

## 論文

## [1029] 高温下の熱拡散率測定法とその応用

正会員 太田福男 (大同工業大学)

## 1. はじめに

コンクリートが火災などの高温加熱を受けると、コンクリートの表面部分から内部に向けて熱伝達が進行するので、その劣化程度は表層部分が著しく、深部に行くにしたがって緩和される。このようなコンクリートの劣化状況を把握するためには、高温時のコンクリートの熱的性質を把握しておく必要がある。なかでもコンクリート内部の温度変動速度を表す熱拡散率はきわめて重要である。コンクリートの熱拡散率の測定は、低温領域（100℃以下）では温湯につけて一様な温度とした円柱供試体を冷却して、供試体内部の温度変化を測定することにより求められる。水中で冷却する2次元の熱伝導方程式 [1] を用いたGloverの方法と軸方向に熱損失がないと仮定した1次元の熱伝導方程式を用いた空中で冷却するThomsonの方法とがある。

火災相当温度の高温加熱を受けたコンクリートの熱拡散率の測定には、前述のGloverの方法は利用できないことは明白であるが、Thomsonの方法によって測定する場合は、軸方向の熱伝導を無視できるような、何らかの実験方法を講ずる必要がある。すなわち、円柱供試体の高さ（軸長）と直径の比が軸方向の熱伝導を無視できる程に十分大きいか、あるいは軸方向からの熱の流入が全くない装置の中に供試体を置くか、いずれかの方法を採らなければならない。これらの測定方法は高温であればある程、実験装置が大型化するかもしくは測定精度の低下を招く。そこで、Gloverの方法による2次元の熱伝導方程式を用いてThomsonの方法で熱拡散率を求めることが考えられるが、この方法は実際には、円柱供試体の中心軸上に温度測定センサーをいくつも正確に設置する必要があり実用的でない。このように高温加熱を受けるコンクリートの熱拡散率の測定は、熱伝導方程式の境界条件と同一の実験条件を設定することがきわめて難しく、確かな方法が確立していないのが現状である。このため、前述の測定上の難点をできる限り克服するために、本報では、まず、立方形に近い角形供試体を一定雰囲気炉内で全面加熱し、P.J.Schneiderの2次元の非定常熱伝導方程式を3次元に拡張した方程式を用いて、方程式の境界条件を実験条件と同一にした解により、熱拡散率を求める方法を提案する。この方法の特徴は、温度センサーを供試体中心部に1個埋め込むだけでよく、供試体の加熱方法も簡単などころにある。

次に、解析ならびに実験条件が同じでも、熱拡散率は、測定物質が加熱温度によって質的变化をしない場合では、加熱開始時から供試体内部温度が一定になるまで加熱した、温度上昇域で測定しても、一定温度に到達後初期温度まで冷却する、冷却域で測定しても、理論的には同じである。ところが、高温を受けるコンクリートでは、加熱段階で供試体内部温度に応じて自由水あるいは結合水が飛散するなど様々な質的变化をするため [2]、温度上昇域で測定した熱拡散率と、冷却域で測定した熱拡散率の値は相違するものと思われるが、この点について今のところ十分明らかにされていない。このため、高温を受けるコンクリートの熱拡散率が温度上昇域の測定値と、冷却域で測定した値とどの程度相違するか調べる。最後に、本報による熱拡散率測定値と熱伝導方程式を用いて、供試体内部の温度を推定する。

## 2. 実験方法

## (1) 実験の概要

高温下のコンクリートの熱拡散率を測定するための実験（実験Ⅰ）とコンクリート供試体内部温度推定のための実験（Ⅱ）を表-1に示すような実験要因に従って行った。

表-1 実験要因

| 要因            | 実験Ⅰ                                    | 実験Ⅱ                    |
|---------------|--|------------------------|
| 含水率(%)        | 0, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5                  | 0                      |
| 加熱温度(°C)      | 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 | 200, 400, 600, 800     |
| 水セメント比 W/C(%) | 50, 60, 70                             | 60                     |
| 供試体寸法(cm)     | 厚さ14.0 (断面積15.0×15.0)                  | 厚さ3.5, 7.0, 10.5, 14.0 |

