

# コンクリートの熱物性および熱物性試験に関する一考察

## THERMAL PROPERTIES AND THE TEST METHODS OF CONCRETE

秋田 宏\*・尾坂芳夫\*\*

By Hiroshi AKITA and Yoshio OZAKA

Conductivity, specific heat and diffusivity of concrete are considered in separate tests. Some peculiarity of the consideration are to investigate the relationship between the three quantities, to compare two methods of measuring conductivity and to compare wet and dry conditions.

Fairly good relationship of the measured three quantities both wet and dry conditions confirm the accuracy of the test data. It can be seen that comparison method gives 13% lower value of conductivity, and the test data shift by the specimen thickness and temperature setting. In spite of the faults, comparison method can be serviceable test method of concrete because of the capability of changing wetness and of its easy operation.

*Keywords: concrete, thermal properties, test methods*

### 1. まえがき

コンクリート構造物に生ずる温度応力や温度ひびわれあるいは温度分布や通過熱量を問題とする際に、コンクリートの熱的性質について知る必要がある。しかし、コンクリートの熱的性質について述べた文献はあまり多くはなく、しかもそれらの文献にみられる物性値の間には大きな幅がある。

熱伝導率を例に取ると、文献1)および2)では、試験によらない場合に用いてよい一般的な値として、2.5および $2.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $2.2$ および $2.0 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ )を挙げている。また、文献3), 4), 5)では、 $1.4\sim 1.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $1.2\sim 1.4 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ )の範囲を示しており、文献6)には $0.8\sim 1.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $0.7\sim 1.2 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ )が示されている。著者らが、これまでにPC貯水タンクに使用されたコンクリートで実測した値は、 $0.8\sim 1.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $0.7\sim 0.9 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ )の範囲にあった<sup>7)</sup>。

もちろん、コンクリートの熱伝導率は使用骨材や配合

あるいはコンクリートの含水状態や温度によっても変化するので、単に数値だけを比較したのでは不十分である。文献8)~11)では、骨材の種類に応じ $1.5\sim 3.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $1.3\sim 3.1 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ )の値が示されている。また徳田らは、骨材の種類と単位骨材量を変化させた多くの実験を行い、熱伝導率の変化について報告しているが<sup>12)~14)</sup>、一般的な配合では同様の範囲に入るとみてよい。著者らの実測は、主として安山岩砕石を粗骨材としたコンクリートで行われたので、骨材を安山岩に限定すると文献10), 11)に、 $1.98\sim 2.27 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $1.70\sim 1.95 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ )の範囲が示されているが、著者らの測定値はその半分程度である。たとえば、各種コンクリート製容器の保温性・放熱性を知りたい場合には、通過熱量が熱伝導率に直接比例するため、熱伝導率の差が大きな問題となる。

したがって、以下の3点

- (1) 著者らの熱伝導率測定結果が小さかった原因を探ること
- (2) 文献1), 2)で一般的な値としている熱伝導率をそのまま用いることが、安山岩を骨材とするコンクリートの場合にも妥当であるかどうかを調べること
- (3) コンクリートの熱物性試験法標準化に役立つ基

\* 正会員 工修 東北工業大学助教授 土木工学科  
(〒982 仙台市八木山香澄町35-1)

\*\* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科  
(〒982 仙台市荒巻字青葉)

基礎資料を得ること

を目的とし、試験方法的な側面からの検討を試みた。すなわち、コンクリートの配合は1種類のみとしたが、比熱、熱伝導率、熱拡散率の試験を独立に行って、試験値相互の満足すべき関係から試験誤差を検討した。特に、熱伝導率については、2種類の試験方法による結果を比較し、そのうち平板比較法については適用性の検討を行った。他の試験においても2種類以上の温度設定を用い、さらに湿潤・乾燥両状態を調べることにより、信頼性の確認を行った。また、比較のため一部は有限要素法あるいはコントロールボリューム法による温度解析を行い、試験結果との整合性を調べた。これらの試験には、高価な装置や器具を用いず、どこでも行える簡便な方法によったことも特徴の1つである。

2. 配合および供試体

表一には、今回の試験に用いたコンクリートの配合、およびこれまでに著者らが主として熱伝導率の試験を行ったコンクリートの配合を示す。また、表二には、熱伝導率の試験値および熱伝導率に影響があると思われるデータをまとめた。ここで、 $A/\rho$ は、単位コンクリート質量に占める骨材の質量であり、マスコンクリートを想定した西沢の実験では、 $A/\rho=0.85$ が採用されている<sup>15)</sup>。

表三には、今回の試験に用いた供試体に関するデータがまとめてある。ここで、湿潤状態とは28日間標準養生した後水中から取り出したまま、あるいは表面を拭いた状態であり、乾燥状態とは105°Cの炉で表中の日数乾燥したまま、あるいはそれに防水塗装サンユコートL-225を施した状態である。平板比較法以外は、供試体を水中に浸すため乾燥状態の試験には向かないが、ここでは防水塗装を施して試験し、後に塗装の影響を除去する方法を採った。

