

火灾作用下混凝土楼板的热力学特性研究

范思婷¹, 刘干斌^{1*}, 胡欣²

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市建筑设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315012)

摘要: 利用 Marc 有限元软件建立计算模型, 模拟了混凝土楼板在不同边界条件下的温度场及其分布规律, 再利用温度场进一步分析结构的热力学响应, 并与热传导理论的计算结果进行了比较. 结果表明: 数值模拟结果与理论计算结果相吻合, 研究结果可为混凝土楼板在火灾下的热力学响应的防火设计提供参考.

关键词: 有限元分析; 混凝土楼板; 火灾; 温度场; 热传导; 热效应

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 04-0075-05

近几年来, 建筑物发生火灾的次数越来越多, 特别是钢筋混凝土框架结构在火灾中的坍塌事故, 给民众的生命财产安全造成了不可估量的损失. 虽然钢筋和混凝土都属于热惰性材料, 但在火灾的高温作用下, 材料的性能将发生严重劣化, 结构内部会产生大量的应力重分布现象, 大大削弱了结构的性能, 最终严重降低结构的安全性^[1-3]. 因此对钢筋混凝土结构进行热力学分析是非常重要的, 研究能为结构在防火设计方面提供一定的理论依据.

目前, 国内外对钢筋和混凝土材料的高温热工性能、力学性能进行了大量的研究. Lamont^[4]和 Cameron^[5]等对钢筋混凝土楼板在火灾条件下的极限承载力进行了模拟计算, 并各自提出了关于附加承载力的一些新理论; 余志武等^[6]对火灾下钢筋混凝土板的温度场进行了分析. 这些试验研究都可以进一步了解结构在高温作用下的破坏特征、变形、极限高温承载力和内力重分布过程的变化规律, 但对钢筋混凝土结构受火下的热力学响应如结构所发生的位移等分析不多见, 且研究一般都是通过纯理论分析, 或是模型与实验进行比较分析.

笔者通过模型与理论计算结果进行分析比较, 从传热学基本原理出发, 以钢筋混凝土楼板为研

究对象, 基于所定的温度边界, 采用 Marc 有限元软件进行瞬态和稳态的温度场分析, 并将两者的分析结果进行比较, 同时与理论解进行校核, 然后将稳定的温度场作为边界条件加载到相应的力学模型上, 分析其位移、应力等热力学响应.

1 混凝土楼板受火数值模型

采用 Marc 大型有限元分析软件, 建立混凝土楼板的三维模型, 尺寸为 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 0.6\text{ m}$, 模型如图 1 所示.

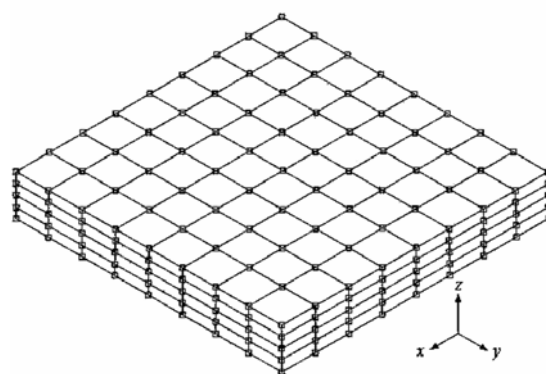


图 1 有限元模型

1.1 定义边界条件

在温度场分析中根据实际情况设置了 2 种荷

收稿日期: 2014-01-05.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51278256, 51178227); 宁波市科技计划项目(2013C50005); 浙江省新苗人才计划(2014R405075).

第一作者: 范思婷(1989-), 女, 浙江绍兴人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 岩土工程. E-mail: 411459044@qq.com

*通信作者: 刘干斌(1976-), 男, 江西吉安人, 博士/教授, 主要研究方向: 软土地下工程. E-mail: liuganbin@nbu.edu.cn

载边界条件(图 2): 对流边界条件, 环境温度为 27°C 和 237°C ; 辐射边界条件, 环境温度为 237°C .