(2) 供試体の製作

供試体の製作には、普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は川砂、粗骨材は川砂利を使用した。コンクリートの調合は表-

表-2 コンクリートの調合表

| 水セメント比 W/C(%) | セメント C(kg) | 水 W(kg) | 砂 S(kg) | 砂利 G(kg) |
|---------------|------------|---------|---------|----------|
| 50            | 362        | 182     | 702     | 1018     |
| 60            | 295        | 177     | 767     | 1018     |
| 70            | 253        | 177     | 837     | 985      |

2に示す通りである。なお、粗骨材は最大粒径を20mmとした。供試体は、材令2日目に脱型、試験材令28まで湿空養生（湿度90%±3%、温度20°C±1°C）を行った。

(3) 供試体の加熱方法および内部温度測定方法

供試体の加熱には上下四方の6面加熱型窯業用電気炉（最大加熱温度800°C、内容量120cm×120cm×120cm）を用いた。加熱方法は図-1に示すように炉内雰囲気温度が設定温度に到達後供試体を炉内中央部に設置した。供試体には熱拡散率測定のために、図-2に示すように、センサーを供試体の中心A点と、表面より1cm深部に入ったB点の2ヶ所に供試体製作時にセットした。個々の供試体のA点、B点の位置は加熱測定後割裂して直接測定し、A点は中心より±3mm以内にあるものについては中心にあるものとし、それ以外にあるものについては実測値を用いて、後述する(8)式より求めた。

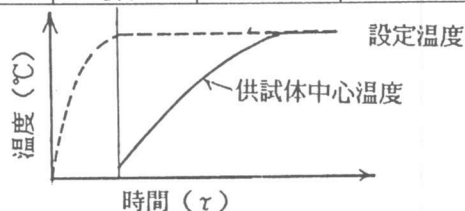


図1 加熱方法

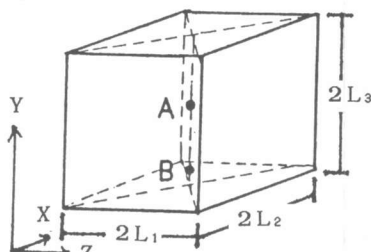


図2 供試体内部のセンサー位置

個々の供試体のA点、B点の位置は加熱測定後割裂して直接測定し、A点は中心より±3mm以内にあるものについては中心にあるものとし、それ以外にあるものについては実測値を用いて、後述する(8)式より求めた。

(4) 熱拡散率の測定

コンクリートの熱拡散率を求めるために、図-2に示すような、一辺の長さがそれぞれ2L<sub>1</sub>、2L<sub>2</sub>、2L<sub>3</sub>の直方体の供試体を想定して導いた。この場合の熱拡散方程式は、(1)式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 1/\alpha \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) \quad \text{--- (1)}$$

ここに、α；拡散率、τ；時間 T；温度

(1)式の解を(2)式のように仮定する。

$$T(x, y, z, \tau) = X(x) Y(y) Z(z) \theta(\tau) \quad \text{--- (2)}$$

いま、図-2の供試体が厚さ2L<sub>1</sub>、2L<sub>2</sub>、2L<sub>3</sub>の3つの無限平板から成り立っているとすると、3つの無限平板の微分方程式は(3)式ようになる。

$$\begin{aligned}(\partial^2 T_1 / \partial x^2) &= 1 / \alpha (\partial T_1 / \partial \tau) \\(\partial^2 T_2 / \partial y^2) &= 1 / \alpha (\partial T_2 / \partial \tau) \\(\partial^2 T_3 / \partial z^2) &= 1 / \alpha (\partial T_3 / \partial \tau)\end{aligned} \quad \text{--- (3)}$$

これらの解を  $T_1 = T(x, \tau)$ ,  $T_2 = T(y, \tau)$ ,  $T_3 = T(z, \tau)$  とすると (2) 式は (4) 式のようになる。

$$T(x, y, z, \tau) = T_1(x, \tau) T_2(y, \tau) T_3(z, \tau) \quad \text{--- (4)}$$

