

相似理论在有缺陷混凝土热传导模型实验中的应用

杨锐玲 朱永华

(武汉大学土木建筑工程学院, 430072)

摘 要 将相似理论应用于热传导模型实验中, 可使所有参量无量纲化, 便于设计实验模型。把相似模型计算结果和实际模型检测结果进行了比较。

关键词 相似理论 缺陷混凝土

Application of Similarity Theories in Model Experiment of Conductive Heat Transfer in Decaying Concrete

YANG Ruiling ZHU Yonghua

(School of Civil Engineering, Wuhan University, 430072)

Abstract: Similarity theories are applied in the model experiments of conductive heat transfer. As a result, all parameters are nondimensional. This is benefit to the design of an experiment model. The computed results of a similar model are compared with the probed results of a prototype test.

Key words: similarity theories, decaying concrete

1 相似理论的提出

实验中复制某一现象的出发点便是这种现象所遵循的客观规律——微分方程组及其单值性条件。用原型进行实验, 往往成本高, 周期长, 风险大或者根本无法实现, 因为原型可能尺度很大, 无法在实验室复现, 或者原型是多种现象的复合, 无法突出主要影响因素而忽略次要因素等。实验研究的首要问题是如何正确设计模型, 如何正确安排实验以及如何对实验数据进行合理的分析以达到正确的判断。这需要两方面的知识: 一是所研究现象的知识, 即

能正确地给出描述所研究现象的微分方程组及其单值性条件; 二是需要懂得正确进行模型实验的指导理论——相似理论。

1.1 不稳定导热问题的分析解

固体热传导在非稳态情况下所适用的微分方程为^[1]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (1)$$

物体的特征尺度为 L , 初始条件:

$$t = 0, T_0 = C \quad (2)$$

第二、第三类边界条件:

$$q = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_w$$

收稿日期: 2004-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目, 批准号: 50178057

作者简介: 杨锐玲 (1971—), 女, 在读博士, 讲师。

$$h(T_w - T_f) = -\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_w \quad (3)$$

式中, T_f 为周围流体温度。

定义 $\theta = T - T_0$, 于是式 (1)、式 (2) 和式 (3) 可化为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \alpha \nabla^2 T \\ q &= -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n}\Big|_w \\ h(\theta_w - \theta_f) &= -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n}\Big|_w \\ t = 0, \theta &= 0 \end{aligned}$$

式中, $\theta_f = T_f - T_0$ 。

由第二相对型方程^[8]:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_0}{t_0} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{t}} &= \alpha_0 \bar{\alpha} \frac{\theta_0}{l_0^2} \nabla^2 \bar{\theta} \\ \therefore \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{t}} &= \frac{\alpha_0 t_0}{l_0^2} \bar{\alpha} \nabla^2 \bar{\theta} \end{aligned}$$

同理:

$$\begin{aligned} \bar{q} &= -\frac{\lambda_0 \theta_0}{q_0 l_0} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{n}}\Big|_w \\ \bar{h}(\bar{\theta}_w - \bar{\theta}_f) &= \frac{\lambda_0}{h_0 l_0} \bar{\lambda} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{n}}\Big|_w \\ \bar{t} = 0, \bar{\theta} &= 0 \end{aligned}$$

从单值条件量中选择 l, α, λ, q 作为基本测量单位。根据约束条件

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_0 t_0}{l_0^2} = 1 &\Rightarrow t_0^{(k)} = \frac{l^2}{\alpha} \\ \frac{\lambda_0}{h_0 l_0} = 1 &\Rightarrow h_0^{(k)} = \frac{\lambda}{l} \\ \frac{\lambda_0 \theta_0}{q_0 l_0} = 1 &\Rightarrow \theta_0^{(k)} = \frac{ql}{\lambda} \end{aligned}$$

准则型相对方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{\theta}^{(k)}}{\partial \bar{t}^{(k)}} &= \bar{\alpha} \nabla^2 \bar{\theta} \\ \bar{q} &= \bar{\lambda} \frac{\partial \bar{\theta}^{(k)}}{\partial \bar{n}}\Big|_w \\ \bar{h}^{(k)} (\bar{\theta}_w^{(k)} - \bar{\theta}_f^{(k)}) &= -\bar{\lambda} \frac{\partial \bar{\theta}^{(k)}}{\partial \bar{n}}\Big|_w \end{aligned} \right\}$$