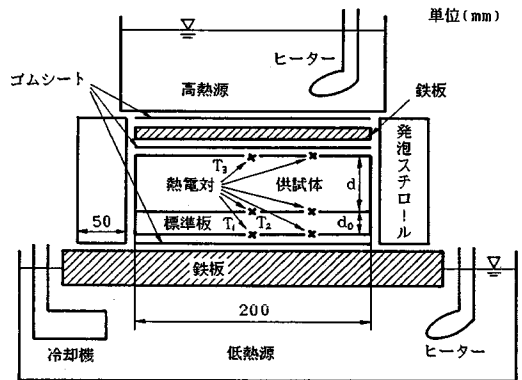
3. 試験方法

(1) 平板比較法による熱伝導率試験

供試体は20 cm×20 cmの平板で、厚さによる差を調べるため3 cm厚および5 cm厚の2種類をそれぞれ3枚使用した。試験はJIS A 1412に準拠しており、図一に示すように側面を発泡スチロールで断熱して、高熱源から低熱源へ一次元の定常熱流状態を実現するものである。熱伝導率 $\lambda_0$ が既知である標準板(シリコンゴム製、建材試験センターで検定済み)の温度差 $T_2-T_1$ と、供試体の温度差 $T_3-T_2$ およびそれぞれの厚さ $d_0$ 、 $d$ とから、供試体の熱伝導率 $\lambda$ は、

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{d}{d_0} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_2} \dots\dots\dots(1)$$

により求まる。熱電対は $\phi 0.2$  mmの銅・コンスタンタン線であり、アルミテープにより標準板および供試体の表面にはりつけた。高熱源側は、センシティブリレーSR-41に接続したパイプヒーターにより一定の温度に保つことができ、低熱源側は冷却機NEOCOOL DIP BD-31とパイプヒーターにより温度調節し、ラボポンプにより攪はんした。



図一 平板比較法の試験装置

表一 試験に用いたコンクリートの配合

	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/A (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤
					セメント		粗骨材		
					C	W	S	G	
今回の試験	20	10	42.0	41.0	417	173	681	1041	0.824 (H*リック S)
熱水タンク	20	9	43.0	42.0	365	157	734	1106	1.46 (H*リック SS)
模型水槽	20	10	42.0	41.0	417	173	681	1041	0.824 (H*リック S)
天童タンク	20	10	41.0	41.5	474	194	650	930	1.185 (H*リック SS)
鶴岡タンク	25	8	37.2	35.3	400	149	614	1150	1.60 (アラストクリト)

表二 熱伝導率および関連データ

	熱伝導率 (W・m <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup> )	厚さ (cm)	粗骨材		吸水状態	細骨材		締固め	A/ρ	試験温度 (°C)
			岩種・産地	種類		産地				
今回の試験	1.58	3, 5	安山岩	砕石	名取市高館	川砂	白石川	突棒・木づち	0.74	25
熱水タンク	1.17	3, 5	安山岩	砕石	江刺市伊手	川砂	玉川	突棒・木づち	0.78	45
模型水槽	1.00	2.5	安山岩	砕石	名取市高館	川砂	白石川	テフロン・アルファ・プレート	0.74	45
天童タンク	0.78	2.5	安山岩	砕石	東根市観音寺	川砂	羽黒	木づち	0.70	43
鶴岡タンク	0.94	3	花崗岩	安山岩	玉砕 赤川水系	陸砂	赤川水系	突棒・木づち	0.76	42

表-3 供試体に関するデータ

形状	熱伝導率				比熱 混合法	熱拡散率 Glover法
	平板比較法 JIS-A 1412		円筒直接法 Niven法			
	平板		円筒			
寸法(cm)	20×20 厚さ5	20×20 厚さ3	外径24 内径11.4 高さ30	径5.5 高さ5.5	径10 高さ20	
個数	3	3	1	3	2	
塗装	無	無	有	有	有	
乾燥日数	4日	3日	21日	3日	7日	
質量減(%)	7.2	7.5	6.5	7.1	7.7	

温度設定は2種類で、(I)は $T_3$ を気温より $7^{\circ}\text{C}$ 程度高く $T_1$ を気温より $7^{\circ}\text{C}$ 程度低く、(II)は $T_3$ を気温より $20^{\circ}\text{C}$ 程度高くし、低熱源側鉄板を直接空気にさらす簡便な方法とした。定常状態に達するまでの時間は供試体の厚さにもよるが、設定温度(I)では2~3時間、設定温度(II)では3~4.5時間であった。

(2) 円筒直接法による熱伝導率試験

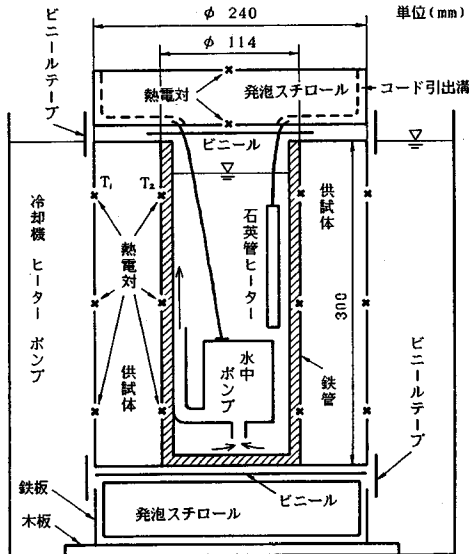
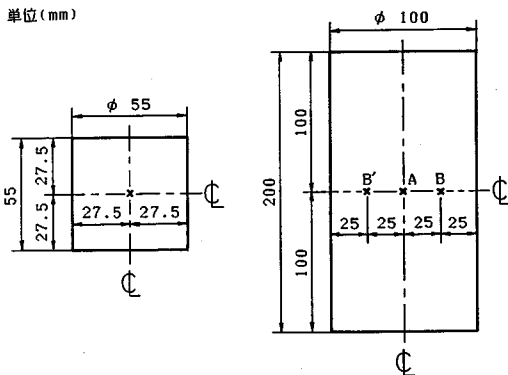


