

## 論文

## [1225] コンクリートの熱伝導特性の簡易試験法に関する検討

渡辺博志\*<sup>1</sup>、河野広隆\*<sup>2</sup>、杉山嘉則\*<sup>3</sup>

## 1. まえがき

マスコンクリートの熱応力解析を行なうためには、コンクリートの発熱特性、熱伝導特性、熱膨張係数などの熱特性値を知る必要がある。このうち、コンクリートの熱伝導特性は熱伝導率、熱容量、熱拡散係数によって表される。これらの熱伝導特性の試験法は、これまでいくつかの方法が提案されてきたが、熱拡散係数を求めるGlover法を除いては、必ずしも簡単に行なえるものではなく、試験を省略し過去の測定結果を参考に数値が定められる場合が多い。ところが、熱伝導特性はコンクリートの配合条件、あるいは使用材料などによって変化し結果に大きな影響を与えるため、試験によりその値を定めることが望ましい。ここでは、熱伝導率、熱容量、熱拡散係数を簡易な機器構成で計測する手法について検討を行なったので報告する。

## 2. 熱伝導特性値の計測手法の概要

コンクリートの熱伝導率 $\lambda$ 、熱容量 $\rho c$ 、熱拡散係数 $h^2$ の間には、その定義から次式で示される関係が成立する。すなわち、

$$\lambda = \rho c \cdot h^2 \quad (1)$$

このため、熱伝導率、熱容量、熱拡散係数をすべて試験によって求める必要はなく、この中から簡単な試験によって得られる2つの特性値を求め、残りの一つは上式によって算出すればよい。一般的には、Glover法により熱拡散係数が簡単に求められるので、熱容量もしくは、熱伝導率を求めるとよい。熱伝導率の試験法は直接円筒法〔1〕もしくは平板比較法〔2〕が用いられ、熱容量は比熱測定用断熱容器を用いて求められる。しかし、熱伝導率を直接円筒法や平板比較法で測定するには定常状態を作り出して、熱流を一定にした状況を再現する必要があるが、定常状態を作り出すことが非常に困難であり、また、熱の逸散をくいとめることも困難となる。いっぽう、熱容量の測定においても、コンクリートと水の温度が一定になるまで断熱状態を保たなければ正確な値が計測できないが、このためには、コンクリート供試体を非常に小さくしコンクリートと水の温度が一定になるまでの時間を短くする必要がある。しかし、コンクリート供試体の体積を必要以上に小さくすると、供試体に含まれる粗骨材の量が供試体によってかなり変動したり試験中の誤差が大きくなるので、正確な熱容量が測定できない恐れがある。コンクリート供試体の体積を大きくすると、コンクリートと水の温度が一定になるまでの時間が長くなり、外部から熱を供給し逸散する熱を補正する必要が生じるが、この操作を正確に行なうには高度の温度制御が必要となり必ずしも容易に行なえるものではない。

ここでは、熱拡散係数を求める際に行なわれるGlover法を若干変更し、非定常的に熱容量を求める方法を検討した。試験方法の概要は次のとおりである。試験供試体は、Glover法で行なう円

\*1 建設省土木研究所 材料施工部コンクリート研究室主任研究員 (正会員)

\*2 建設省土木研究所 材料施工部コンクリート研究室室長 (正会員)

\*3 麻生セメント株式会社中央研究所 コンクリートチーム研究員

柱供試体と同じものを用い、この供試体を所定の温度に一樣に暖めた後に、所定量の水が入った発泡スチロール容器にいれ、時間経過と共に低下する供試体の温度を計測することにより、熱容量を決定するものであり試験の手順はGlover法と同様である。このように決定した熱容量とGlover法により決定された熱拡散係数から(1)式を用いて熱伝導係数を算定した。測定の手順を図-1に示す。なお、このように算定した熱伝導率が妥当なものかどうか確認するため、別途直接円筒法による熱伝導率の計測も行ない、両者の比較検討も行なった。