根据相似第二理论, $\bar{\theta}^{(k)}$ 的解析式:

$$\bar{\theta}^{(k)} = \frac{(T - T_0)\lambda}{ql} = f(\bar{t}^{(k)}, \bar{\alpha}, \bar{\lambda}, \bar{q}, \bar{h}^{(k)}, \bar{x}_i)$$

$$\begin{aligned} &= f\left(\frac{\alpha t}{l^2}, 1, 1, 1, \frac{hl}{\lambda}, \frac{x_i}{l}\right) \\ &= f\left(\frac{\alpha t}{l^2}, \frac{hl}{\lambda}, \frac{x_i}{l}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

单纯对于第二类边界条件, $\bar{\theta}^{(k)}$ 的解析式可简化为:

$$\bar{\theta}^{(k)} = \frac{(T - T_0)\lambda}{ql} = f\left(\frac{\alpha t x_i}{l^2}\right) \quad (5)$$

式中, x_i/l 为以长度单位 l 来度量的自变量; $\frac{\alpha t}{l^2} = F_0$ 为傅里叶数, 是以准则性时间单位 l^2/α 来度量的复合自变量。 $\frac{\alpha t}{l^2}$ 及 x_i/l 是相似现象群的共用自变量, 不能作为定型准则, 在模型实验中无约束力。

$\frac{(T - T_0)\lambda}{ql}$ 基尔比契夫准则, 是因变量 T 的无量纲量, 是以准则性测量单位 $(\frac{ql}{\lambda})$ 测量的准则性因变量。

$B_i = \frac{hl}{\lambda}$ 毕渥准则, 作为唯一的定型准则, 来自于第三类的边界条件表达式, 该式是边界上外供热能力和内导热能力平衡式。

由式 (5) 可见, 第二类边界条件下的导热无定型准则, 模型和原型相似条件仅剩单值条件和几何相似。

2 实验原理和方法

2.1 试件选择及实验条件

实验室试件仅有 $150 \times 150 \times 150$ mm 四块立方体混凝土块, 设计强度为 C_{25} , 各试块尺寸如表 1 所示。

表 1

编号	尺寸 (mm)	缺陷物	缺陷尺寸 (mm)
1、2、4#	$150 \times 150 \times 150$	无	
3#	$150 \times 150 \times 150$	泡沫长方体	$50 \times 50 \times 150$

本研究采用日本产 TH51-707 型红外热像仪, 其测温范围为 $-50 \text{ }^\circ\text{C} \sim +2000 \text{ }^\circ\text{C}$, 探测精度为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 探测距离为 $20\text{cm} \sim \infty$, 红外热像为彩色视屏显示。拍摄现场环境温度为 $38 \text{ }^\circ\text{C}$, 室内开有空调, 温度为 $27 \text{ }^\circ\text{C}$ 。为了模拟实际情况无限大平板的一维传热问题, 我们把四块混凝土块并排放在一起, 为了消除边界环境的影响,

四周用书覆盖,仅露前、后面为传热边界面。红外检测技术采用在工件的一个表面加热,而在其背面(另一面)记录温度分布的主动式双面加热法,热源采用太阳照射。在日照温度为 38℃ 的情况下,四块试件放在阳光下开始加热。为了便于区分,把加热面记为 A 面,把与加热面相对应的面记为 B 面。我们首先把试件放在阳光下暴晒半个小时,使其内部产生温度梯度,然后开始拍摄。每隔 20s 拍摄一次 B 面热像。下面是实验现场。

2.2 实验观测及分析

2.2.1 实验现象

下面给出部分检测的红外线热像图,图 3 是从开始加热为零时刻至第 45 分钟拍摄的。图 4 是大约在第 55 分钟时刻拍摄的。图 5 是图 4 与 6-3 相减的红外线热像差图。这样做的目的是消除初始温度差异带来的误差,使初始温度为零。另一方面使缺陷对应的表面温度和非缺陷对应的表面温度差异更大,红外线热像图更加显著,如图 5 所示。

2.2.2 实验现象分析

由于混凝土的热容量较大,表面温度差异在很短的时间内难于显示出来(图 3 和图 4),另外为了消除表面干扰的影响,采用不同时刻拍摄的热图相减的温度差场(图 5),折线围成的