図-2 円筒直接法の試験装置



(1) 比熱試験 (2) 熱拡散率試験

図-3 供試体の寸法

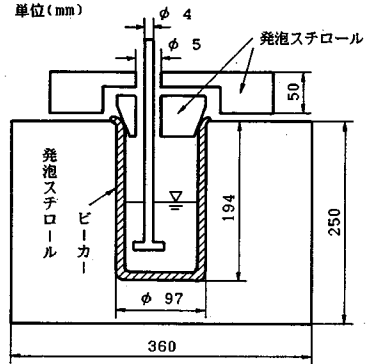


図-4 比熱試験用熱量計

試験法による差を調べるために、Niven法<sup>16),17)</sup>に準じた円筒直接法による試験も行った。供試体は高さ30 cm、内径11.4 cm、外径24 cmの円筒であり、内側に4 mm厚の鉄管を埋め込んだ。

試験は、図-2のように外側の水を冷却機およびヒーターで一定に保ちながらラボポンプにより攪はんし、内側の水を石英管ヒーターで加熱して水中ポンプMDS-10 Nにより攪はんし、定常状態を実現するものである。内外の水温が高さ方向に変化しないかどうかを調べるため、 $\phi 0.32$  mmの熱電対を3か所に取り付けたが、結果としてまったく温度差が認められなかった。上下の温度差がなく放射状の定常熱流状態となったとき、内部の発熱による熱流 $Q$ が知られば、

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln(r_1/r_2)}{2\pi l(T_2 - T_1)} \dots \dots \dots (2)$$

により熱伝導率が求められる。ここで、 $r_1$ 、 $r_2$ は供試体の外半径、内半径、 $l$ は供試体の高さ、 $T_2$ 、 $T_1$ は内面、外面の温度である。なお、熱電対の取り付けは、内側については鉄管にアルミテープではりつけたままコンクリートを打設し、外側については脱型後2 mm程度の溝を切って熱電対をはわせ、感温部が表面にくるようにセメントペーストで埋め込んだ。

内部からの熱流は、スライダックにより石英管ヒーターへの付加電圧 $E_v$ を45 V、38 V、25 V、0 V(水中ポンプの発熱および攪はんのみによる状態)に変えることにより調節した。石英管ヒーターの抵抗 $R$ は50  $\Omega$ であり、付加電圧が定まれば

$$Q = \frac{E_v^2}{R} \dots \dots \dots (3)$$

から熱流が求められる。

(3) 比熱試験

比熱は、混合法<sup>17)</sup>または断熱カロリーメーター法<sup>18)</sup>により直接測定するか、熱伝導率と熱拡散率 $h^2$ を測定し、密度 $\rho$ を用いて

$$C = \frac{\lambda}{h^2 \rho} \dots \dots \dots (4)$$

により計算することができる。ここでは、 $\lambda$ 、 $C$ 、 $h^2$ 、 $\rho$ を独立に測定して式(4)により結果の妥当性を確認するのが目的なので、装置の簡便な混合法によった。

供試体は、直径55 mm、高さ55 mmの円柱3個とし、図-3のように中心部に熱電対を埋め込んだ。試験の概要は、最初温度  $T_3$  の水中に質量  $M$  の供試体を温度が一致するまで浸し、次に熱量計(図-4に示すように発泡スチロールで断熱した容器)の温度  $T_1$ 、質量  $W$  の水中に移し、両者の温度が一致する  $T_2$  を調べるものである。比熱は、

$$C = \frac{(W + W_0)(T_2 - T_1)}{M(T_3 - T_2)} \dots \dots \dots (5)$$

から求められる。ここで、熱量計の水当量  $W_0$  は、供試体とほぼ同体積の水  $W_1$  で同一の試験を行うことにより、

$$W_0 = \frac{W_1(T_3 - T_2)}{T_2 - T_1} - W \dots \dots \dots (6)$$

で求められる。温度設定は2種類で、(I)が  $T_3$  を気温より約  $20^\circ\text{C}$  高く  $T_1$  を気温より約  $7^\circ\text{C}$  低くし、(II)が  $T_3$  を気温より約  $20^\circ\text{C}$  低く  $T_1$  を気温より約  $7^\circ\text{C}$  高くした。供試体が周囲の水温と一致するまでに、乾燥状態・湿潤状態ともに15分程度かかっているが、 $T_1$ 、 $T_2$  ともに気温と大差がないため、それらの時間的な変動が十分小さいことも確認してある。

(4) 熱拡散率の試験

Gloverの方法<sup>15)</sup>に従い、直径10 cm、高さ20 cmで、図-3のように中心および直径の4等分点に熱電対を埋

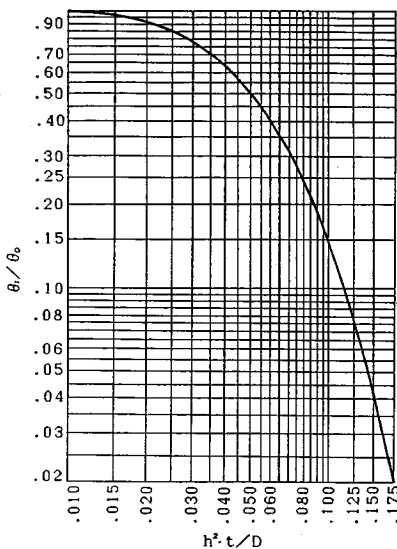


図-5 中心温度と熱拡散率の関係

め込んだ供試体2個を用いた。高温槽と低温槽の温度差を約  $20^\circ\text{C}$  とし、高温槽はヒーターのみで、低温槽は冷却機とヒーターで温度調節し、いずれもラボポンプで攪はんした。

