

コンクリートの熱特性値の測定と二、三の考察

EXPERIMENTAL STUDIES ON THERMAL PROPERTIES OF CONCRETE

徳田 弘*・庄谷 征美**

By Hiroshi Tokuda and Masami Shōya

1. 緒 言

コンクリートの熱的諸性質は、コンクリート体内部の温度分布、温度応力、ひびわれ発生などを理論的に解明するための基礎的資料である。したがって、温度変化が生ずるコンクリート構造物の設計、施工を合理的に行なうために、これらに関するより正確な特性値を知ることがはきわめて重要である。

米国内務省開拓局は、Boulder ダムの建設にあたり、ダムコンクリートの熱拡散率、熱伝導率、および比熱の測定方法および測定値に関する報告書¹⁾を出版した。Thomson²⁾は、コンクリートあるいは岩石の円柱形供試体について、空中冷却法による熱拡散率の測定方法を提案した。西沢³⁾は、コンクリートの熱拡散率を水中冷却法および空中冷却法の2方法によって測定し、結果の信頼性を検討した。原田⁴⁾および Lentz⁵⁾はそれぞれ高温時および低温時におけるコンクリートの熱伝導率の変化を研究した。Campbell⁶⁾、Missenard⁷⁾、斎藤⁸⁾は、コンクリートを構成する各物質の配置を単純にモデル化した場合の熱伝導に関する理論的研究を行なった。そのほか、コンクリートの熱的性質に及ぼす配合条件、混和材、骨材の石質などの影響に関する多くの報告^{9)~22)}がある。

以上のように、既往の研究内容は、熱的性質の測定方法および結果の信頼性、コンクリートの組織を単純にモデル化した場合の熱伝導理論、特定な構造物を対象とした熱的性質、材料の種類、配合、養生方法などの諸条件を限定した場合の熱的性質、などであって、いまだ明らかにされていない面が多く、また、広範囲にわたり系統的に研究されているとはいえないのが現状である。

本研究は、コンクリートの熱的性質に関する研究の一

環として行なったもので、その範囲は次のとおりである。ポルトランドセメント、フライアッシュ、各種骨材を種々に組合わせて使用したコンクリート、モルタル、およびセメントペーストの配合 387 種を定め、これらのすべてについて熱拡散率を測定し、一部について熱伝導率を測定した。測定時における供試体の含水状態は飽水状態であった。さらに、両特性値およびコンクリートの単位容積重量から比熱を推定した。これらの結果に基づき、骨材量と熱的諸性質との関係、熱拡散率と熱伝導率との関係、比熱とコンクリートの単位容積重量との関係が明らかとなった。コンクリートの熱拡散率および熱伝導率の測定方法を比較すれば、供試体の製造、実験装置の規模、測定に要する時間、などの諸点において、前者は後者よりかなり有利である。したがって、熱拡散率のみを測定すれば、上記関係から他の特性値を推定することが可能である。また、コンクリートは熱拡散率の異なるセメントペーストと骨材とからなる不均質材料であるから、その熱拡散現象を解明するには、均等質材料の場合とは違った手法が必要であろう。したがって、本研究では、熱拡散率について、これを種々の角度から究明した。すなわち、配合諸条件が熱拡散率におよぼす影響、混和材料を使用した場合の熱拡散率、コンクリートを複合材料としての観点からみた場合の熱拡散率、細粗骨材自身の熱拡散率の間接測定、骨材の石質による岩石学的分類と熱拡散率との関係、などである。

2. 実験方法

(1) 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント 6 種、中庸熱ポルトランドセメント 11 種、混和材はフライアッシュ 5 種、混和剤は F, P, V の 3 種であった。細骨材は普通 17 種、軽量 5 種、合計 22 種であり、粗骨材は普通 24