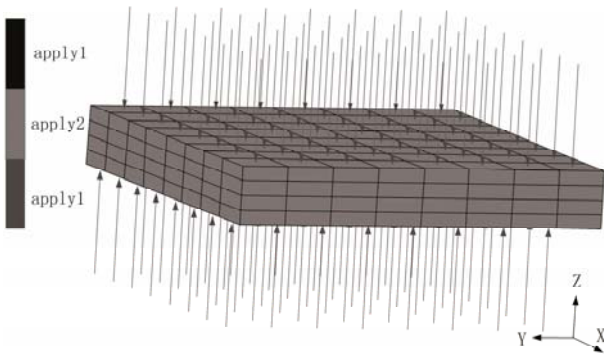


图 2 温度场模型的边界条件

在力学分析模型中, 考虑到楼板可以是铰支也可以是固支, 所以考虑下列两类位移边界条件: (1)端部固定, 限制左右两边界上各点的 x, y, z 方向上的位移; (2)端部铰支, 只限制前后两边界上中间点 x, y, z 方向上的位移, 因此这两个边界就可以自由转动。

1.2 定义材料特性

混凝土材料杨氏模量 $2.06 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 泊松比为 0.5, 质量密度为 $\rho = 2400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 然后赋值给所有计算单元。

在数值建模的基础上, 采用 Marc 有限元计算可得到楼板结构在不同条件下的温度场分布。

2 混凝土楼板受火理论模型

2.1 热传导简化模型

钢筋混凝土作为一种复合材料, 它的热容量 ρc_c 、热传导系数 λ 都与温度 T 相关, 因此它的热传导问题实际上是一个变系数的瞬态导热问题。对于尺寸较大的混凝土平板来说(即 $l/\delta > 6$, l 为楼板的短边, δ 为板厚), 可近似认为是一块无限大的薄板, 在沿楼板面的两个方向上可认为温度 T 与板面位置 x 和 y 无关, 因此横向传热忽略不计, 可对它进行单向的传热处理, 即 T 仅与板的厚度 $\delta(z)$ 有关。

为了将理论解与有限元分析解进行对比, 假设热传导系数 λ 与密度 ρ 均不随温度改变而改变, 且假设材料在各方向上的热传导系数 λ 相同, 只考虑比热容随温度的变化^[7-9]。在计算钢筋混凝土

板内的温度场分布时, 忽略混凝土内部气体流动造成的影响, 且当截面内钢筋的最大配筋率 $\rho_h \leq 4\%$ 时, 钢筋对板内温度分布的影响不大。由于钢筋混凝土板中的配筋率一般都远小于 4% , 所以在计算板内温度场分布时可以忽略钢筋造成的影响, 也就极大地降低了模型的复杂性。

假定板内初始温度均匀, 设为 T , 且在火灾过程中, 只沿板厚度方向有变化, 并假设在火灾某一瞬间后, 温度不再变化, 即楼板底部表面(受火表面)温度 T_k 在热变化过程中保持不变。这样, 板内温度场是火灾燃烧时间 t 和楼板内某一点和受火面的距离 z 的函数, 即:

$$T = T(t, z). \quad (1)$$

对于钢筋混凝土楼板, 不考虑内热源, 建立能量守恒的微分方程:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dz^2} = \rho c \frac{dT}{dt}. \quad (2)$$

按照傅里叶定律, 热流密度在 z 轴上可用温度梯度表示:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dz}. \quad (3)$$

2.2 热传导分析理论解

2.2.1 模型一

考虑对流边界为模型一, 楼板的几何尺寸为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ (图 3), 混凝土楼板上下表面都加上对流边界条件, 其中, T_{w1} 是楼板下表面温度, 上表面设置环境温度为 27°C , 记为 T_{f2} , 下表面设置环境温度为 237°C , 记为 T_{f1} 。

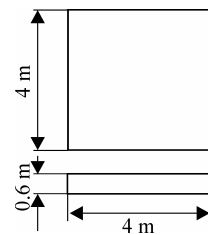


图 3 楼板模型的几何尺寸

根据边界条件, 即已知 $z=0$ 处边界侧流体的温度 T_{f1} , 表面传热系数为 h ; $z=\delta$ (楼板厚度)处边界侧流体的温度 T_{f2} , 表面传热系数为 h 。

热传导模型一的理论解计算如下。由(2)式可知, 若温度 T 与时间 t 无关, 则:

$$\frac{d^2 T}{dz^2} = 0. \quad (4)$$

楼板两侧的第三类边界条件表达式为:

$$q|_{x=0} = -\lambda \frac{dT}{dz}|_{x=0} = h(T_{f1} - T_{f2}), \quad (5)$$

$$q|_{x=\delta} = -\lambda \frac{dT}{dz}|_{x=\delta} = h(T_{w1} - T_{f2}), \quad (6)$$

$$q = -\lambda \frac{dT}{dz} = -\lambda A = \lambda \frac{(T_{w1} - T_{w2})}{\delta}. \quad (7)$$

联立(5)~(7)式,可得:

$$q = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{2/h + \delta/\lambda} = \frac{237 - 27}{2/10 + 0.6/1.6} = 365.2174,$$

$$T_{w1} = T_{f1} - \frac{q|_{x=0}}{h} = 237 - \frac{365.2174}{10} = 200.4783.$$

2.2.2 模型二

考虑混凝土楼板上表面加对流边界条件,设置环境温度为 27℃,下表面加对流边界条件及辐射边界条件,设置环境温度为 237℃,已知 $z=0$ 处辐射边界条件中的环境温度 T_{am} 为 237℃.