表面区域温度变化较慢,是由于缺陷的存在,热传导受到阻碍,由另一面传过的热量遇到缺陷阻碍了传热,冷面温度升高较慢,因此温度

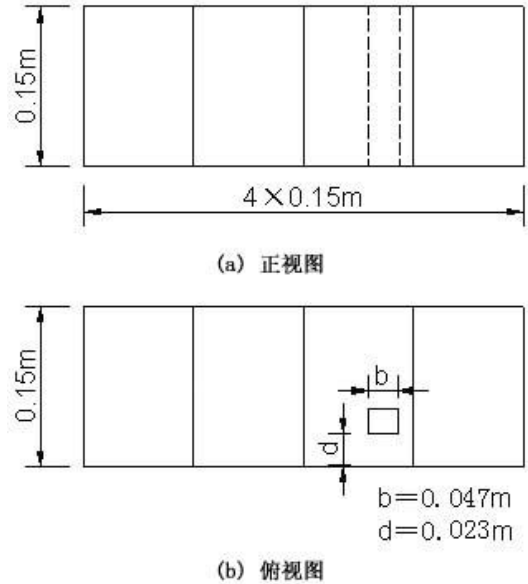


图 1 试件尺寸图



图 2 被检测试件



图 3 11:37:22 红外线热像图



图 4 11:48:55 红外线热像图

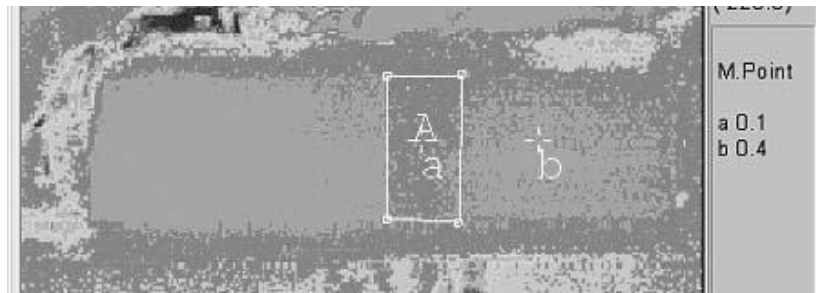


图5 图4减图3红外线热像差图

差图上表现为低温区，如图5所示。

2.3 实验结果与模型结算结果比较

(1) 参数对照

如表2所示。

表2

	相似模型参数	原试件参数
测量单位(长度L)	1	0.15m
导热率(λ)	1	1.5W/m.K
密度(ρ)	1	2200kg/m ³
比热(c)	1	837.4J/kg.K
热流(q)	1	1000W/m ²
对流换热系数(h)	1	10W/m ² .K
毕渥数(Bi)	1	1
傅里叶数(F_0)	0.1302	3600s
基尔比契夫数	$T' = T/100$	T °C
缺陷大小	$0.3133 \times 0.3133 \times 1$	$0.047 \times 0.047 \times 0.15m^3$
整体尺寸	$4 \times 1 \times 1$	$0.6 \times 0.15 \times 0.15m^3$

(2) 模型折算后时间和温度

根据相似理论(毕渥数相等)，使傅里叶数(F_0)和基尔比契夫数分别相等来确定二者之间的转换关系。 $F_0 = 0.1302$ 对应的试件实际测量时间为3600s(1h)，试件的实际温度等于基尔比契夫数乘以100。这样计算出的试件表面温度以后还必须加上试件的初始温度才是试件的真正温度。图6是用双面法检测的试件表面温度场图。

(3) 计算温度和测量温度比较(T_0 试件初始温度)(见表3)

从表3中可以看出，缺陷对应表面温度和非缺陷表面对应的温度差值非常接近，有一定的精度。但是由于测量精度为0.1 °C，而计算精

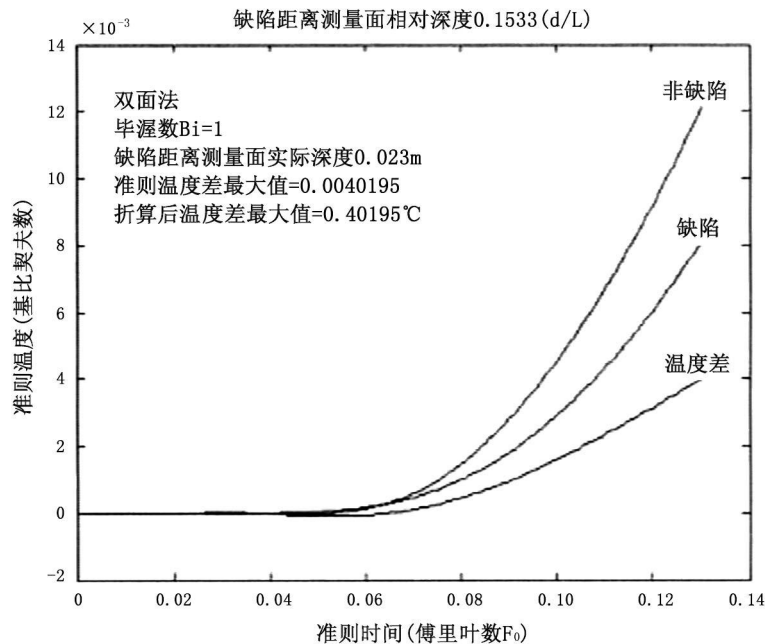


图6 缺陷对应表面，非缺陷对应的表面及二者温度差曲线图