(1) 式に代入するため (4) 式を微分する。

$$\begin{aligned}\partial^2 T / \partial x^2 &= T_2 T_3 (\partial^2 T_1 / \partial x^2) \\ \partial^2 T / \partial y^2 &= T_1 T_3 (\partial^2 T_2 / \partial y^2) \\ \partial^2 T / \partial z^2 &= T_1 T_2 (\partial^2 T_3 / \partial z^2) \\ \partial T / \partial \tau &= T_2 T_3 (\partial T_1 / \partial \tau) + T_1 T_3 (\partial T_2 / \partial \tau) + T_1 T_2 (\partial T_3 / \partial \tau)\end{aligned}$$

(3) 式を用いると

$$\partial T / \partial \tau = \alpha T_2 T_3 (\partial^2 T_1 / \partial x^2) + \alpha T_1 T_3 (\partial^2 T_2 / \partial y^2) + \alpha T_1 T_2 (\partial^2 T_3 / \partial z^2)$$

これらを (1) 式に代入すると

$$\begin{aligned}T_2 T_3 (\partial^2 T_1 / \partial x^2) + T_1 T_3 (\partial^2 T_2 / \partial y^2) + T_1 T_2 (\partial^2 T_3 / \partial z^2) \\ = 1 / \alpha \{ \alpha T_2 T_3 (\partial^2 T_1 / \partial x^2) + \alpha T_1 T_3 (\partial^2 T_2 / \partial y^2) \\ + \alpha T_1 T_2 (\partial^2 T_3 / \partial z^2) \}\end{aligned}$$

すなわち、先に仮定した (2) 式は (1) 式の解として満足している。従って、図-2の供試体の熱拡散率は、厚さ  $2L_1$ 、 $2L_2$ 、 $2L_3$  の3つの無限平板の解の積によって求めることができる。

次に、厚さ  $2L$  で、初期温度  $T_i$  の無限平板が  $T_1$  の雰囲気中にあるときの熱拡散方程式 (5) 式の解は、すでに (6) 式のように求められている [3]。

$$\partial^2 T / \partial x^2 = 1 / \alpha (\partial T / \partial \tau) \quad \text{--- (5)}$$

$$(T - T_1) / (T_i - T_1) = 4 / \pi \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (1/n) e^{-(n\pi/2L)^2 \alpha \tau} \sin(n\pi x / 2L) \right\} \quad (n=1, 3, 5, \dots) \quad \text{--- (6)}$$

また、(6) 式の  $x=L$  のとき

$$\{ T(L, \tau) - T_1 \} / (T_i - T_1) = 4 / \pi [ e^{-(\pi/2L)^2 \alpha \tau} - 1/3 (e^{-(3\pi/2L)^2 \alpha \tau}) + 1/5 (e^{-(5\pi/2L)^2 \alpha \tau}) - \dots ] = P(\theta) \quad (\text{ここに } \theta = \alpha \tau / L^2) \quad \text{--- (7)}$$

なお、(6) 式は表面熱抵抗 ( $1/hA=0$  と仮定、ここに  $h$ : 単位表面抵抗、受熱面積) を無視した式である。

以上のことから、図-2の供試体内部温度の中心温度より、熱拡散率を求める式は (8) 式のようになる。

$$\{ T(L, \tau) - T_1 \} / (T_i - T_1) = P(\theta_1) \cdot P(\theta_2) \cdot P(\theta_3) \quad \text{--- (8)}$$

### 3. 結果とその考察

#### (1) 供試体中心温度 (T) - 加熱冷却時間 ( $\tau$ ) 曲線

炉内雰囲気温度  $800^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$  中にて加熱したコンクリートの中心温度 (T) - 加熱時間 ( $\tau$ ) 曲線の一例を図3. 1および図3. 2に示す。この図から、コンクリートの中心温度 (T) は、加熱開始直後から約  $120^\circ\text{C}$  までは直線的に上昇するが、 $120^\circ\text{C}$  付近でフラットになり、その後  $530^\circ\text{C}$  付近までは連続して上昇し、 $530^\circ\text{C} \sim 560^\circ\text{C}$  で再度停滞した後設定温度まで