根据边界条件有:

$$z=0, -\lambda \frac{dT}{dz}|_{x=0} = h(T_{f1} - T_{w1}) + \varepsilon\sigma[(T_{am} + 273)^4 - (T_{w1} + 273)^4], \quad (8)$$

$$z=\delta, -\lambda \frac{dT}{dz}|_{x=\delta} = h(T_{w2} - T_{f2}), \quad (9)$$

$$q = -\lambda \frac{dT}{dz} = \lambda \frac{(T_{w1} - T_{w2})}{\delta}. \quad (10)$$

将(10)式代入(8)式,整理后得:

$$T_{w1} = T_{f2} + \left(\frac{\delta h}{\lambda} + 1\right)(T_{f1} - T_{w1}) + \left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h}\right)\varepsilon\sigma[(T_{am} + 273)^4 - (T_{w1} + 273)^4], \quad (11)$$

因 $T_{f1} = 237, T_{f2} = 27, T_{am} = 237, \delta = 0.6, h = 10, \lambda = 1.6, \sigma = 5.67 \times 10^{-8}, \varepsilon = 0.6$, 所以, $T_{w1} = 221.9494$.

3 混凝土楼板热力学特性分析

在建立出混凝土楼板受火数值计算模型和理论计算模型后,对模型计算结果与理论解进行比较验证,计算参数见表1^[10].

3.1 模型一结果对比

在有限元模型中,首先对该模型进行稳态分析,分析后的结果如图4所示,再对该模型进行瞬态分析,经历 9×10^5 s 后的瞬态温度场分布结果如图5所示.

理论解为 $T_{w1} = 200.4783$,即楼板受火后下表

表1 混凝土楼板热力学参数

参数名	数值
热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1.0×10^{-5}
泊松比	0.3
导热系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	1.3
比热容/ $(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	1 167
黑体辐射常数/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1})$	5.67×10^{-8}
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 400
对流换热系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1})$	10
辐射率	0.6

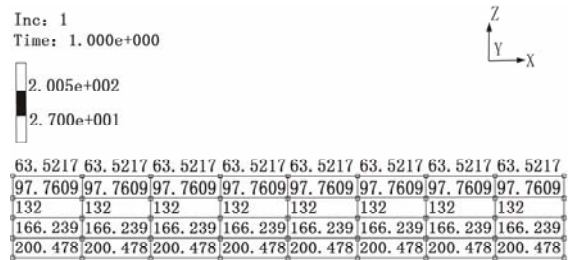


图4 稳态温度场分布

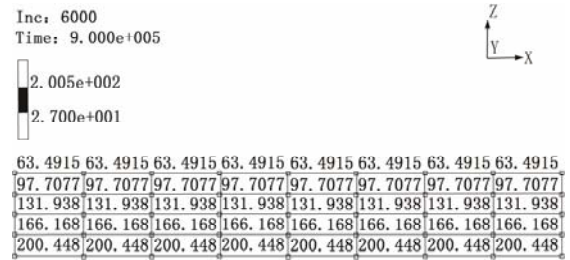


图5 瞬态温度场分布

面最后的稳定温度为 200.4783℃. 稳态数值计算结果为 200.478℃, 瞬态结果 200.448℃. 从上述分析可知,该热学模型得到的稳态解和瞬态解都与理论解非常接近.

3.2 模型二结果对比

首先对该模型进行稳态分析,结果如图6所示,再对该模型进行瞬态分析,经历 9×10^5 s 后的瞬态温度场分布结果如图7所示.