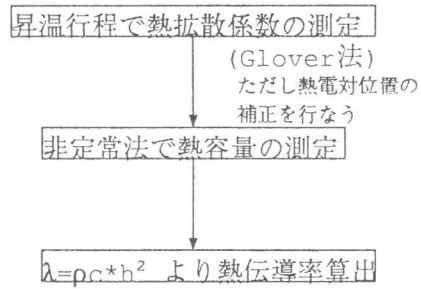


図-1 熱特性測定手順

### 3. 熱容量測定試験法

非定常状態で熱容量を測定する試験法について述べる。一樣の温度に暖めた円柱供試体が水に対して、初期状態で $\theta_0$ だけ温度が高かったとする。水の熱容量を $\rho_w c_w$ 、水の体積を $V_w$ 、時間 $t$ での水温を $f(t)$ とする。供試体の水に対する相対温度を $\theta(r, z; t)$ 、円柱供試体の半径を $R$ 、高さを $L$ とする。コンクリートの熱拡散係数を $h^2$ とすると、次の拡散方程式が得られる。

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + f(t) = h^2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} \right\} \quad (2)$$

ここで境界条件、初期条件は次のとおりである。

$$\begin{aligned} \bar{\theta}(R, z; t) = 0 \quad \bar{\theta}(r, 0; t) = 0 \quad \bar{\theta}(r, L; t) = 0 \\ f(0) = 0 \quad \bar{\theta}(r, z; 0) = \theta_0 \end{aligned} \quad (3)$$

一方、コンクリート-水系に熱量保存法則が成り立つとすると次の関係式が得られる。

$$\int_0^L dz \int_0^R (\theta_0 - \bar{\theta} - f(t)) \rho c 2\pi r dr = \rho_w c_w V_w f(t) \quad (4)$$

$\bar{\theta}(r, z; t)$ の解を次の形で表す。

$$\bar{\theta}(r, z; t) = \sum_m \sum_n A_{mn}(t) \cdot J_0(\beta_m r) \cdot \sin(\kappa_n z) \quad (5)$$

ただし $J_n(x)$ :  $n$ 次ベッセル関数

$\beta_m = x_m/R$ , ここで $x_m$ は $m$ 番目の0次ベッセル関数の零点

$\kappa_n = (2n-1)\pi/L$

支配方程式・境界条件および熱量保存法則を適用し、ベッセル関数および三角関数の直交性を利

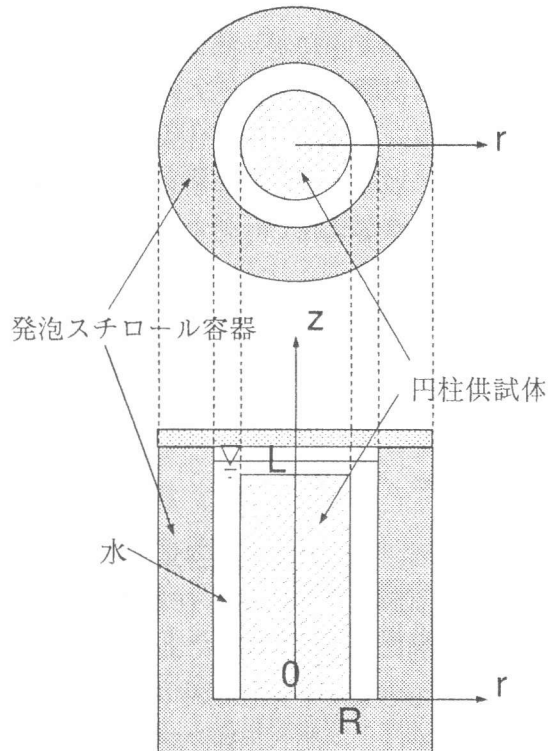


図-2 熱容量測定方法

用すると、 $A_{ij}(t)$ について次の連立常微分方程式が得られ、これを与えられた初期条件のもとで解けばよい。

$$\frac{1}{4}\{J_1(\beta_i R)\}^2 \dot{A}_{ij}(t) + \frac{1}{4}h^2(\beta_i^2 + \kappa_j^2)A_{ij}(t) - \frac{8J_1(\beta_i R)}{RL(1+k)\beta_i \kappa_j} \sum_m \sum_n \dot{A}_{mn}(t) \frac{1}{x_m(2n-1)\pi} J_1(\beta_m R) = 0 \quad (6)$$