高温槽で中心まで一様な温度  $T_3$  となった供試体を低温槽に移し、中心温度  $T_2$  と水温  $T_1$  の差および時刻の関係から、図-5のグラフにより熱拡散率を求めることができる。ここで、 $\theta_0 = T_3 - T_1$ 、 $\theta_1 = T_2 - T_1$ 、 $t$  は時間、 $D$  は供試体の直径である。この試験では、低温槽で一様な温度になった供試体を再び高温槽に移し、温度分布が逆になる状態での試験も行った。

4. 試験結果

(1) 平板比較法

表-4に結果を示すが、乾湿の違い、設定温度の違い、厚さの違い、供試体の違いに対し、それぞれに差が認められる。湿潤状態の試験値に対する乾燥状態の試験値の比率は、0.71~0.81の範囲にあり平均で0.77である。設定温度(I)での試験値に対する設定温度(II)での試験値の比率は、乾湿両状態で0.87~0.98の範囲にあり平均で0.92である。

表-4 平板比較法による熱伝導率(単位:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

厚さ	乾・湿	設定温度	供試体			平均
			1	2	3	
5cm	湿潤	I	1.41	1.38	1.31	1.37
		II	1.15	1.28	1.14	1.19
	乾燥	I	1.01	0.96	0.97	0.98
		II	0.99	0.94	0.95	0.96
3cm	湿潤	I	1.14	1.18	1.23	1.18
		II	1.09	1.16	1.01	1.09
	乾燥	I	0.89	0.93	0.91	0.91
		II	0.84	0.81	0.86	0.84

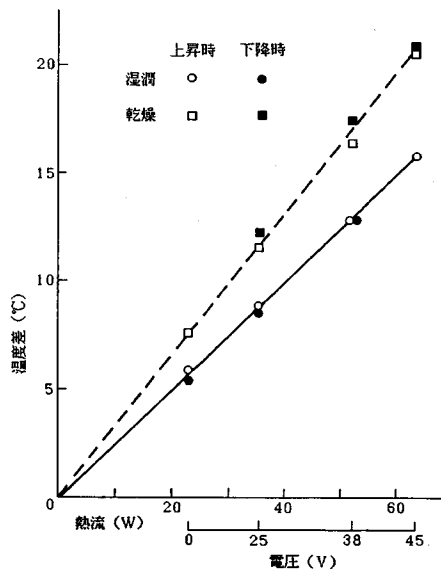


図-6 熱流と温度差の関係

厚さによる試験値の差は、5 cm 厚に対する 3 cm 厚の比として表わしたが、乾湿および設定温度の違いによる差は認められず、0.87~0.93 の範囲でその平均は 0.90 である。

(2) 円筒直接法

式(3)で計算される熱流と測定された内外温度差とは直線関係になるが、この直線を延長し温度差がゼロの線との交点を原点とすれば、水中ポンプによる発熱を加えた熱流に対するグラフとなる(図-6)。ただし、温度差と熱流とが比例関係にあるので、式(2)で熱伝導率を算出する際には水中ポンプによる熱流の影響はない。また図-6で、上昇時、下降時は付加電圧を順次上げていくまたは下げていく過程のことで、電圧を一定してから定常状態に達するまでに約4時間を要した。

この試験では、内部の発熱量のうち供試体を通ずる熱の割合を正確に知る必要がある。図-2にも示したように、ヒーターは完全に水中に没しており、ヒーターおよびポンプの電源コードは、上部の発泡スチロール板に溝を切って引き出しているため、熱の損失はきわめて少ないものと考えられる。また、別に測定した発泡スチロールの熱伝導率  $0.042 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $0.036 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ) を用い、上下の断熱部からの損失熱量を算出したが、最も比率の大きいヒーター停止時でも 0.3% に過ぎなかった。図-6 に示した直線の勾配から熱伝導率を算出すると、湿潤状態では  $1.58 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $1.36 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ )、乾燥状態では  $1.13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $0.98 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ) となった。

(3) 比 熱

表-5 に、水当量を求めた試験結果を示すが、設定温度によって値が異なること、3回の試験に対して結果が大きくばらついていることがわかる。設定温度を気温に対してほぼ対称に定めているにもかかわらず、異なる値が得られているが、その理由は定かではない。ちなみに、ピーカーの質量およびガラスの比熱により算出した水当量は 53g である。水当量の試験結果が大きくばらつくことは、式(6)が温度差の比で水量  $W_1$  を拡大し、さらに水量  $W$  を差し引く形になっているためである。ただし、水当量で 10g の誤差は式(5)では、最も条件の悪い設定温度(II)でも、比熱に対しては 2.7% の誤差となるに過ぎないので、問題はないと思われる。

供試体についての試験結果を表-6 に示す。乾燥供試体については、同じ試験で求めた塗装の比熱  $C' = 1.41 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $0.34 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ) と質量  $M'$  から、補正量  $\Delta C$  は

$$\Delta C = \frac{C'M'}{M} \dots\dots\dots(7)$$

により計算されるがその割合は 2% 程度であった。以

表-5 水当量 (単位: g)

設定温度	回			平均
	1	2	3	
I	45	52	59	52
II	14	13	25	17

表-6 比熱 (単位:  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )

乾・湿	設定温度	供試体			平均
		1	2	3	
湿潤	I	1.04	1.03	1.10	1.06
	II	0.99	1.06	1.05	1.03
乾燥	I	0.82	0.87	0.86	0.85
	II	0.89	0.79	0.91	0.86