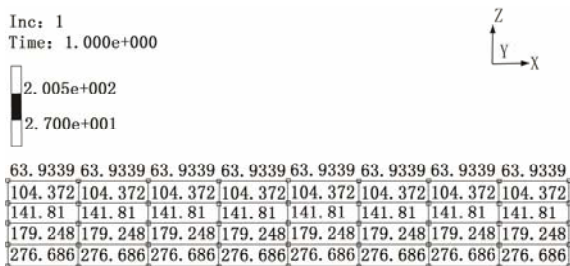


图6 稳态温度场分布

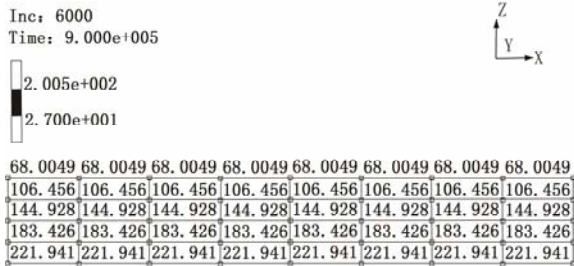


图7 瞬态温度场分布

理论解 $T_{w1} = 221.9494$, 即楼板受火后下表面的稳定温度 221.9494°C . 稳态数值计算结果为 276.686°C , 瞬态结果为 221.941°C . 上述分析可知, 该热学模型的理论解和稳态解有较大误差, 理论解温度比稳态解低 55°C 左右, 但与瞬态解温度非常接近.

4 混凝土楼板热效应分析

4.1 等效法基本原理

在对模型的力学分析中主要是采用等效法来进行位移计算. 对于任意截面的均质梁, 已知梁横截面上的变温曲线沿高度变化, 变化规律为 $T = T(y)$, 初始温度为 T_0 . 如果梁的纵向纤维间不受约束, 能够自由变形时, 沿梁高各点的热应变为:

$$\varepsilon_T(y) = \alpha \Delta T(y) = \alpha(T(y) - T_0).$$

由于梁的纵向纤维之间互相有约束, 我们假设梁的横截面在变形后仍保持平面, 即认为计算中满足平截面假设条件. 梁由于温度变化所产生的变形, 如果与在截面上作用 1 个轴力和 1 个弯矩所产生的变形相同时, 就可以把温度作用等效为 1 个轴力和 1 个弯矩作用.

4.2 楼板最大挠度理论解

现取模型一计算得出的温度场, 计算楼板在该温度场作用下发生的最大挠度. 假设该楼板四边简支, 根据边界条件计算得到的挠度最大值为:

$$y_{\max} = \frac{2M}{EI} = 2 \times \frac{49.272 \times 10^5}{3 \times 10^{10} \times 0.072} = 4.56 \times 10^{-2} \text{ m}.$$

4.3 楼板最大挠度 Marc 解

在模型一基础上加位移边界条件, 并将得到的温度场分布作为边界条件加载到模型上, 变形形状如图 8 所示, 挠度计算结果如图 9 所示.

由图 9 可见, 火灾后随着温度的升高, 又由于楼板受到位移边界条件的限制, 楼板会产生变

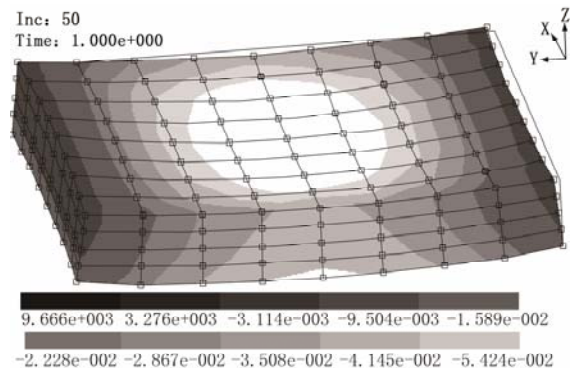


图8 火灾后楼板的变形形状

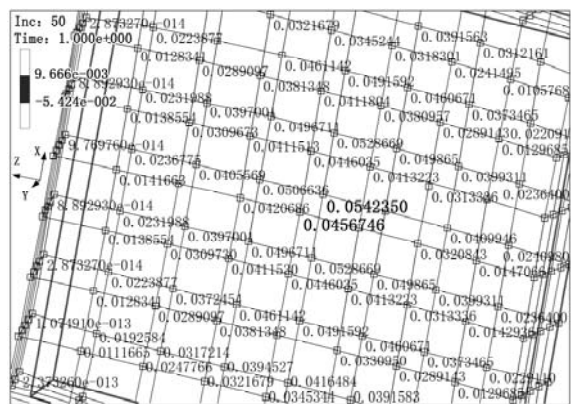


图9 楼板挠度计算结果

形, 从而发生一定位移. 沿楼板厚度方向的挠度值, 楼板中心处板面处的挠度为 0.0456746 m . 板底直接受火, 所以温度比板面要高, 由于材料的热膨胀性能, 板底挠度较大, 为 0.054235 m . 再观察楼板周围节点的挠度值, 可以看出楼板的最大挠度大致在 $0.0456 \sim 0.0542$ 之间, 这与按照等效法计算所得结果 $y_{\max} = 4.56 \times 10^{-2} \text{ m}$ 极为相近. 所以 Marc 对楼板在温度场下力学响应的分析结果与理论计算解是相互符合的, 用 Marc 来有限元程序模拟混凝土楼板在火灾下的热效应行为也是可靠的.