* 正会員 工修 秋田大学助教授 鉾山学部土木工学科

** 正会員 工修 秋田大学助手 鉾山学部土木工学科

表-1 細骨材の品質

No.	記号	産地	比重	吸水量 (%)	石質
1	S 1	神奈川	2.63	2.45	砂岩, 硬砂岩, チャート, 珪質粘板岩, 安山岩
2	KO 1	宮崎	2.64	1.10	硬砂岩
3	KE	高知	2.59	1.20	珪岩
4	HI	岡山	2.56	2.62	珪岩
5	AN	北海道	2.57	1.98	安山岩
6	SE	広島	2.67	0.81	石灰岩
7	KU	北海道	2.85	1.39	角閃岩
8	AK	長野	2.64	0.94	花崗岩
9	S 2	長野	2.63	1.26	砂岩, 頁岩, チャート, 花崗岩, 安山岩
10	HA	山口	2.59	0.96	石英斑岩
11	GE	北海道	2.68	2.02	玄武岩
12	KI	福島	2.73	2.07	輝緑岩
13	SA 1	北海道	2.60	2.13	砂岩
14	SA 2	和歌山	2.56	2.60	砂岩
15	KO 2	宮崎	2.60	1.68	硬砂岩
16	ZA	北海道	2.44	4.15	火山灰
17	L 1	東京	1.92	12.5	人工軽骨
18	L 2	東京	1.88	12.7	人工軽骨
19	PA	北海道	0.56		パーライト
20	S 3	北海道	2.62	1.38	砂岩, 安山岩, 頁岩, チャート
21	S 4	秋田	2.58	2.65	安山岩, 頁岩, 粘板岩, チャート
22	L 3	東京	2.02	12.6	人工軽骨

種, 軽量 6 種, 重量 2 種, モデル 2 種, 合計 34 種であった。これらの骨材の産地, 比重, 吸水量の石質, および記号を表-1, 2 に示す。細骨材のうち, S1~S4 は天然砂, L1~L3, ZA, PA は軽量砂, そのほかは砕砂である。粗骨材のうち, G1~G4 は天然砂利, L1~L4, ZA, PA は軽量粗骨材, JU, JI は重量砕石, M1, M2 はモデル粗骨材, そのほかは砕石である。モデル粗骨材は, 普通ポルトランドセメントと豊浦標準砂を用いて製造したモルタル板をコンクリートカッターで各種寸法のほぼ立方形に切断して製造したものであって, あらかじめその熱拡散率を測定しておいた。M1 および M2 の配合は, それぞれ $W/C=0.58$, $S/C=2/1$ および $W/C=0.30$, $S/C=1/4$ であり, 熱拡散率はそれぞれ 278×10^{-5} および $168 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{hr}$ であった。

使用した細骨材の粒度は標準粒度をほぼ満足するものであった。

コンクリートの配合を次のようにして決定した。すなわち, 基本となる配合を定め, 次にこの配合における単位骨材量の一部を減じ, 残る材料と空気量との和が単位体積となるように各成分をそれぞれの絶対容積に比例して増加させた配合を定める。このようにして, 段階的に骨材量を減じ, モルタルあるいはセメントペーストにいたるいくつかの配合を定める。次に, 基本配合における骨材量を増し, それにともなって残る各成分を減少させた配合も定める。以上のようにして, 一連の配合が定められる。各配合シリーズにおいて, 単位骨材量が小さくなるにつれて, コンクリートあるいはモルタルの流動性