ここで、(6)式をみると、 $A_{ij}(t)$ の項に $h^2(\beta_i^2 + \kappa_j^2)$ の係数がついている。このことは、時間軸に対して、Glover法と同様の無次元化が可能であることを示している。すなわち、円柱供試体の直径と高さの比が同一であれば、供試体の大きさや熱拡散係数の値が異なっても、時間軸として無次元時間 $t' = h^2 \cdot t / R^2$ を採用すれば、供試体の温度変化は同一の値となる。

測定方法は図-2に示すとおりで系からの熱の逸散を小さくするため、発泡スチロール容器を用い計測に当たっては上蓋を取付けた。コンクリートの熱容量が変化すると、それに応じてコンクリート供試体の周囲の水の温度変化に差が生じるため、コンクリート供試体の境界条件である表面部の温度も、それに応じて変化する。従って、コンクリート供試体の熱容量を様々な値を仮定して、供試体中心温度変化をあらかじめ上記の方法で解析的に明らかにしておき、その解析結果が実測値にもっとも近くなる熱容量を決定すれば、熱容量を求めることができる。これは、非定常状態での計測結果を用いるため、混合法などのように、コンクリート供試体と水の温度が同一で一定になるまで長時間待つ必要はなく、短時間で結果が得られる特長がある。従って、コンクリート供試体-水系から逸散する熱量が余り大きくはならず、計測結果に与える影響は小さくなると考えられる。実測によると容器からの熱の逸散速度は1.3cal/分/°Cであった。試算の結果この影響は4%~5%程度であるので、ここでは補正を行なわなかった。[3]

#### 4. コンクリートの熱伝導特性の試験計測

##### 4.1 試験計測の概要

ここでは、Glover法および上記に示した熱容量試験法によりコンクリートの熱拡散係数および熱容量の測定を行ない、熱伝導率を算出した。用いたコンクリート供試体はφ10cm×20cmの円柱供試体で、表-1に示す5つの配合条件についてそれぞれ3本ずつ供試体を作成した。配合番号1~3はコンクリート中の骨材量をかなり極端に変動させている。一般にセメントペーストと骨材の熱伝導特性は異なっているため、単位骨材量を変化させた配合1~3では、計測値にかなり差が生じるはずであり、ここで検討した試験方法に汎用性を持たせるには、いずれの配合条件でも正確な計測が可能であることを明らかにしなければならない。一方、この試験方法が適切な計測結果を与えるものであったかどうか確認するため、φ20cm×40cm内径が4cmの円筒供試体による直接円筒法での熱伝導率測定を行なった。Glover法では供試体温度を20°Cに設定し、50°Cの温水中に供試体を浸せきし、供試体中央に埋

表-1 コンクリートの示方配合表

配合番号	W/C (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				骨材重量比
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
配合1	60	3.6	168	280	815	1025	0.8
配合2	60	3.5	314	524	558	699	0.6
配合3	60	3.8	435	725	344	431	0.4
配合4	60	8.6	164	274	777	975	0.8
配合5	60	0.4	178	298	847	1061	0.8

め込んだ熱電対により供試体温度変化を測定した。50℃の温水はサーモスタットと投げ込み式のヒータ(100V-1kW)により簡易に作り出すことができる。この操作により供試体温度は試験終了時には一様に50℃の温度に上昇している。これを20℃、340ccの水を入れた発泡スチロール容器にいれ温度変化を計測した。直接円筒法による熱伝導率の測定は、円筒供試体の内外の温度差が10℃以上になり、その時間的変動が極力なくなるところまで熱循環を継続し、その後計測を開始した。

