1 < i < M, j=N$)

$$T_{i,N}^{k+1} = T_{i,N}^k + \frac{\Delta t}{2(\rho C)_{i,N}^k (\Delta x)^2} [(T_{i-1,N}^k - T_{i,N}^k) \cdot (\lambda_{i-1,N}^k + \lambda_{i,N}^k) + (T_{i+1,N}^k - T_{i,N}^k) (\lambda_{i+1,N}^k + \lambda_{i,N}^k)] + \frac{\Delta t}{(\rho C)_{i,N}^k (\Delta y)^2} [(T_{i,N-1}^k - T_{i,N}^k) \cdot (\lambda_{i,N-1}^k + \lambda_{i,N}^k) + 2\Delta y h_u (T_0 - T_{i,N}^k)] \quad (11)$$

(4) 左面受火边界单元 ($i=1, 1 < j < N$) 及右面受火边界单元 ($i=M, 1 < j < N$)

$$T_{1,j}^{k+1} = T_{1,j}^k + \frac{\Delta t}{(\rho C)_{1,j}^k (\Delta x)^2} [(T_{2,j}^k - T_{1,j}^k) (\lambda_{2,j}^k + \lambda_{1,j}^k) + 2\Delta x h_s (T_F - T_{1,j}^k)] + \frac{\Delta t}{2(\rho C)_{1,j}^k (\Delta y)^2} \cdot [(T_{1,j-1}^k - T_{1,j}^k) (\lambda_{1,j-1}^k + \lambda_{1,j}^k) + (T_{1,j+1}^k - T_{1,j}^k) (\lambda_{1,j+1}^k + \lambda_{1,j}^k)] \quad (12)$$

由对称性原理得

$$T_{M,j}^{k+1} = T_{1,j}^{k+1}$$

(5) 左下方边界单元 ($i=1, j=1$) 及右下方边界单元 ($i=M, j=1$)

$$T_{1,1}^{k+1} = T_{1,1}^k + \frac{\Delta t}{(\rho C)_{1,1}^k (\Delta x)^2} [(T_{2,1}^k - T_{1,1}^k) (\lambda_{2,1}^k + \lambda_{1,1}^k) + 2\Delta x h_s (T_F - T_{1,1}^k)] + \frac{\Delta t}{(\rho C)_{1,1}^k (\Delta y)^2} \cdot [(T_{1,2}^k - T_{1,1}^k) (\lambda_{1,2}^k + \lambda_{1,1}^k) + 2\Delta y h_s (T_F - T_{1,1}^k)] \quad (13)$$

由对称性原理得

$$T_{M,1}^{k+1} = T_{1,1}^{k+1}$$

(6) 左上方边界单元 ($i=1, j=N$) 及右上方边界单元 ($i=M, j=N$)

$$T_{1,N}^{k+1} = T_{1,N}^k + \frac{\Delta t}{(\rho C)_{1,N}^k (\Delta x)^2} [(T_{2,N}^k - T_{1,N}^k) \cdot (\lambda_{2,N}^k + \lambda_{1,N}^k) + 2\Delta x h_s (T_F - T_{1,N}^k)] + \frac{\Delta t}{(\rho C)_{1,N}^k (\Delta y)^2} [(T_{1,N-1}^k - T_{1,N}^k) (\lambda_{1,N-1}^k + \lambda_{1,N}^k) + 2\Delta y h_u (T_0 - T_{1,N}^k)] \quad (14)$$

由对称性原理得

$$T_{M,N}^{k+1} = T_{1,N}^{k+1}$$

式中:下标 i, j 分别为相应于坐标系中 (i, j) 坐标处的变量;上标 $k, k+1$ 分别为相应于在 t 为 $k\Delta t, (k+1)\Delta t$ 时刻的变量。热气层升温曲线为实际试验或国际标准组织建议的建筑构件抗火试验曲线

$$T_F - T_0 = 345 \lg(8t + 1) \quad (15)$$

式中: T_0 为初始温度,一般取为 293 K; T_F 为起燃后 t 分钟时的温度。

为了保证计算结果的稳定性,要求 Δt 为^[2]

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2 (\Delta y)^2}{2\lambda [(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2] / (\rho C)} \quad (16)$$

根据上述分析,笔者编制了三面受火钢筋混凝土梁截面温度场非线性有限差分计算程序。由于混凝土内部含有自由水和结合水,当外部环境受火时,外部混凝土先受热,受热部分混凝土中的自由水将向低温处迁移;当自由水温度达到 373 K 时,将汽化吸收汽化热;当达到更高温度时,混凝土中的水化物和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等将发生分解,在这一物理化学反应中,又需要吸收热能。这一系列反应将使混凝土的温度滞后。为简化计算,笔者采用增大混凝土质量热容的方法来考虑这种温度滞后效应,具体数值根据试验结果进行确定。

3 温度场试验验证

文献[5]中提供了详尽的钢筋混凝土梁在三面受火时温度场试验的结果,其火灾升温曲线按式(15)确定。试验梁截面尺寸为 200 mm × 200 mm,顶部为被火面,其中 1、2、3、4、5、6 点分别为截面中心距离底面 0、10、20、40、70、100 mm 处的测点。利用本文中的有限差分理论对其中的试验结果进行了计算分析,结果表明:

(1) 换热系数对混凝土表面的温度影响较大,而对混凝土内部的温度影响较小,且与试验结果相比,在火灾升温开始阶段,当换热系数采用式(5)时,混凝土表面的计算温度都低于实测温度;当换热系数