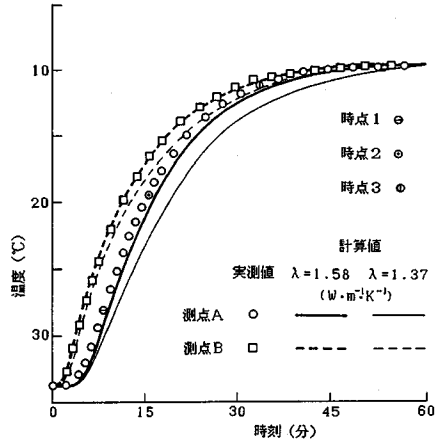


図-7 測点の温度変化 (湿潤状態)

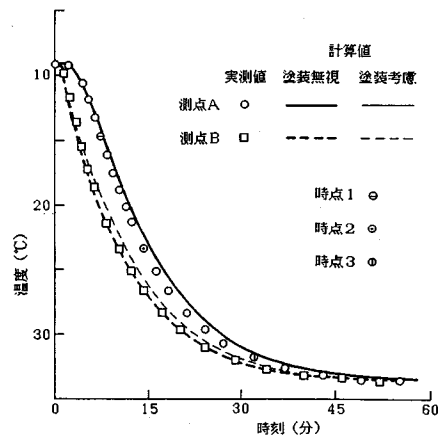


図-8 測点の温度変化 (乾燥状態)

上の結果から、供試体 3 個および設定温度 2 種に対する平均をとると、湿潤状態の比熱が  $1.05 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $0.25 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ )、乾燥状態の比熱が  $0.86 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $0.20 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ) となる。

(4) 熱拡散率

図-7, 8 には、湿潤状態で供試体(1)の高温から低温への試験、乾燥状態で供試体(2)の低温から高温への試験における、各測点温度の時間的変化を示した。

表一 熱拡散率 (単位:  $\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ )

乾・湿	供試体	設定温度	時点			平均
			1	2	3	
湿潤	1	I	2.33	2.40	2.36	2.30
		II	2.10	2.23	2.22	
	2	I	2.30	2.35	2.37	
		II	2.30	2.30	2.29	
乾燥	1	I	2.25	2.35	2.24	2.31
		II	2.31	2.31	2.34	
	2	I	2.30	2.38	2.38	
		II	2.22	2.31	2.31	

これから、供試体の中心が周囲の水温と一致するまでに、45分を費やしているのがわかる。また、図中の計算値については次章で述べる。

全試験について、それぞれ時刻と温度3点を拾い熱拡散率を算出した結果を表一に示す。湿潤状態と乾燥状態で有意な差が認められず、平均がそれぞれ  $2.30 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$  および  $2.31 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$  であること、またグラフから読み取った値を用いているにもかかわらず、ばらつきの少ない結果が得られていることがわかる。

## 5. 試験結果の検討

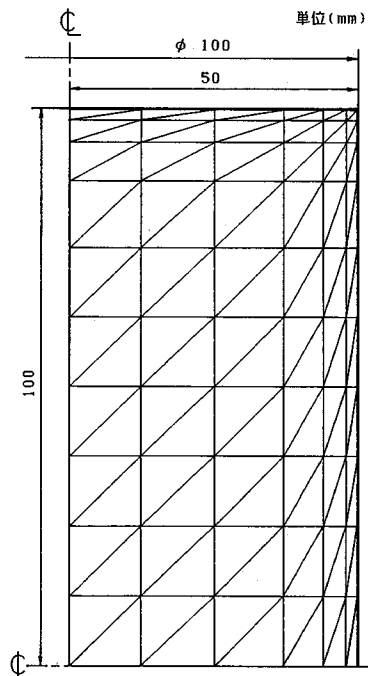
平板比較法において供試体厚の違いにより、熱伝導率に10%程度の差が出ているが、熱水タンクの場合にも同様に17%程度の差がみられた。厚さにより熱伝導率の試験値に差が出る理由の1つとして、熱電対が置かれた面での接触熱抵抗が考えられる<sup>19)</sup>。この試験で用いる熱電対は  $\phi 0.2 \text{ mm}$  であり、標準板がゴム製であること、供試体上の鉄板および高熱源水槽の総質量が12 kgに達することを考えれば、それぞれの面の密着度はかなりよいと思われる。しかしながら、コンクリートのような粗面の材質では、接触熱抵抗が無視できないと思われ、その影響は供試体が薄いほど相対的に大きいと考えられる。また、温度設定では気温との差が小さい(I)の方がよりよい精度が期待できると思われるので、以下平板比較法の試験値としては、5 cm厚・設定温度(I)の値を用いる。

熱伝導率、比熱、熱拡散率の間には式(4)の関係があるため、これら3量を独立に試験した場合には、精度の確認を行うことができる。湿潤状態について、平板比較法の5 cm厚供試体から得られた熱伝導率で計算した熱拡散率は  $1.98 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$  であり実測値  $2.30 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$  に対し13.9%の誤差、円筒直接法から得られた値で計算した結果は  $2.28 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$  で1%の誤差となる。乾燥状態については、平板比較法による試験値で算出した値は  $1.87 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$  となり誤差は18.7%、円筒直接法では  $2.16 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$  で6.1%の誤差である。したがって、円筒直接法が平板比較法よりも精度がよいことがわかる。

図一7, 8の実線および破線は、平板比較法で得られ

た熱伝導率  $1.37 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $1.18 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ) および円筒直接法による  $1.58 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $1.36 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ )、密度  $2380 \text{ kg}/\text{m}^3$  および比熱  $1.05 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ( $0.25 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ ) を用い、図一9に示した軸対称二次元有限要素モデル<sup>20)</sup>により計算したものである。たとえば、図一7の場合周辺は  $9.6^\circ\text{C}$  の一定温度境界、内部点をすべて  $33.8^\circ\text{C}$  の初期条件で解く非定常熱伝導問題とし、時間積分は完全陰解法、時間きざみを1分とした。計算値は、中心部(測点A)、1/4等分点部(測点B)ともよく測定値と一致しており、ここでも円筒直接法による熱伝導率がよりよい結果を与えている。ここで測点Bの試験値は、図一3における測点B, B'の平均値である。