表-2 粗骨材の品質

No.	記号	産地	比重	吸水量 (%)	石質
1	G 1	神奈川	2.71	0.80	硬砂岩, 安山岩, チャート, 珪質粘板岩, 砂岩
2	KO 1	宮崎	2.67	0.60	硬砂岩
3	KE	高知	2.64	0.51	珪岩
4	HI	岡山	2.64	1.26	珪岩
5	AN 1	北海道	2.53	1.76	安山岩
6	SE 1	広島	2.71	0.14	石灰岩
7	KU	北海道	2.92	0.74	角閃岩
8	KA 1	長野	2.65	0.60	花崗岩
9	G 2	長野	2.66	0.63	砂岩, 頁岩, チャート, 花崗岩, 安山岩
10	HA	山口	2.61	0.89	石英斑岩
11	GE	北海道	2.73	1.57	玄武岩
12	KI	福島	2.80	1.02	輝緑岩
13	SA 1	北海道	2.69	1.04	砂岩
14	SA 2	和歌山	2.60	1.51	砂岩
15	KO 2	宮崎	2.71	0.95	硬砂岩
16	ZA	北海道	1.29	18.3	火山灰
17	L 1	東京	1.40	9.44	人工軽骨
18	L 2	東京	1.34	9.50	人工軽骨
19	PA	北海道	0.22	—	パーライト
20	G 3	神奈川	2.64	0.79	硬砂岩, 珪質粘板岩, チャート, 安山岩
21	KA 2	長野	2.61	0.67	花崗岩
22	NE	静岡	2.68	0.98	砂質粘板岩
23	HE	福井	2.80	0.47	片麻岩
24	SA 3	福井	2.57	2.06	砂岩
25	L 3	東京	1.80	14.0	人工軽骨
26	JU	北海道	3.70	1.01	重晶石
27	JI	岡山	4.85	0.30	磁鉄鉱
28	G 4	北海道	2.52	2.74	安山岩, 砂岩, 硬砂岩, チャート
29	AN 2	北海道	2.59	1.17	安山岩
30	SE 2	北海道	2.68	0.64	石灰岩
31	AN 3	秋田	2.54	4.41	安山岩
32	L 4	東京	1.60	9.61	人工軽骨
33	M 1	秋田	2.16	14.3	セメントモルタル
34	M 2	秋田	2.21	14.6	セメントモルタル

は大きくなる傾向が認められた。なお, 同一配合シリーズでは, 同種の細骨材および同種の粗骨材を使用した。

(2) 熱拡散率および熱伝導率の測定方法

コンクリートの練りまぜには可傾式ミキサを使用した。供試体の養生方法は 21°C 水中養生とし, 材令 7 日で熱的性質を測定した。

熱拡散率測定用供試体は, 骨材最大寸法 30 mm 以上のコンクリートの場合 $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$, 30 mm 以下の場合 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ であった。コンクリートを型わくへ詰める際, 型わく高さの $1/2$ の水平断面中心部へ径 0.32 mm, 長さ 3 m の銅コンスタンタン熱電対の先端感温部を埋め込んだ。同一条件について, 供試体個数は, セメントペーストおよびモルタルの場合 2 個, コンクリートの場合 4~6 個とした。測定方法は Glover の方法¹⁾ であって, 高さと同径の比が 2 の円柱形供試体を温湯中で一様な温度分布となるまで熱した後, ただちに冷水中に入れ, 時間の経過にともなう供試体中心の温度変化を求

め、この時間温度曲線から熱拡散率が得られる。なお、温湯および冷却水の温度を、それぞれ 45~55°C および 15~20°C とした。

熱伝導率測定用供試体は内径 $a=6$ cm, 外径 $b=20$ cm, 高さ $L=40$ cm の円筒形である。同一条件について供試体個数は 2 個とした。測定方法は直接法¹⁾ であって、供試体中空部分の水をヒーターで加熱することによって、放射状の熱流を生ぜしめ、同時に側面を冷却水によって一定温度に保った。内面温度 θ_a および側面温度 θ_b が一定値となったとき、ヒーターにおける電圧 V および電流 A を測定し、熱の流動速度 $q(=A \cdot V \times 0.860)$ を求め、次式から熱伝導率 K を計算した。

$$K = \frac{q \cdot \log_e(b/a)}{2\pi L(\theta_a - \theta_b)} \dots\dots\dots (1)$$