昇温し一定状態となることが分かる。この傾向は水セメント比、供試体の厚さ、にかかわらず600℃以上の雰囲気中で全ての供試体について表われた。中心温度(T)が120℃付近で昇温が止まるのは供試体内部の自由水の飛散(蒸発)によるものであり、含水率の大きい供試体程このフラット部分が長くなる。530℃~560℃付近で中心温度(T)の昇温が停滞するのはCa(OH)<sub>2</sub>が分解して脱水することによる[2]ものと思われる。

図3.3にコンクリートの中心温度(T)-冷却時間(τ)曲線の一例を示す。

この図から、コンクリートの冷却時のT-τ曲線は、加熱時のそれと全く異なった曲線を示していることがわかる。すなわち、T-τ曲線は、最大加熱温度にかかわらず、連続的に漸減する傾向にある。これは、前述のように、コンクリートの加熱過程で、自由水ならびに結合水が飛散しコンクリートの質的变化が起こるが、冷却時にはコンクリートの質的变化がないためと思われる。コンクリートの熱拡散率の測定は、一般にこの冷却時のT-τ曲線に基づいて行われている。

### (2) 熱拡散率(α)とコンクリートの含水率との関係

高温加熱を受けるコンクリートの熱拡散率(α)は、一般に、冷却時のコンクリートのT-τ曲線から求められるが、実際に加熱をうけるコンクリートの内部温度分布を推定する際には、コンクリート温度上昇時の熱拡散率の変動を把握する必要がある。上昇時の熱拡散率(α)と冷却時の熱拡散率(α)の違いの主な点は、加熱時のコンクリート中の自由水ならびに結合水の飛散の影響を受けることにあるものと思われる。なかでも、コンクリート中に含まれる自由水は熱拡散率に大きく影響するものと思われるので、この点について調べた。図4.1

