

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.06.020

基于细观尺度的混凝土绝热温升预测

宋智通^{1,2},张子明¹,陈金杭²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.南京水利科学研究院,江苏 南京 210029)

摘要:从混凝土的热学性能和细观组成出发,建立混凝土绝热温升和水泥水化程度的关系,将绝热温升表示为水泥水化程度的函数.假定混凝土为随机骨料和水泥净浆组成的二相复合材料,取单元尺寸为 100 mm×100 mm 的混凝土试件,并将试件剖分为 1 mm×1 mm 的有限元网格,考虑单个骨料和多个随机骨料 2 种投放方式,从细观尺度数值模拟混凝土的绝热温升过程,研究混凝土细观结构的温度分布.结果表明,文中给出的模型可较准确地预测混凝土绝热温升.在绝热条件下,由于混凝土细观结构中骨料和砂浆的热学和力学性质差异,试件内部仍会产生温度梯度和温度应力.

关键词:细观尺度;混凝土绝热温升;水化程度;复合材料;温度梯度;温度应力

中图分类号: TU528.0 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2008)06-0818-06

混凝土的水化放热性能对混凝土结构开裂影响越来越受到研究人员的重视.混凝土绝热温升是混凝土结构温度场分析的关键,混凝土的绝热温升值和温升速率反映了早龄期混凝土中水泥水化速率和水化程度^[1-4].混凝土细观结构中,水泥因水化放热,粗细骨料从水泥的水化热中吸收热量,在混凝土内部产生温度梯度.本文从混凝土的热学性能和细观组成出发,将绝热温升表示为水泥水化程度的函数,从细观尺度数值模拟混凝土的绝热温升过程,以减少混凝土绝热温升试验.

1 水泥水化热和水化程度

1.1 水泥水化热

水泥的水化热是由各熟料矿物水化作用产生的,水泥放热量的大小及水化速率主要与水泥熟料的矿物组成及细度有关.普通硅酸盐水泥熟料的主要矿物成分有硅酸三钙 C₃S、硅酸二钙 C₂S、铝酸三钙 C₃A 和铁铝酸四钙 C₄AF.水泥 4 种主要组成矿物的相对含量不同,其放热量和放热速率也不同,水泥的矿物组成对水化热的影响具有加和性^[5].文献[6]给出了硅酸盐水泥熟料中 4 种主要矿物成分完全水化的水化热:C₃S 为 511 kJ/kg,C₂S 为 247 kJ/kg,C₃A 为 1 357 kJ/kg,C₄AF 为 427 kJ/kg,单位质量水泥产生的最大水化热 $q_{\max}$ 为

$$q_{\max} = 511a + 247b + 1357c + 427d \quad (1)$$

式中 a, b, c, d 分别为水泥中各熟料矿物含量.

水泥水化过程中的水化热大小依赖于龄期,国内常用的水化热计算公式有双曲线式、指数式和复合指数式^[7],其中双曲线式为

$$Q_{\tau} = \frac{Q_{\max} \tau}{n + \tau} \quad (2)$$

式中: Q_{τ} ——龄期 τ 时的水化放热总量; $Q_{\max}$ —— $\tau \rightarrow \infty$ 时的最终水化热; n ——常数.

水泥浆体水化热测量主要有溶解热法^[8]和直接测定法^[9].

1.2 水泥水化程度

水泥水化放热量的多少与水泥水化程度有必然联系,因此基于某时刻水泥试样放热量的确定,可以得到关于时间 τ 的水泥水化程度 α_{τ} 为

收稿日期:2008-06-06

基金项目:国家自然科学基金(50808066)

作者简介:宋智通(1973—),男,江苏高邮人,工程师,博士研究生,主要从事水工结构设计及大体积混凝土温度控制研究.

$$\alpha_{\tau} = Q_{\tau}/Q_{\max} \tag{3}$$

则水化速率为

$$r = \frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{dQ}{d\tau} \frac{1}{Q_{\max}} \tag{4}$$

式中： α_{τ} ——水泥水化程度； r ——水化反应速率。

影响水化程度的主要因素有颗粒粗细、水灰比以及水化温度等。
对于纯水泥体系中水泥水化程度的研究,国内外学者已做了大量的工作,形成了一系列较为成熟的理论和方法,如水化热法、水化动力学法、图像分析法等^[9-11]。在图像分析法基础上结合现有的纯水泥水化计算机模型,可以用计算机对水泥基复合体系中各组分水化过程进行模拟^[12-13]。