なお、供試体中空部分および冷却水の温度を、それぞれ 35~45°C および 15~20°C とした。

熱拡散率および熱伝導率の測定精度を示すため、平均測定値からのばらつきを求めたが、2~6% 程度であった。

3. 実験結果および考察

(1) 単位骨材量と熱的諸性質との関係

細粗骨材の石質が同じ場合、単位骨材量の絶対容積とコンクリートの熱拡散率との関係を 図-1 に示す。図中の各点は測定値の平均であり、①~⑳ は配合シリーズ

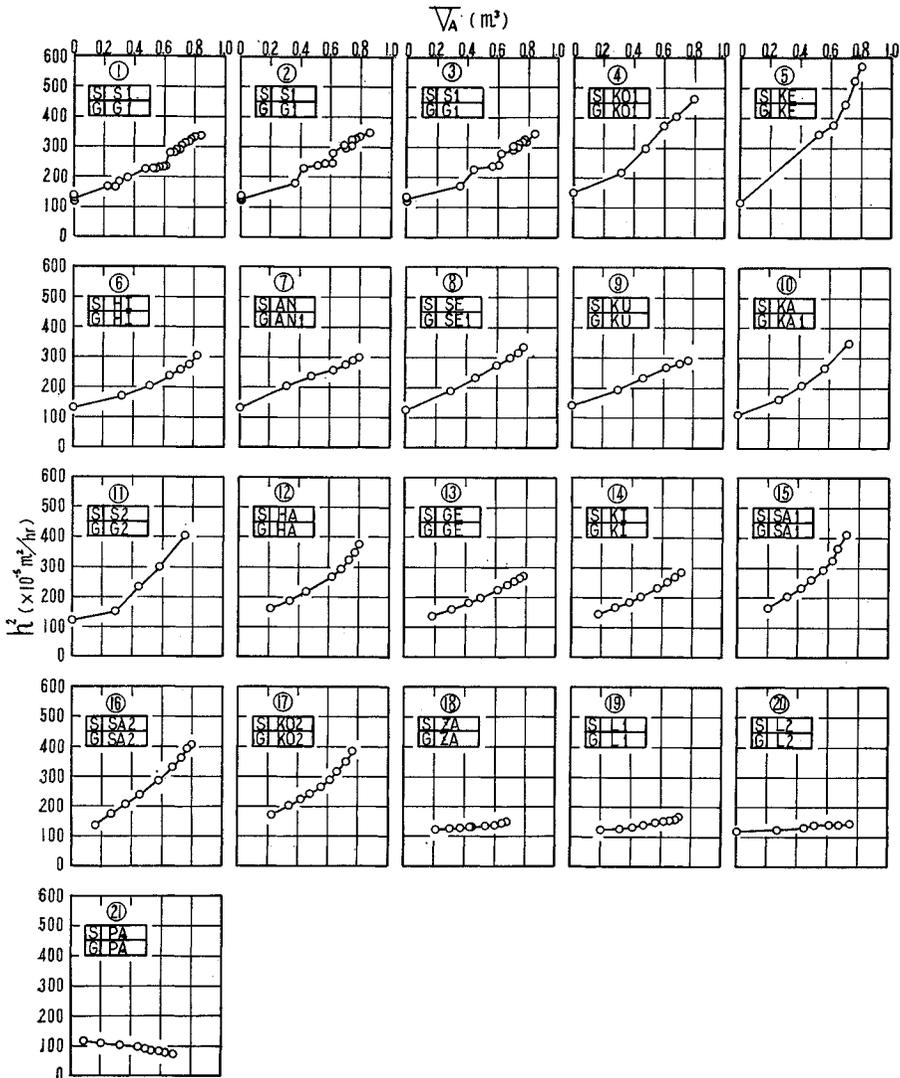


図-1 コンクリートの単位骨材量 V_A と熱拡散率 h^2 の関係

を示す。熱拡散率は骨材量の増加とともにほぼ一定の割合で増加あるいは減少する傾向があり、この傾向は使用骨材の石質によって異なる場合がある。骨材の熱拡散率がセメントペーストのそれに比較して大きいときは増加傾向、小さいときは減少傾向を示すのであって、両者の差が大きいほど骨材量の増加に伴う熱拡散率の増加あるいは減少の割合が大きくなると考えられる。図-2 は骨材量と熱伝導率との関係であって、熱拡散率に関する上記結果と同様な傾向が認められる。同図に、熱拡散率 $h^2(\text{m}^2/\text{hr})$ 、熱伝導率 $K(\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C})$ および単位容積重量 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ から次式によって比熱 $C(\text{kcal}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ を求めた結果を併記した。