図一8の計算値は、図一9の計算モデルで熱物性値だけを乾燥状態に変えたもの(塗装無視)、および外側に0.5 mm厚の塗装部分を追加したもの(塗装考慮)により求めた。結果は、塗装を考慮するかないかで大差はなく、特に中心では図に現われるほどの差が認められないため実線は1本となっており、いずれの曲線も実測データに近い値を示している。この結果から、熱拡散率の試験においても、塗装の影響は無視し得る程度であることがわかる。ちなみに、熱伝導率試験用の円筒供試体では、熱電対が塗装の内側にあるため、塗装の影響はまったくなく、結局最も小さい供試体である比熱試験における2%の影響が最大であったことになる。



図一9 計算モデル (熱拡散)

円筒直接法の熱伝導率を用いて、湿潤状態に対する乾燥状態の比率を求めると0.68となる。これは、Campbell<sup>21)</sup>および阿部ら<sup>22)</sup>の0.65と、古村<sup>23)</sup>の0.71、文献5)の0.79の中間的な値となっている。

今回円筒直接法で得られた熱伝導率  $1.58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ( $1.36 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) は、文献にみられる値に比べるとかなり小さいが、徳田らの実験式<sup>13)</sup>から容易に推定できる範囲である。徳田らの実験式

$$\lambda = a + b \left( \frac{A}{\rho} \right)^2 \dots\dots\dots (8)$$

で  $a$  および  $b$  は実験から定まる定数であるが、 $A/\rho=0$  のときセメントペーストの熱伝導率に一致するように  $a = 1.28 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ( $1.10 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )、 $A/\rho=1$  のとき安山岩の熱伝導率<sup>24)</sup>に一致するように  $a+b = 0.98 \sim 1.76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ( $0.85 \sim 1.51 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) と決めることができる。もちろん、ここでは粗骨材と細骨材の熱伝導率の差を無視したことになるが、実験によらず簡便に推定するための第一近似である。ここで、 $A/\rho=0.7$  とすると、 $1.13 \sim 1.53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ( $0.98 \sim 1.32 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) が得られる。すなわち、安山岩や玄武岩のように熱伝導率の低い骨材を使ったコンクリートの熱伝導率が低いことは当然なのである。

ただし、ここで用いた安山岩の熱伝導率は乾燥状態の値であるため、十分に吸水させた骨材を使用したコンクリートは、もっと高い熱伝導率を与える可能性がある。また、パイプレータで十分に締め固めた供試体では、50%程度高い値になるとのデータもあるが<sup>23)</sup>、今回の試験からはそれを確かめることができない。しかし、現場で実際に使われているコンクリートの熱伝導率が、骨材の吸水が十分でないためこれよりも低い値を与える可能性があることに留意する必要がある。

6. 平板比較法の適用性に関する検討

JIS A 1412 平板比較法は、かなり均質で乾燥した供試体のための試験法である。湿潤供試体では、熱の移動と同時に水分の移動も生じるので、測定誤差の原因となることが考えられる<sup>25)</sup>。しかし、円筒直接法による試験値と比較した結果、湿潤・乾燥両状態でもともに13.5%低い値が得られており、水分移動の影響は現われていない。むしろ、供試体厚や設定温度により差が出るのが重大であるが、円筒直接法に比べ

- (1) 供試体の作成・試験の操作が簡単である
- (2) 塗装する必要がないため含水率を種々に変えた試験を繰り返し行える

等の利点があるため、適当な補正方法を確立すれば、コンクリートの有力な試験方法となる可能性がある。ちなみに、今回の試験で得られた比率により、これまでの著

者らの試験値に対する補正率を計算してみると、熱水タンクで20%、他は厚さの2.5 cmと3 cmの差を無視すると28%となる。

図-1において、側面部を断熱しても若干の熱の流出があるので、 $T_3-T_1$ 間の温度差を $7^\circ\text{C}$ 程度におさえるのがよいとの指摘もある<sup>26)</sup>。一方で、温度の読み取り誤差を小さくするため、JISでは $T_3-T_2$ 、 $T_2-T_1$ ともに $3^\circ\text{C}$ 以下にならないようにと規定している。一般には、この2条件を満足することは不可能なので、ここでは後者を重視して $14^\circ\text{C}$ 程度の温度差とした。ただし、設定温度(I)は気温を基準にして $T_3$ を $+7^\circ\text{C}$ 、 $T_1$ を $-7^\circ\text{C}$ としたため、良好な試験条件になっているものと考えられる。

供試体の厚さについて、棚沢は試験誤差を1%以内におさめるためには、 $d+d_0$ を供試体幅の1/5以下にする必要があると報告しており<sup>27)</sup>、JISでも供試体厚を2.5 cm以下に規定している。ここでは供試体幅が20 cmで標準板の厚さが2 cmなので、これらの制限に従うと供試体の厚さを2 cm以下にしなければならない。しかしながら、最大骨材寸法が25 mmのコンクリートでは供試体の作成が不可能であり、3 cm厚まで許容したとしても不均質な部分で測定してしまう可能性がある。棚沢の計算およびJISの規定は、側面を断熱せずに空気にさらした場合について行ったものであり、断熱により試験誤差が減少することは明らかである。