5 结论

通过对混凝土楼板受火下的热力学分析, 从 2 个模型的比较中得到如下结论:

(1) Marc 在处理对流边界条件时, 其稳态解与理论解是非常接近的, 而且与达到足够大步数后的瞬态解也非常接近. 当边界条件有辐射边界条件参与后, Marc 的理论解不同于稳态分析解, 有较大的误差, 但和达到足够大步数后的瞬态分析解仍然非常接近.

(2)辐射边界条件的非线性程度较大, Marc 在处理非线性问题时应按照瞬态工况来模拟。如果用 Marc 稳态方法进行分析, 结果会发生较大偏差。所以采用 Marc 处理辐射边界条件的问题时, 用瞬态方法分析得出的结论更加可靠, 而在处理对流边界条件的问题时, 分析解不会受到其是否是稳态或者是瞬态的影响。

(3)Marc对楼板在温度场下力学响应的分析中, 软件计算得出的挠度值与理论计算解相互符合, 所以采用 Marc 来模拟混凝土楼板在火灾下的热效应行为也是可靠的。

(4)在对火灾条件下钢筋混凝土楼板的热力学分析中, 文中没有考虑几何非线性、材料非线性以及初始缺陷的影响。而在实际结构中, 结构的初始缺陷、大变形和材料的塑性发展对其有很大的影响, 并且火灾温度也是不确定因素。因此, 有必要进行实体火灾试验, 模拟不同区域发生真实火灾时结构的反应, 为计算机模拟提供基础数据。

参考文献:

- [1] 李耀庄, 李昀晖. 我国火灾坍塌事故的调查[J]. 消防科学与技术, 2006, 25(5):694-697.
- [2] 时旭东, 过镇海. 钢筋混凝土结构的温度场[J]. 工程力学, 1996, 13(1):35-43.
- [3] 张大长, 吕志涛. 火灾过程中混凝土构件内的温度分布[J]. 南京建筑工程学院学报, 1997, 40(1):31-37.
- [4] Lamont S. Possible 'panel instability' in composite deck floor systems under fire[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(11):1397-1433.
- [5] Cameron N J K. Limit capacity of laterally restrained reinforced concrete floor slabs in fire[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(2):127-140.
- [6] 余志武, 王中强, 蒋丽忠. 火灾下钢筋混凝土板的温度场分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(1):58-61.
- [7] Franssen J M. Numerical determination of 3D temperature fields in steel joints[J]. Fire and Materials, 2004, 28(1):63-82.
- [8] Kodur V K R, Wang T C, Cheng F P. Predicting the fire resistance behavior of high strength concrete column[J]. Cement & Concrete Composite, 2004, 26(2):141-153.
- [9] Lira L, Buchanan A, Moss P. Numerical modeling of two-sway reinforced concrete slabs in fire[J]. Engineering Structures, 2004, 26(8):1081-1091.
- [10] 马延军. 高温下钢筋与混凝土的热工性能和力学性能[J]. 中国西部科技, 2011, 19:37-38.

Thermodynamic Properties of the Concrete Slabs under Fire: Study

FAN Si-ting¹, LIU Gan-bin^{1*}, HU Xin²

(1.Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Architectural Design Institute Co. Ltd, Ningbo 315012, China)

Abstract: In this paper, the thermodynamic properties of the concrete slabs under fire is studied by establishing models using the finite element software Marc which is utilized to simulate the temperature field and the regularities of distribution of the concrete slabs in different boundary conditions, and to analyze the thermodynamic response depending on the temperature field. The simulated results are then compared with the results calculated based on the heat transfer theory. The comparison results indicate that the numeric simulation calculations are in good consistence with the theoretical calculations, and may provide good reference value for the fire-resistance design of the thermodynamic response.

Key words: finite element analysis; concrete slab; fire; temperature field; thermal conduction; thermal effect

(责任编辑 章践立)