2 混凝土绝热温升与水化程度的关系

2.1 绝热温升

根据比热容定义,并假定温度变化过程中比热容为常数,则有

$$\frac{dQ}{d\tau} = mc \frac{dT}{d\tau} \tag{5}$$

式中： Q ——热量； T ——温度； c ——比热容； m ——质量。

绝热条件下,水泥水化反应的热量全部用于反应物和产物的自身加热,与外界无热量交换,因此有

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = mc \frac{dT}{d\tau} \frac{1}{Q_{\max}} \tag{6}$$

则

$$\frac{Q_{\max}}{mc} \frac{d\alpha}{d\tau} = \frac{dT}{d\tau} \tag{7}$$

令 $\theta = \frac{Q_{\max}}{mc}$,并对两边积分,有

$$\int_0^{\alpha_m} \theta d\alpha = \int_{T_0}^{T_m} dT \tag{8}$$

则绝热温升可表示为

$$\Delta T = \theta \alpha_m \tag{9}$$

式中： ΔT ——绝热温升, $\Delta T = T_m - T_0$ ； T_m —— τ 时刻的温度； T_0 ——初始温度； α_m —— τ 时刻的水泥水化程度。

2.2 用水化程度表示的绝热温升

混凝土绝热温升主要由水泥用量及水泥水化程度等因素决定。对于某种混凝土来说,所用胶凝材料的组成和性质已经确定,绝热温升值由水泥水化程度决定,因此,混凝土绝热温升可表示为水泥水化程度的函数。

混凝土绝热温升试验中,若水泥用量为 m_c ,则全部水泥产生的最大热量为 $Q_{\max} = m_c q_{\max}$ 。由于水泥产生的水化热全部用于混凝土试件的升温,混凝土试件最高温升为

$$\theta_{\max} = \frac{m_c q_{\max}}{mc} \tag{10}$$

混凝土中水泥一般难以完全水化,因此存在某个水化程度 α_u ($0 < \alpha_u \leq 1$),则

$$\theta_u = \alpha_u \theta_{\max} \tag{11}$$

混凝土细观组成中,只有水泥在水化过程产生水化热,粗细骨料从水泥水化热中吸收热量。混凝土绝热温升值主要由水泥水化程度决定,因此,水泥水化过程与绝热温升过程应具有同一的函数表达式,可以表示为双曲线式、指数式或复合指数式等。其中双曲线式表示为

$$\alpha_{\tau} = \frac{\alpha_u \tau}{n + \tau} \tag{12}$$

混凝土绝热温升可表示为

$$\theta_{\tau} = \frac{\alpha_u m_c q_{\max}}{mc} \frac{\tau}{n + \tau} \tag{13}$$

或

$$\theta_{\tau} = \alpha_{\tau} \theta_{\max}$$

(14)

式(14)中水泥水化程度曲线可通过水化热法、水化动力学等方法测定. 对于某种水泥, 水泥组成及颗粒粗细等已经确定, 水泥水化程度主要由水灰比决定. 因此, 利用某种水灰比下的水泥水化程度曲线和混凝土配合比, 可以简便地估算该混凝土的绝热温升.

3 基于细观尺度的混凝土绝热温升

3.1 水化程度曲线

混凝土绝热温升试验中^[14], 水泥熟料矿物组成的质量分数分别为: C₃S 58.2%, C₂S 21.5%, C₃A 7.3%, C₄AF 8.6%. 试样水灰比 0.53, 水泥与骨料(砂和石)用量比为 1:4.87, 骨料体积比 $P = 67.5\%$. 图 1 为该水灰比下由绝热温升试验获得的水泥水化程度曲线.