#### 4.2 Glover法による熱拡散係数の測定結果

Glover法により供試体中央での温度変化を計測した結果の一例を図-3に示す。縦軸は温度変化を無次元化したもので、 $\theta_1$ を温水の温度、 $\theta_0$ を供試体の初期温度、 $\theta_t$ を時刻tにおける供試体の温度とすると $\theta' = (\theta_t - \theta_0) / (\theta_1 - \theta_0)$ と与えられる。供試体の温度計測用の熱電対は極力供試体中央に来るよう、設置の際には注意を払ったが、熱電対の埋め込み位置は、必ずしも所定の位置にあるとは考えられない。熱拡散係数を求める際には、熱電対の埋め込み位置があらかじめ分かっている必要はない。このためには、試験終了後、供試体をカッターで切断し熱電対位置を測定するのがもっとも確かであるが、ここではこの操作を行わず、次に示す方法で温度変化の計測値から推定することを試みた。供試体の温度計測値 $\theta'$ が0.8になったところの時間を $t_{0.8}$ とし、任意の $\theta'$ に対する $t = t(\theta')$ を $t_{0.8}$ で割ったもの $t(\theta')/t_{0.8}$ を求める。ここで、規準時間として $t_{0.8}$ を採用したが、熱電対位置の推定のためには $\theta'$ が0.8以上のものを採用する方が理論的には望ましい。しかし、0.8以上のものをういたとき $t(\theta')/t$ は分母が小さくなるため計測誤差の影響を受けやすくなる。よってここでは $t_{0.8}$ を採用した。

図-4は熱電対位置の半径方向の中心からの偏心量をそれぞれ変化させ横軸に $\theta'$

縦軸に $t(\theta')/t_{0.8}$ をとりこの関係を解析

的に求めた結果を示す。図中の実線は解析結果を表す。ここで、熱電対の位置としては0cmから3.5cmまで変化させそれぞれ計算を行なったものである。なお、円柱高さ方向の座標は10cm(円柱供試体の高さの半分)としている。プロットした点は供試体の中心付近および半径方向に

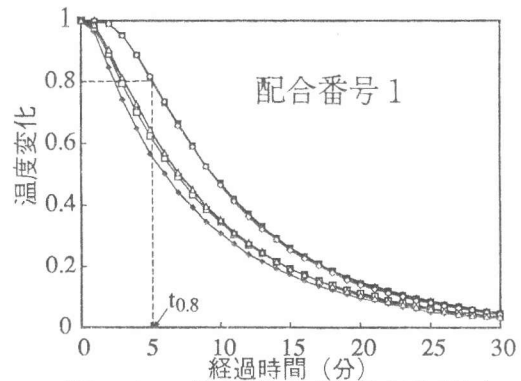


図-3 供試体の温度変化測定

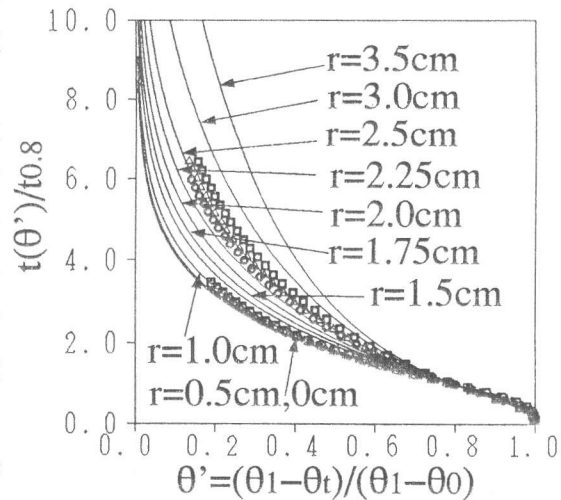


図-4 熱電対位置の変動による $t(\theta')/t_{0.8}$ の変化の解析値と計測結果の対比

表-2 熱拡散係数の測定結果 (単位は $m^2/\text{hour}$ )

	配合1	配合2	配合3	配合4	配合5
供試体1	0.00307	0.00217	0.00179	0.00309	0.00302
供試体2	0.00293	0.00218	0.00176	0.00304	0.00306
供試体3	0.00304	0.00222	0.00166	0.00302	0.00336
1~3の平均	0.00301	0.00219	0.00174	0.00305	0.00315