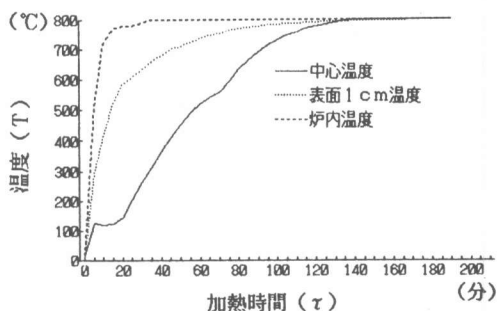


図3.1 800℃加熱コンクリートのT-τ曲線

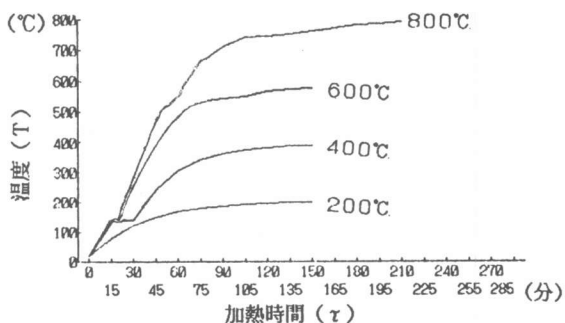


図3.2 200℃~800℃加熱コンクリートのT-τ曲線

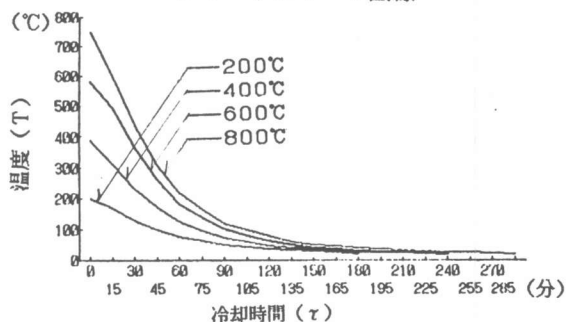


図3.3 冷却時のコンクリートのT-τ曲線

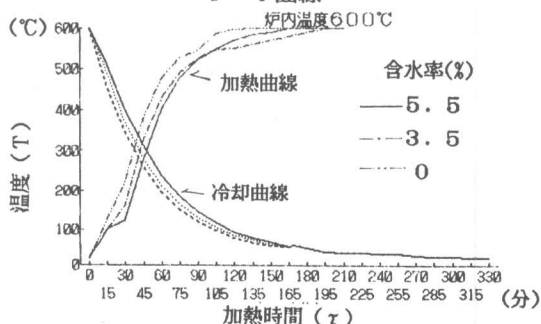


図4.1 含水率の異なる加熱コンクリートのT-τ曲線

は、600℃加熱時の含水率が0%、3.5%および5.5%のコンクリートの中心温度(T)と、加熱・冷却曲線の一例を示したものであり、図4.2は、同コンクリートの加熱時の熱拡散率( $\alpha$ )を、図4.3は同じく冷却時の熱拡散率( $\alpha$ )をそれぞれ示したものである。この図から、加熱時のコンクリートの熱拡散率は、図4.1のコンクリートの中心温度が300℃付近までは(図4.2の加熱時間45分頃までは)、コンクリート中の自由水が飛散するため、コンクリートの含水率の大小によってかなり変動するが、自由水が無くなるにつれて、ある一定の範囲に収束する。しかも、この収束する熱拡散率の大きさは、冷却時の熱拡散率の値とほぼ同程度になることがわかった。

### (3) 高温加熱を受けるコンクリートの内部温度推定

#### 1) 冷却時の熱拡散率を用いたコンクリートの内部温度の推定

これまでの実験結果から、高温加熱時のコンクリートの熱拡散率( $\alpha$ )は供試体の中心温度が約300℃付近までは、コンクリートの含水率の影響を受けることが明らかになった。このため、厳密には、高温加熱を受けるコンクリート内部温度は、コンクリート中の自由水の移動・飛散状況と熱拡散率との関係を詳細に把握していなければ推定できない。しかしながら、供試体

の中心温度が300℃以上になると、加熱時のコンクリートの熱拡散率は冷却時の熱拡散率に近い値となっていることから、加熱によるコンクリートの自由水などの変化に伴う熱拡散率の変化を無視した冷却時の熱拡散率を用いてコンクリート内部温度を推定しても、実用上支障をきたす程の誤差が生じるとは思われない。この誤差の程度を確かめるため、この方法によって推定したコンクリート内部温度と実験値とを比較した。その結果の一例を図5.1に示す。なお、図には、供試体表面より1cm深部に入った点の温度も対比してある。この図によれば、供試体内部実測温度が400℃までの供試体内部温度推定値は、実測値よりやや小さい値を示すなど部分的には若干相違するところがあるものの、全体としては実測値とほぼ一致していることがわかる。本研究のように、火災を受けたコンクリートの劣化度を診断するための判断資料の一つとして、コンクリートの内部温度の推定に利用しようとする場合では、図5.1に示す推定精度でも十分と思