水泥最大放热量用式(1)估算得 $q_{\max} = 486.3 \text{ kJ/kg}$. 采用水灰比 0.53 制成水泥浆, 比热容 c 取 $1.35 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 利用式(10)计算得 $\theta_{\max} = 235.5^\circ\text{C}$, 此水泥净浆绝热温升式可表示为

$$\theta_{\tau} = 235.5 \alpha_{\tau} = \frac{146.0 \tau}{0.305 + \tau}$$

(15)

3.2 混凝土数值试件

数值试验模拟混凝土绝热温升时, 将混凝土看作水泥净浆和粗细骨料组成的二相复合材料, 其中水泥净浆为放热源, 水化反应程度表达式见式(15), 骨料为混凝土充填体, 在水泥水化过程中吸收热量. 由于混凝土试件中水泥用量及骨料用量等均已确定, 利用水泥水化反应程度曲线, 通过基于细观尺度的数值模拟, 可以得到该混凝土试件的宏观绝热温升曲线.

考虑一混凝土试件, 单元尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 网格剖分为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的细观单元. 利用编制的试件生成程序, 进行圆形或椭圆形骨料的随机投放, 本文采用圆形骨料投放. 数值计算考虑单骨料和多骨料随机投放 2 种情况, 其中单骨料为假定情况, 工程实际中几乎不存在.

单骨料投放时, 骨料体积比 P 分别为 19.6%, 28.3%, 38.5%, 50.3%, 63.6%, 70.8%, 对应圆形骨料粒径 D 分别为 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 9 mm, 9.5 mm, 骨料中心即为试件中心. 多骨料投放时, 控制骨料最大粒径小于或等于 5 mm.

3.3 单骨料试件数值试验

当骨料体积比 P 为 28.3% 和 50.3%, 根据式(15), 绝热温升分别为 $\frac{104.7 \tau}{0.305 + \tau}$ 和 $\frac{72.6 \tau}{0.305 + \tau}$.

图 2 为混凝土绝热温升有限元数值计算结果与理论公式计算结果比较. 由图 2 可见, 数值计算结果与理论公式计算结果吻合较好. 因此, 根据水泥水化程度曲线, 可简便地得到混凝土绝热温升表达式, 从而可以减少混凝土绝热温升试验工作量.

图 3 为骨料体积比 P 分别为 19.6%, 28.3%, 38.5%, 50.3%, 63.6%, 70.8% 时的混凝土绝热温升有限元数值计算结果. 由图 3 可见, 随着骨料体积比的增加, 混凝土绝热温升显著下降. 在混凝土试件尺寸不变的情况下, 当骨料体积相对增加时, 水泥用量必定减少, 从而降低混凝土的绝热温升. 因此, 可以通过减少水泥用量来降低混凝土最高绝热温升.

图 4 为骨料体积比 $P = 28.3\%$ 、浇筑时间 $\tau = 6 \text{ h}$ 和 24 h 的混凝土试件内部温度场. 当 $\tau = 6 \text{ h}$ 时, 混凝土试件平均绝热温升为 47.64°C , 试件内部最高和最低绝热温升分别为 47.87°C 和 47.01°C ; 当 $\tau = 24 \text{ h}$ 时, 平均绝热温升为 81.17°C , 最高和最低绝热温升分别为 81.22°C 和 81.11°C . 由图 4 可见, 由于混凝土试件中骨料吸收热量, 试件内部存在温度梯度.

混凝土试件浇筑初期, 由于水泥水化的作用, 形成水泥净浆并放出水化热, 水泥浆温度升高, 骨料中心温度也快速升高. 由于试件和骨料尺寸较小, 试件内温度差异并不显著, 当 $\tau = 6 \text{ h}$ 时, 最大温差 $\Delta T = 0.86^\circ\text{C}$; $\tau = 24 \text{ h}$ 时, $\Delta T = 0.11^\circ\text{C}$. 尽管试件在 24 h 的温差已非常小, 但是, 除非试件内水泥水化全部完成, 否则试件

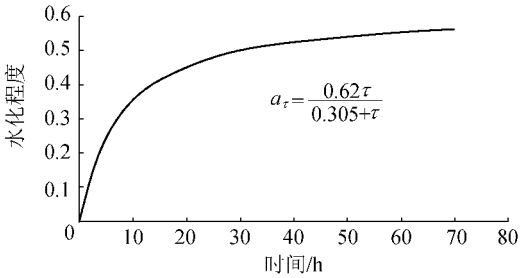


图 1 水化程度曲线

Fig.1 Curves of hydration degree

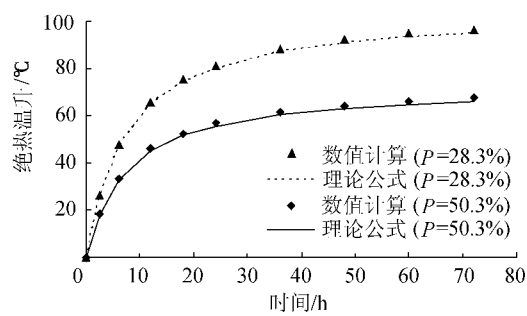


图 2 数值计算与理论公式计算结果比较

Fig.2 Comparison of adiabatic temperature rise curves between numerical and theoretical results