2.5cmずらして設置した熱電対から得られた実測結果である。この結果から分かるとおり熱電対の設置位置は推定可能であると考えられる。このように推定された熱電対位置に対する理論解を用いて熱拡散係数を求めた結果を表-2に示す。各供試体の熱拡散係数の測定結果と3本の供試体の測定結果の平均値の差は、配合番号5の供試体3を除いて小さくなっており、安定した計測が行なわれていたと考えられる。測定結果を見ると、配合番号1~3では熱拡散係数がかなり大きく変化していることが分かる。それに対し配合番号1、4、5は熱拡散係数に余り大きな差が出ていない。このことから、コンクリートの空気量は熱拡散係数に余り大きな影響を及ぼさないが、コンクリート中の骨材量は熱拡散係数に大きな影響を及ぼしていることがわかる。熱拡散係数の測定結果に及ぼす影響要因として、ここではもっとも大きな影響を及ぼすと考えられる熱電対位置の半径方向のずれについて検討を行なったが、熱拡散係数の測定結果に対する誤差要因としては熱電対による温度計測誤差等もあり、それぞれの誤差要因によって誤差が大きく影響する時間が異なっている。ここではこれらの誤差要因による影響があまりないような無次元時間領域を選定することにより熱拡散係数を決定した。[3]

#### 4.3 コンクリートの熱容量の測定結果

コンクリートの熱容量試験を実施して得られた温度計測結果の一例を図-5に示す。温度の計測はインターバルタイマーにより1分ごとに行なった。図-5の横軸は無次元時間 $t'$ であり、無次元時間 $t'$ を算出するために必要となる熱拡散係数は表-2に示した測定結果を用いている。縦軸は温度変化を無次元化した $\theta'$ をとった。プロットしたものが実測値であり、実線で示したものが解析値である。実測値は各配合につき供試体3本ずつプロットした。解析はコンクリートの密度を $2,300\text{kg/m}^3$ と仮定し、コンクリートの比熱を $0.2\text{kcal/kg/}^\circ\text{C}$ ~ $0.3\text{kcal/kg/}^\circ\text{C}$  (配合3は $0.34\text{kcal/kg/}^\circ\text{C}$ まで)  $0.1\text{kcal/kg/}^\circ\text{C}$ ごとに変化させて求めたものである。この解析解から分かるとおり、無次元時間が0.2あたりまでは熱容量が変化しても、温度変化には大差がない。いいかえると、この領域の測定結果から熱容量を決定すると、わずかな計測誤差により熱容量の算定結果に多大な誤差を生じることとなる。

よって、ここでは無次元時間が0.2以上の領域から熱容量を決定することとした。

図-5より、配合1~3では熱容量がかなり異なってい

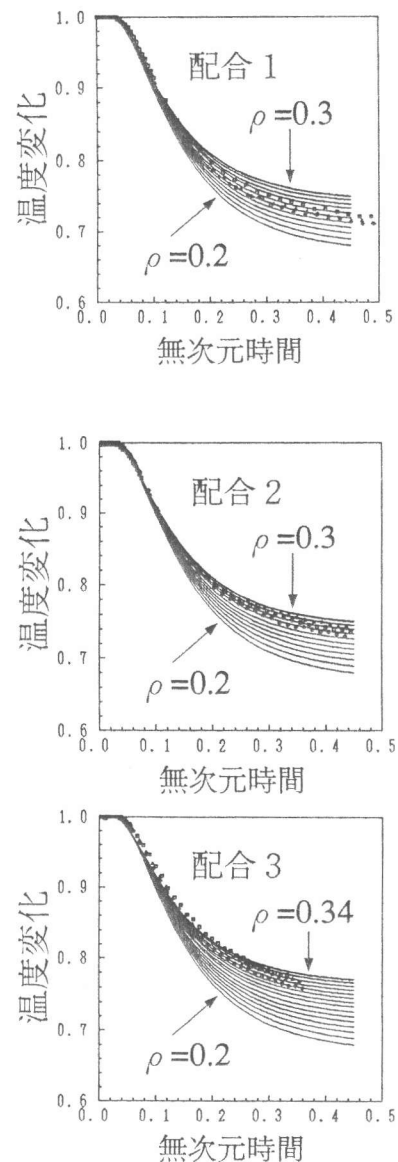


図-5 熱容量測定の一例

表-3 熱容量の測定結果 (単位は $\text{kcal/m}^3/^\circ\text{C}$ )