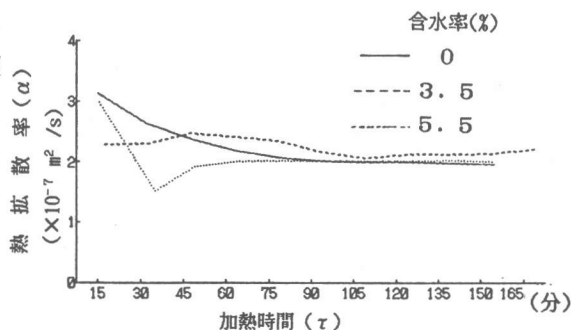


図4.2 加熱時の $\alpha$

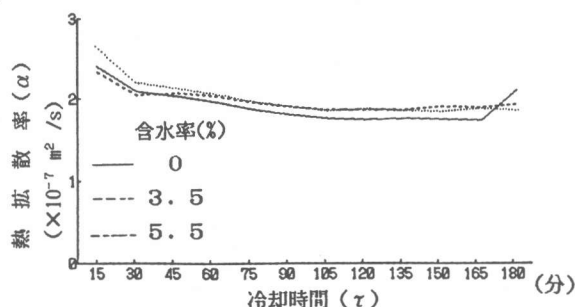


図4.3 冷却時の $\alpha$

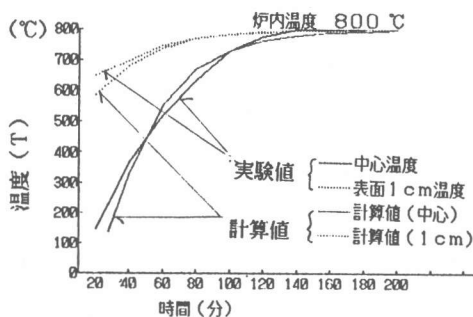


図5.1 冷却時の $\alpha$ を用いたTの推定

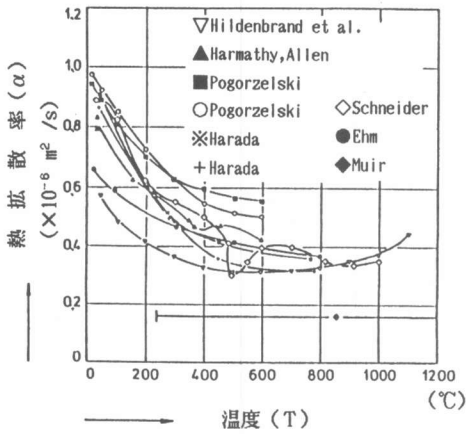


図5.2 既往の研究者による熱拡散率[2]

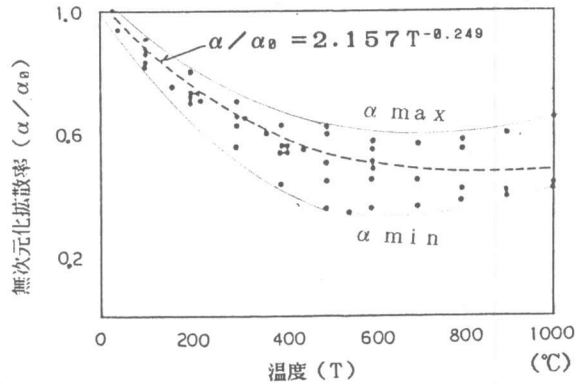


図5.3

全熱拡散率(α) - 加熱時間(τ) 曲線

われる。

## 2) 熱拡散率回帰式

コンクリートの熱拡散率は、実験方法の相違によっても異なることが知られている[1]ので、本実験で得られた熱拡散率(α)が、必ずしも一般に適用できるとは限らない。このため、コンクリートの内部温度を推定するためのより実用的な熱拡散率(α)を求めするために、本実験結果のみならず、図5.2に示す既往の研究者によって求められた結果も併せてα-T関係を一括表示(図5.4)し、回帰式を求めると(9)式ようになる。

$$\alpha/\alpha_0 = 2.157T^{-0.249} \quad (\alpha_0 = \text{常温時の}\alpha) \quad \text{--- (9)}$$

いま、この回帰式によって求められた熱拡散率(α)を用いてコンクリートの内部温度を推定した結果の一例を図5.4に示す。この図から、一般的な回帰式から求めた熱拡散率(α)を用いるとコンクリートの内部温度は、およそ50℃内外の精度で推定できることがわかる。

## 4. まとめ

(1) 高温加熱を受けるコンクリートの熱拡散率は非定常三次元熱拡散率方程式を用いて求めることができる。

(2) 高温加熱を受けるコンクリートの内部温度分布は常温の熱拡散率が分かれば(8)式と回帰式(9)式を用いて推定できる。

## 参考文献

- (1) 岡田, 六車編集, コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店
- (2) 森永訳; コンクリートの熱的性質, 技報堂, 1983
- (3) Schneider, P. S; Conduction Heat Transfer, Addisonwesley Publishing Company, Inc. Reading Mass., 1955