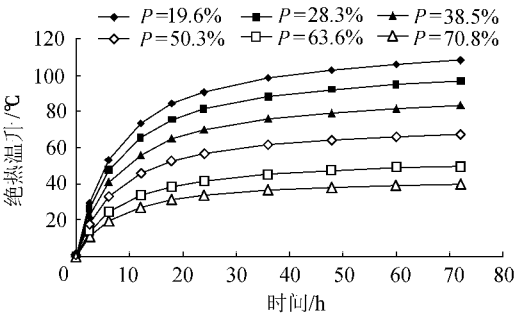


图 3 不同骨料体积比的绝热温升曲线

Fig.3 Adiabatic temperature rise curves of concrete with different aggregate volume ratios

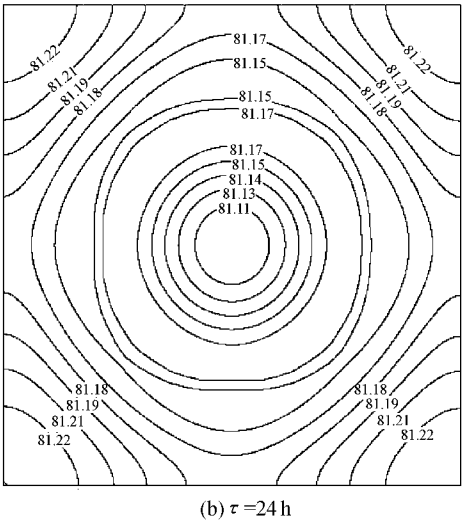
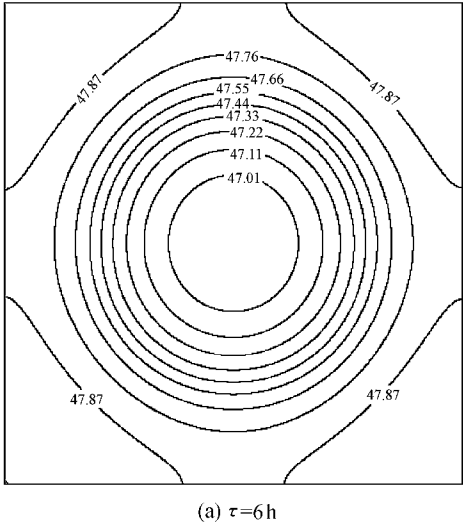


图 4 100 mm × 100 mm 混凝土试件内部温度场 (P = 28.3%, 单位 °C)

Fig.4 Temperature fields of concrete specimens with size of 100 mm × 100 mm (P = 28.3%, unit °C)

内部存在温度梯度并产生温度应力。

为更好地研究混凝土试件内的温度场和温度变化规律,将试件尺寸放大 10 倍,单元尺寸为 1 000 mm × 1 000 mm,网格尺寸 10 mm × 10 mm,网格单元数和结点数不变,计算时通过变换导热系数实现,将混凝土导热系数缩小为 1/100。图 5 为 $P = 28.3\%$, $y = 0.5$ m 对称面上各点的绝热温升曲线。由图 5 可知,试件内部各点的绝热温升过程差别较大,但当试件龄期大于 72 h 后,各点的温升已非常接近。

图 6 为 $\tau = 12$ h 和 72 h 的混凝土试件内部温度场。随着龄期的增加,试件内部的温差明显降低。

3.4 多骨料试件数值试验

混凝土试件尺寸及网格划分同单骨料试件,这里计算 2 种骨料体积比 $P = 50.3\%$ 和 67.5% 。 $P = 50.3\%$ 时,2 种投放的有限元数值模拟结果基本一致;骨料粒径和投放数量影响混凝土试件内部温度分布,但对混凝土最高绝热温升和温升过程并无明显影响。图 7 为有限元数值模拟结果和绝热温升试验结果比较,由图 7 可见,数值模拟结果和试验结果吻合较好,表明利用水泥水化程度曲线可以较准确地预测混凝土试件的绝热温升过程。