	配合1	配合2	配合3	配合4	配合5
供試体1	571.4	620.1	701.9	590.6	603.1
供試体2	578.7	668.3	742.6	587.9	632.0
供試体3	610.9	646.4	757.8	525.8	656.3
1~3の平均	587.0	644.9	734.1	568.1	630.5

ることが推測される。各配合条件について熱容量を求めた結果を表-3に示す。計測結果よりコンクリート中の骨材量が増加するほど熱容量の値は小さくなっている。一方、空気量の変動については、空気量が多いほど熱容量は小さくなっていた。表-2に示すように熱拡散係数はコンクリート中の空気量の変動しても余り変化しないので、(1)式より空気量が多いほど熱伝導率は小さくなる。

#### 4. 4 熱伝導特性値の計測結果の妥当性の確認

ここまで得られた試験結果が妥当であったものかどうか確認するため、表-2、表-3より算定される熱伝導率の値と、別途行なった直接円筒法による熱伝導率試験結果を比較検討した。表-4および図-6にその結果を示す。ここで検討した方法で求めた熱伝導率の値と直接円筒法により求めた熱伝導率の値は良く対応しておりその差はほぼ10%程度に留まっていた適切な計測が行なわれていたと考えられる。

#### 5. まとめ

以上の検討結果をまとめると次のとおりである。

- 1) コンクリートの熱伝導特性を簡易に求める試験法の提案を行なった。
- 2) 試験方法は熱拡散係数を求めるGlover法と、熱容量を求める非定常熱容量試験法からなる。
- 3) 非定常熱容量試験法は、Glover法と同じ供試体により計測が可能である。ただし、熱容量算出には熱拡散係数をあらかじめ求めておく必要がある。
- 4) ここで検討した方法を用い、熱伝導率を求めた結果と、直接円筒法による熱伝導率の計測結果を比較すると、両者の差は10%程度に収まっており、その有効性を確認することができた。

今後、測定精度の向上方法などについてさらに検討を進めて行く予定である。

#### [参考文献]

- [1] マスコンクリートのひびわれ制御指針、pp.102~103、1986年、日本コンクリート工学協会。
- [2] 秋田 宏、尾坂芳夫：コンクリートの熱物性および熱物性試験法に関する一考察、土木学会論文報告集、第384号、V-7、pp.119~pp.127、1987. 8.
- [3] 土木研究所資料第3245号、1994年3月。

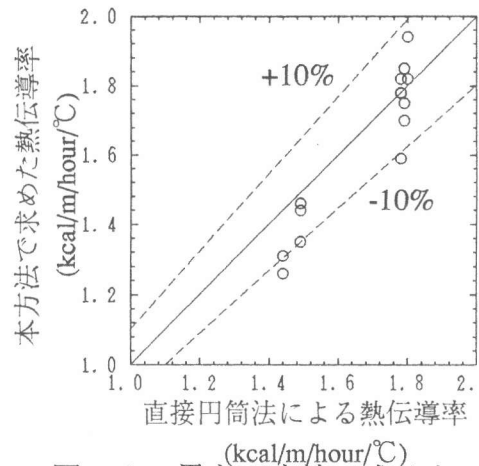


図-6 異なる方法で求めた熱伝導率の比較

表-4 熱伝導率の算定結果および直接円筒法による計測結果との対比 (単位はkcal/m/hour/°C)

	配合 1	配合 2	配合 3	配合 4	配合 5
供試体 1	1.75	1.35	1.26	1.82	1.82
供試体 2	1.70	1.46	1.31	1.78	1.94
供試体 3	1.85	1.44	1.26	1.59	2.21
1~3の平均	1.77	1.41	1.28	1.73	1.99
直接円筒法による測定結果	1.79	1.49	1.44	1.78	1.8