そこで、断熱による効果を調べるため、図-10の計算モデルを用い三次元の定常熱伝導問題として、コントロールボリューム法<sup>28)</sup>により温度分布の計算を行った。図は供試体の厚さが3 cmの場合であり、右側は要素分割を、左側は温度境界条件を示している。設定温度(I)に対しては、 $T_1=13^\circ\text{C}$ 、 $T_3=27^\circ\text{C}$ 、 $T_0=20^\circ\text{C}$ を、設定温度(II)に対しては、 $T_1=25^\circ\text{C}$ 、 $T_3=39^\circ\text{C}$ 、 $T_0=20^\circ\text{C}$ の固定温度境界を用い、熱伝導率は供試体が $1.58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ( $1.36 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )、標準板が $0.237 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ( $0.204 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )、発泡スチロール

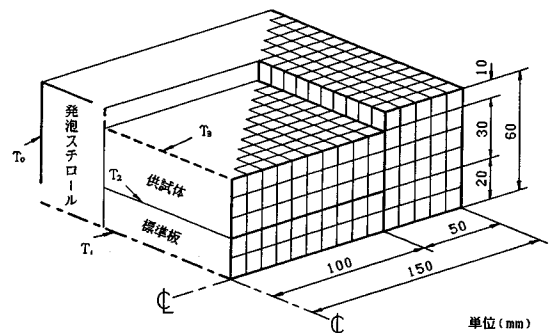


図-10 計算モデル(熱伝導)

チロールが  $0.042 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ( $0.036 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ) とした。また、棚沢の計算と比較するため、断熱材を取り去り、下面の温度  $T_1$  と側面の温度を等しくした計算も行った。図-11 および 12 は、今回の試験（側面断熱）および棚沢の計算（側面断熱せず）に対応した結果を、供試体厚 5 cm に対して等温線で表わしたものである。図-11 では、供試体内の等温線がほとんど水平であるが、図-12 では中心の近傍まで等温線が傾いていることがわかる。また、側面を断熱しない場合には供試体の温度差が大きくなり、見掛け上小さな熱伝導率が得られることもわかる。

表-8 には、供試体の厚さを変化させたときの、与えられた熱伝導率に対する、計算された温度分布から得られる見掛け上の熱伝導率の誤差を示した。側面を断熱しない場合には、厚さの増加とともに急激に誤差が増大するが、断熱した場合には供試体厚さ 10 cm でもなお誤差が 0.1 % にすぎなく、側面断熱の効果は非常に大きいことがわかる。ただし、モデル計算上では設定温度 (I), (II) とほとんど試験誤差が現れないにもかかわらず、現実には (I), (II) で 8 % 程度の差が出ている。この原因は定かではないが、発泡スチロールと供試体および鉄板間のすき間を接着しているわけではないので、わずかではあるが空気が流れることが考えられ、計算モデルについてさらに検討する余地がある。なお、側面を断熱しない場合については、棚沢の結果と直接比

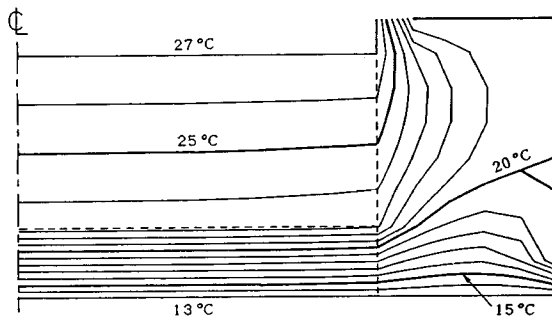


図-11 等温線（側面断熱）

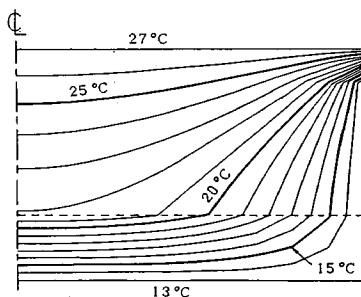


図-12 等温線（側面断熱せず）

表-8 厚さによる熱伝導率の誤差（単位：%）

供試体厚さ (cm)	2	3	5	7	10
側面断熱せず	2.2	11.8	38.2	56.6	71.3
側面断熱	設定温度 I	-	-	-	0.1
	設定温度 II	-	-	-	0.1

較するために、供試体の厚さと熱伝導率を標準板と同一にした計算も行ったが、誤差は 0.6 % で棚沢の 1 % よりも若干小さいだけであり、計算の妥当性を裏づけている。

円筒直接法による結果との比較から、平板比較法では 5 cm 厚供試体が 3 cm 厚のものより精度がよいことが知られた。またモデル計算により、側面断熱の効果が大きく、供試体厚を増すことで急激に試験誤差を増大させることもない、ことが推定される。したがって、JIS の規定にもかかわらず、側面を断熱した場合には、供試体厚を 5 cm 程度に増やすべきであると判断される。ただし、供試体厚の限度あるいは試験値に対する補正率については、さらに実験および計算によって調べる必要がある。特に、コンクリートの熱伝導率試験については、実験室による差が大きいことも報告されており<sup>29)</sup>、組織的な研究が望まれる。

## 7. あとがき

安山岩を骨材とするコンクリートの一配合について、一連の熱物性試験を行った結果、次のようなことが知られた。

(1) 熱伝導率、比熱、熱拡散率を独立に試験し、3 者の満足すべき関係を調べたところ、誤差は 1 % から 6.1 % の範囲にあり、一応の精度が得られていることが確認された。

(2) 熱伝導率試験では円筒直接法が精度がよく、湿润状態で  $1.58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ( $1.36 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ )、乾燥状態で  $1.13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ( $0.98 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ) が得られ、平板比較法では約 13 % 低い値が得られた。