图 8 为骨料体积比 $P = 67.5\%$, $\tau = 6$ h 的混凝土试件内部的温度分布。由于试件内部各个骨料与水泥净浆相互包夹,计算的温度场分布并无明显规律,但最低温度位于较大骨料的中心位置。

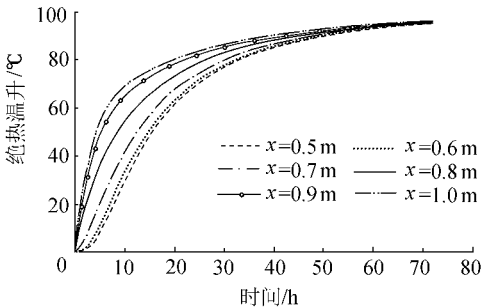


图 5 不同点的绝热温升曲线 (P = 28.3%)

Fig.5 Adiabatic temperature rise curves at different points (P = 28.3%)

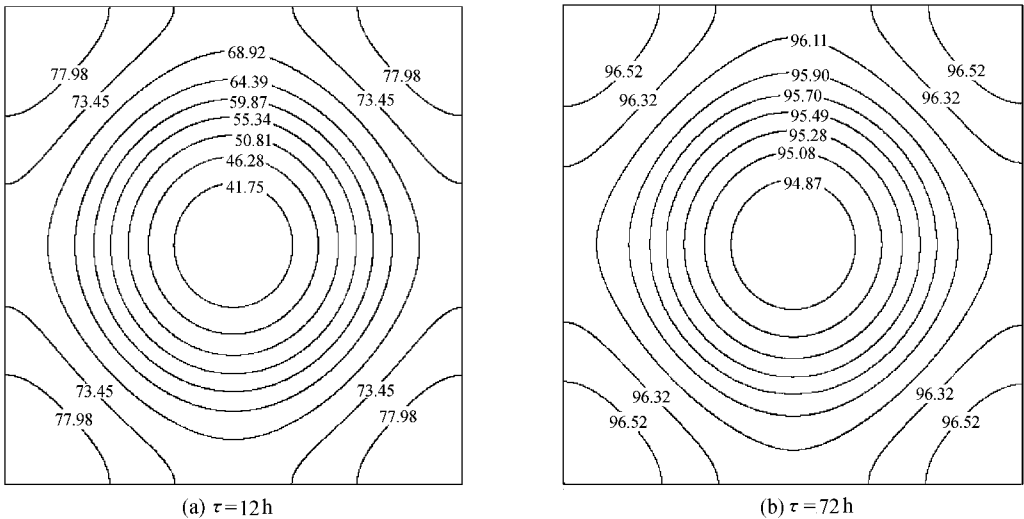


图 6 1000 mm × 1000 mm 混凝土试件内部温度场 ($P = 28.3\%$, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig.6 Temperature fields of concrete test specimens with size of 1000 mm × 1000 mm ($P = 28.3\%$, unit: $^{\circ}\text{C}$)

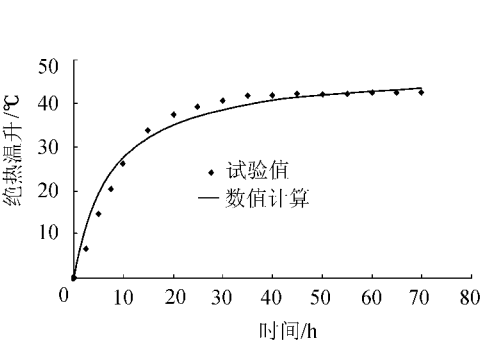


图 7 混凝土试件绝热温升曲线 ($P = 67.5\%$)

Fig.7 Adiabatic temperature rise curves of concrete specimens ($P = 67.5\%$)