$$C = \frac{K}{h^2 \cdot \rho} \dots\dots\dots(2)$$

図から、比熱は、骨材量の増加に伴って増加あるいは減少の傾向を示す熱伝導率と全く逆の傾向を示すことが明らかである。コンクリートの熱的諸性質は、測定時における温度条件によって変わるといわれている^{1),9)}。本研究では、同一温度条件で熱拡散率と熱伝導率を測定しているとはいえないので、厳密には上式を適用できないのであって、得られた特性値は便宜的なものである。

細粗骨材の石質が異なるとき、骨材量の増加に伴って、モルタルからコンクリートに移ると熱拡散率の増加あるいは減少の傾向が急変する場合がある。これは細粗骨材の熱拡散率が等しくないからであろうと考える。したがって、モルタル部分をセメントペーストと細骨材の

混合物、コンクリート部分をモルタルと粗骨材の混合物として扱うのが合理的である。図-3 は、細骨材および粗骨材の絶対容積と熱拡散率との関係であり、図-4 は、同様にして、熱伝導率および比熱を示したものである。コンクリート部分における熱拡散率の変化の様子は、使用粗骨材およびモルタル両成分の熱拡散率によって決まるのであって、これについては(5)において詳述する。

骨材量と熱拡散率との関係を分類して示せば、図-5 のような4つのパターンになる。④は細粗骨材の石質が同じ場合であり、⑤, ⑥, ⑦は両骨材の石質が異なる場合であって、これらについて、さらにそれぞれ3つのパターンが考えられる。

(2) 熱拡散率と熱伝導率との関係および比熱と単位容積重量との関係

図-1, 3 の熱拡散率 $h^2(\text{m}^2/\text{hr})$ と図-2, 4 の熱伝導率 $K(\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C})$ を同一配合シリーズについて比較すると、その模様はきわめて近似している。図-6 は両者の関係を示すもので、265点がプロットされている。これに原点を通る直線式をあてはめると式(3)のようになり、同式を用いて熱伝導率を推定するときの標準誤差は $0.156 \text{ kcal}/\text{m}\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$ である。

$$\left. \begin{aligned} h^2 &= 0.00138 K \\ \text{or} \\ K &= 725 \cdot h^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