(3) 平板比較法で側面を断熱する効果は大きく、5 cm 厚の供試体の方が試験精度はよくなり、3 cm 厚は 5 cm 厚に対して約 10 % 低い値が得られた。

(4) 平板比較法による熱伝導率試験で、低熱源の温度制御を行わない場合は、約 8 % 低い値が得られた。

(5) 前記 (2), (3), (4) の影響で、これまでに著者らが行った熱伝導率の試験結果は、およそ 28 % 低い値を得ていたと考えられる。

(6) 安山岩を骨材とするコンクリートでは、熱伝導率が文献 1), 2) に示された一般的な値の 2/3 程度になることがあり、一般的な値をそのまま用いるには注意を要することが示された。

(7) 乾燥状態の熱伝導率は、湿润状態に対して約



32% 低い値が得られた。

(8) 比熱は湿潤状態で  $1.05 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ( $0.25 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ), 乾燥状態で  $0.85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ( $0.20 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) であった。

(9) 熱拡散率は, 湿潤・乾燥両状態で有意な差が認められずそれぞれ  $2.30 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ ,  $2.31 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$  となった。

(10) 乾燥供試体に塗装を施すことにより, 熱伝導率, 比熱, 熱拡散率の試験を行うことができ, 塗装の影響は高々2%であった。

今回の試験では, 1か月程度吸水させた骨材あるいはパイプレーターで十分に締め固めた供試体による試験値との比較を行わなかった。そのような条件では, 熱伝導率が今回の試験より大きくなる可能性もある。ただし, 実際に現場で施工されるコンクリートでは, 骨材の吸水状態により, さらに低い熱伝導率になり得ることに留意する必要がある。

謝 辞: 本論文に一部使用した熱水タンクのデータは, ビーエスコンクリート株式会社の, また天童タンクおよび鶴岡タンクのデータは, 天童市水道課, 鶴岡市水道部および株式会社安部工業所のご協力により得られた。ここに付記し謝意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 土木学会: 昭和61年度制定・コンクリート標準示方書・設計編, 1986.
- 2) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひびわれ制御指針, 1986.
- 3) 日本コンクリート工学協会: コンクリート便覧, 技報堂, 1976.
- 4) 空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧Ⅰ第10版, 1981.
- 5) 日本建築学会: 建築学便覧Ⅰ, 計画, 第2版, 丸善, 1980.
- 6) 日本機械学会: 伝熱工学資料, 第3版, 1975.
- 7) 秋田 宏・尾坂芳夫: 日射を受けるコンクリート壁の温度分布に関する考察, 土木学会論文集, No. 378, pp. 147~155, 1987.
- 8) 岡田 清・六車 照: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 1981.
- 9) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書, 1985.

- 10) 国分正胤: 最新土木材料実験 第3版, 技報堂, 1980.
- 11) ACI Committee 207: Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures, ACI J., Vol. 67, No. 4, pp. 273~309, 1970.
- 12) 徳田 弘・庄谷征美: コンクリートの熱特性値の測定と二, 三の考察, 土木学会論文報告集, No. 212, pp. 89~98, 1973.
- 13) 徳田 弘: コンクリートの熱的性質, コンクリート工学, Vol. 22, No. 3, pp. 29~37, 1984.
- 14) 徳田 弘・伊藤 勉: コンクリートの熱拡散率, 熱伝導率, および比熱について, 電力中央研究所技術研究所報告 (土木・63014), 1964.
- 15) 西沢紀昭: コンクリートおよびモルタルの熱拡散率測定方法に関する実験報告, 電研所報, Vol. 4, No. 2, pp. 66~76, 1954.
- 16) 蓮沼 宏, ほか: 改訂工業計測便覧, コロナ社, 1964.
- 17) 原留美吉・武田義章: 物理実験法, 工業調査会, 1980.
- 18) Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior: Boulder Canyon Project Final Reports, Thermal Properties of Concrete, 1940.
- 19) 武山斌郎・大谷茂盛・相原利雄: 伝熱工学, 丸善, 1983.
- 20) 矢川元基・宮崎則幸: 有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析, サイエンス社, 1985.
- 21) Campbell, A.D. and Thorne, C.P.: The Thermal Conductivity of Concrete, Mag. Concrete Research, Vol. 15, No. 43, pp. 39~48, 1963.
- 22) 阿部博俊・青柳征夫: 高温下におけるコンクリート構造物の熱応力に関する問題点, コンクリートジャーナル, Vol. 8, No. 1, pp. 62~67, 1970.
- 23) 古村副次郎: コンクリートと熱(1), コンクリート工学, Vol. 17, No. 8, pp. 87~95, 1979.
- 24) 高崎 馨: 本邦産岩石の熱伝導率の測定, 応用物理, Vol. 27, No. 6, pp. 366~370, 1958.
- 25) Schneider, U. (森永 繁監訳): コンクリートの熱的性質, 技報堂, 1983.
- 26) 日本熱物性研究会: 熱物性資料集 断熱材編, 養賢堂, 1983.
- 27) 棚沢 泰: 伝熱率測定器の寸法による誤差について, 機械学会誌, Vol. 35, pp. 325~332, 1932.
- 28) Patankar, S.V. (水谷・香月訳): 熱移動と流れの数値解析, 森北出版, 1983.
- 29) Spooner, D.C.: Results of a 'round robin' thermal conductivity test organized on behalf of the British Standards Institution, Mag. Concrete Research, Vol. 32, No. 111, pp. 117~122, 1980.

(1987.1.16・受付)