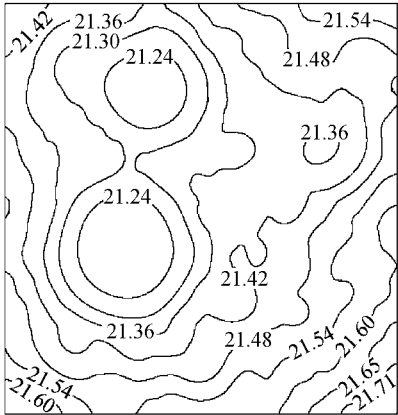


图 8 多骨料混凝土试件内部温度场 ($P = 67.5\%$, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig.8 Temperature fields of multi-aggregate concrete specimens ($P = 67.5\%$, unit: $^{\circ}\text{C}$)

4 结 语

- a. 混凝土在宏观上是均匀的,细观上是不均匀的.混凝土细观结构中,只有水泥在水化过程中产生水化热,粗细骨料从水泥水化热中吸收热量,混凝土试件内部各点的温度在细观上是不相同的.
- b. 混凝土绝热温升由水泥用量及水泥水化程度等因素决定,混凝土绝热温升可表示为水泥水化程度的函数.骨料粒径和投放数量影响混凝土试件内部温度分布,但对混凝土最高绝热温升和温升过程并无明显影响.
- c. 数值计算结果表明,利用水泥的水化程度过程曲线,可以较准确地预测混凝土绝热温升过程,减少混凝土绝热温升试验工作.
- d. 由于混凝土细观结构中骨料和砂浆基质的热学和力学性质差异,即使在绝热边界条件下,试件内部仍存在温度梯度和温度应力.

参考文献:

[1] 张子明,宋智通,黄海燕.混凝土绝热温升和热传导方程的新理论[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(3):1-6.
[2] 张子明,张研,宋智通.水化热引起的大体积混凝土墙温度分析[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(4):22-27.
[3] 张子明,郭兴文,杜荣强.水化热引起的大体积混凝土墙应力与开裂分析[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(5):12-

- [4] 张子明,冯树荣,石青春,等.基于等效时间的混凝土绝热温升[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(5):573-577.
- [5] 袁润章.胶凝材料学[M].武汉:武汉工业大学出版社,1989:47-70.
- [6] 吕宏基,杨德福.大体积混凝土[M].北京:水利电力出版社,1990:171-184.
- [7] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999:17-21.
- [8] 代光富,黄明清,刘莲芝.溶解热法测定水泥水化热[J].水泥,2001(12):38-39.
- [9] 张谦,宋亮,李家和.水泥水化热测定方法的探讨[J].哈尔滨师范大学学报,2001,17(6):8-9.
- [10] DABIC P, KRSTUJOVIC R, RUSIC D. A new approach in mathematical modeling of cement hydration development[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(7):1017-1021.
- [11] FENG X, GARBOCZI E, BENTZ D P. Estimation of the degree of hydration of blended cement paste by a scanning electron microscope point counting procedure[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(10):1787-1793.
- [12] BENTZ D P. Three-dimensional computer simulation of Portland cement hydration and microstructure development[J]. American Ceramic Society, 1997, 12(1):3-21.
- [13] 凌祥,徐善东,陈嘉南.颗粒定量测量的计算机图像处理技术研究[J].水泥,1998(11):33-35.
- [14] 王甲春,阎培渝.混凝土绝热温升的影响因素[J].混凝土与水泥制品,2005(3):1-4.

Prediction on adiabatic temperature rise of concrete based on meso-scale

SONG Zhi-tong^{1,2}, ZHANG Zi-ming¹, CHEN Jin-hang²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract : Based on the thermal properties and meso-scale components of concrete, the relationship between the adiabatic temperature rise of concrete and the hydration degree of cement was established. The adiabatic temperature rise of concrete was expressed as the function of hydration degree of cement. The concrete was assumed to be a two-phase composite material composed of mortar and aggregate with random distribution. The representative volume element with the size of 100 mm × 100 mm was divided into FEM grids of 1 mm × 1 mm. Two casting ways, single aggregate and various random aggregate, were considered. The temperature rise process of concrete was simulated by FEM from the meso-scale, and the distribution of the calculated temperature was studied. The numerical results show that the present model can accurately predict the adiabatic temperature rise of concrete. There exists temperature gradient and thermal stress inside the concrete specimens under the adiabatic conditions because of the difference of thermal and mechanical properties between the mortar and the aggregate of concrete.

Key words : meso-scale ; adiabatic temperature rise of concrete ; hydration degree ; composite material ; temperature gradient ; thermal stress