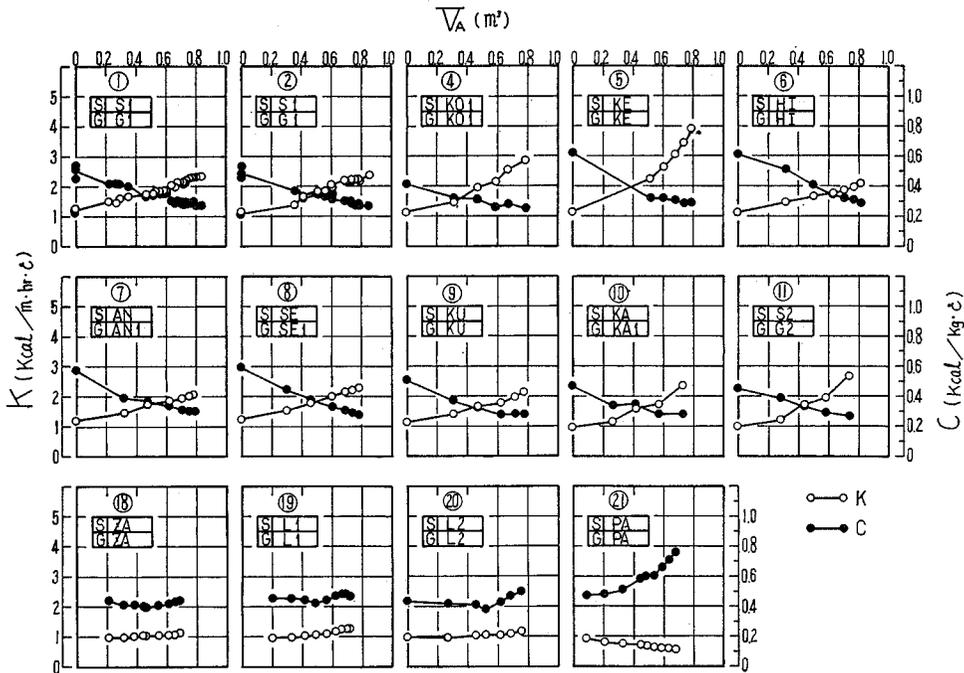


図-2 コンクリートの単位骨材量 V_A と熱伝導率 K および比熱 C との関係

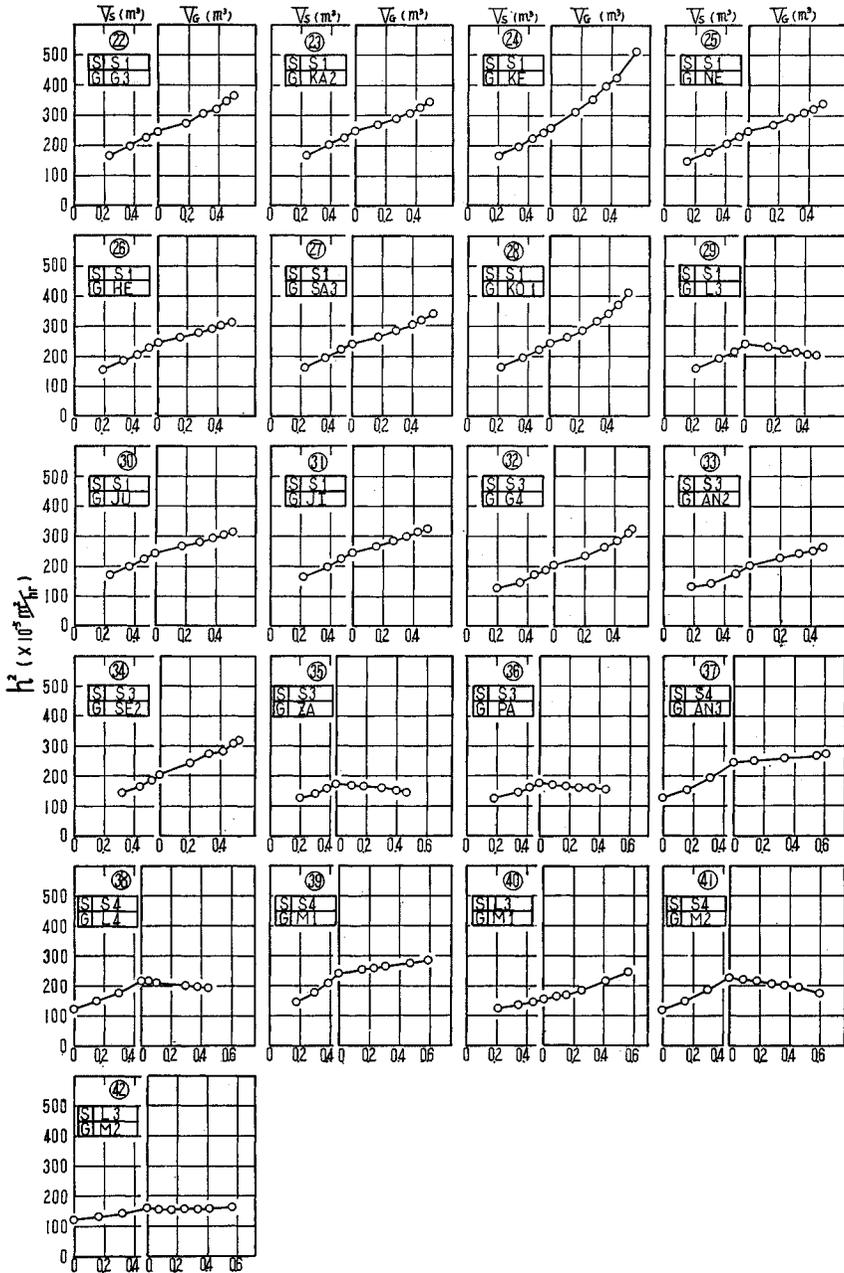


図-3 コンクリートの単位細骨材量 V_s および単位粗骨材量 V_g と熱拡散率 h^2 の関係

図-2, 4 に示されている比熱 $C(\text{kcal/kg}\cdot^\circ\text{C})$ とコンクリートの単位容積重量 $\rho(\text{kg/m}^3)$ との関係を図-7に示す。図中には265点がプロットされている。式(2), (3)から式(4)が得られるが、同式を用いて比熱を推定する場合の標準誤差は $0.040 \text{ kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$ である。

$$C = \frac{725}{\rho} \dots\dots\dots (4)$$

式(3), (4)において、両辺のディメンションが一致し

ないが、定数のそれは式(2)から $(\text{kcal/m}^3\cdot^\circ\text{C})$ であることがわかる。

(3) コンクリートの配合が熱拡散率に及ぼす影響

配合シリーズ1は、混和材料を使用しないプレーンコンクリートの配合であって、水セメント比、骨材最大寸法、単位骨材量などの配合諸条件が熱拡散率に及ぼす影響を明らかにする目的で定めた配合である。水セメント