采用式(6)时,混凝土表面的计算温度与实测温度吻合较好。而火灾升温后期,混凝土表面的计算温度都高于实测温度。笔者通过试算发现,当取

$$h_s = 4\sigma\epsilon_E T_F^3 \leq 150 \tag{17}$$

时,可使钢筋混凝土梁表面温度场计算结果与试验结果较为一致。

(2)根据混凝土温度场的实测结果,当取混凝土的质量热容放大系数为 1.3 时,可较好地考虑混凝土中由于水分子的物理化学反应而产生的温度滞后效应,使混凝土内部温度场取得较为理想的计算结果。

图 2 为本文中的计算结果与文献[5]中试验结果的比较,两者吻合较好。图 3 为截面等温曲线。

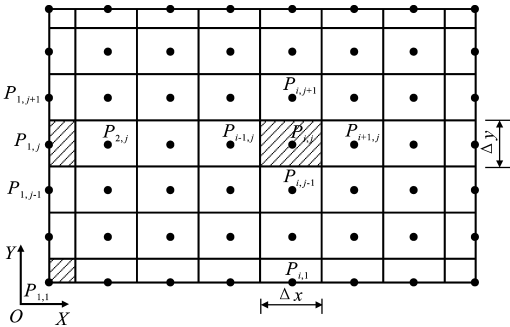


图 1 矩形截面积单元的划分形式

Fig. 1 Divided arrangement in rectangular section volume

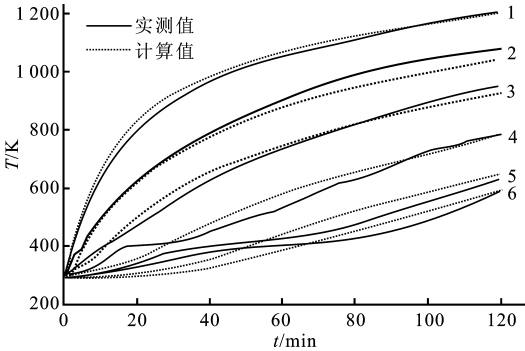


图 2 温度场实测值与计算值的比较

Fig. 2 Comparison of test and calculation value of temperature field

4 结 语

(1)笔者采用矩形网格法,并结合离散体积单元的能量守恒原理推导了矩形截面二维温度场的差分格式,用增大混凝土质量热容的方法考虑混凝土中自由水与结合水的物理化学反应所产生的温度滞后效应。

(2)通过对温度场试验结果的分析,确定了混凝土质量热容放大系数为 1.3 和混凝土表面换热系数的计算公式。笔者的研究为进一步深入研究钢筋混凝土梁在高温下的力学性能和耐火极限提供了条件。

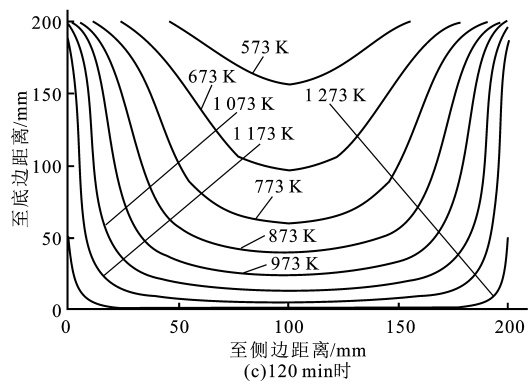
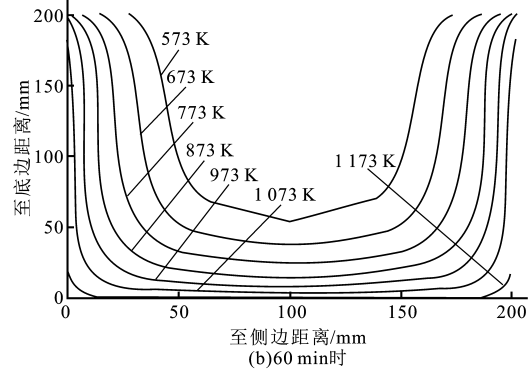
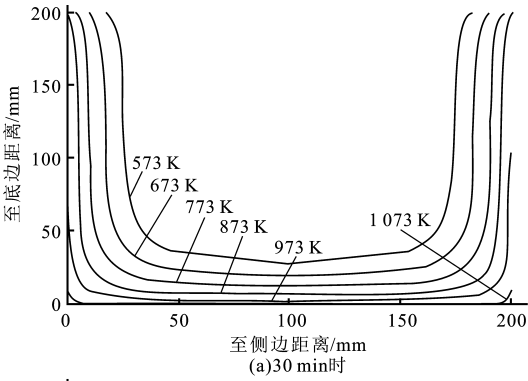


图 3 不同火灾试验时刻下的截面温度分布

Fig. 3 Distribution of temperature for section under various fire experiment time

参考文献:

[1] 董毓利. 混凝土结构的火安全设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[2] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[3] LIE T T. A method of to predict the fire resistance of circular concrete filled hollow steel columns[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 1990, 2(4): 111—126.

[4] Eurocode 2, General Rules—Structural Fire Design[S].

[5] HUANG Zhao-hui, ANDREW P, JOHN R. Non-linear finite element model to predict temperature histories within reinforced concrete in fires[J]. Building and Environment, 1996, 31(2): 109—118.