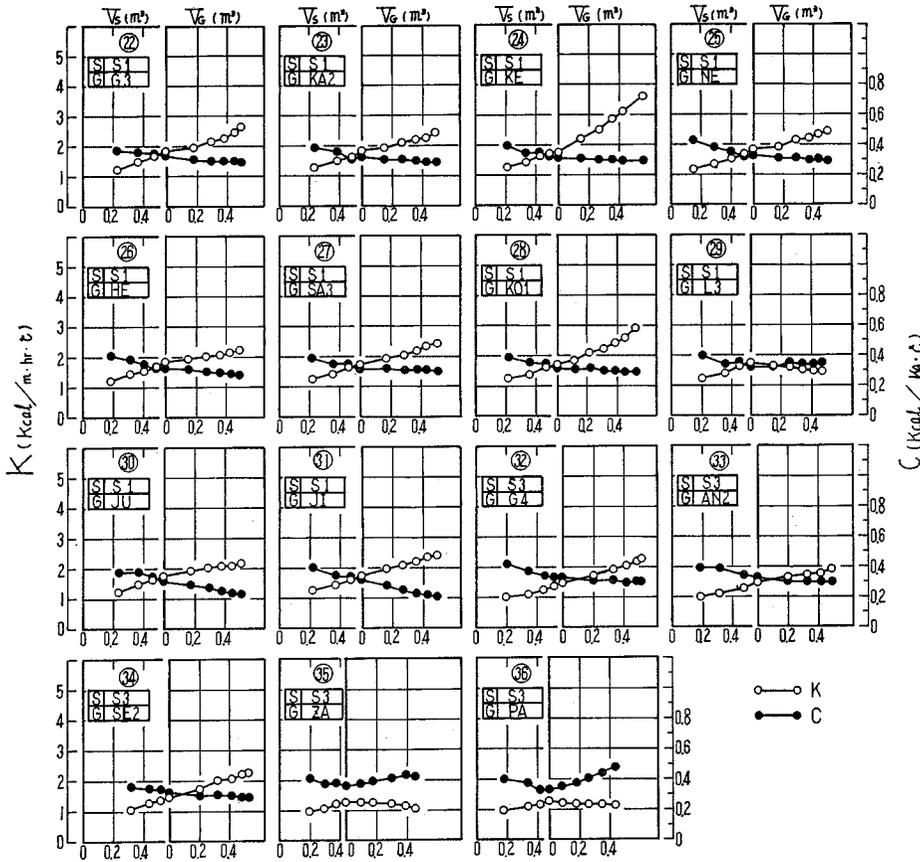


図-4 コンクリートの単位細骨材量 V_s および単位粗骨材量 V_g と熱伝導率 K および比熱 C の関係

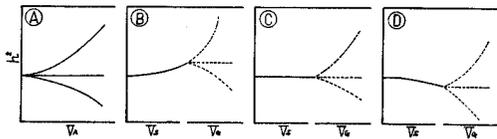


図-5 骨材量と熱伝導率の関係の分類

比と熱伝導率との関係を図-8に示す。同図から、水セメント比が大きくなればセメントペーストの熱伝導率は小さくなるし、モルタルおよびコンクリートのそれは大きくなる傾向が認められる。この原因は、水セメント比が大きくなれば、セメントペーストの場合、その容積の中に占める自由水の割合が大きくなるからであり、モルタルおよびコンクリートの場合、骨材の占める体積が大きくなるからであろうと考えられる。セメントペースト硬化体の熱伝導率は、水のそれより大きく、河川産骨材のそれより小さいことが明らかである⁹⁾。たとえば、骨材最大寸法 40 mm のコンクリートの場合、水セメント比が 35% から 75% に変わると、骨材容積は約 10%、熱伝導率は約 7% それぞれ増加する。両増分が一致しない理由の一つとして、上述の水セメント比とセメント

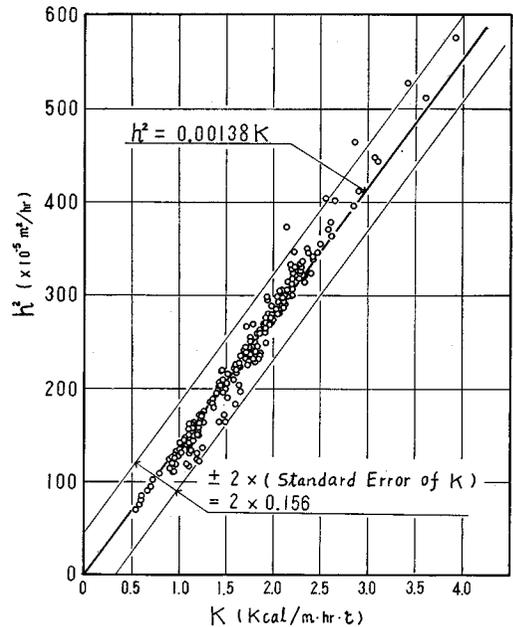


図-6 熱伝導率 K と熱伝導率 h^2 の関係

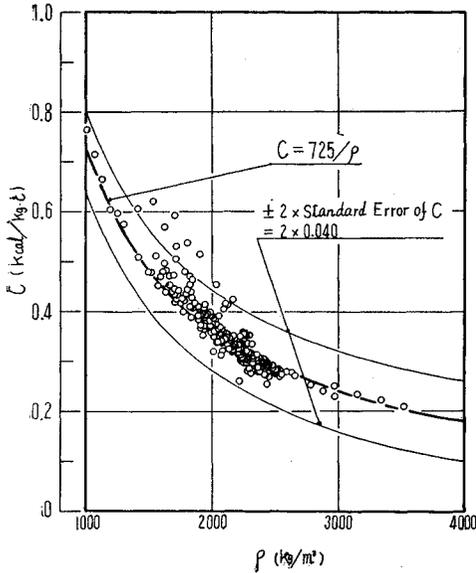


図-7 コンクリートの単位容積重量 ρ と比熱 C の関係

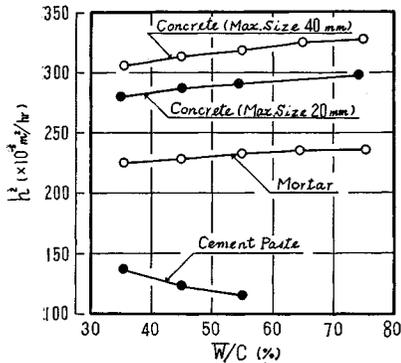


図-8 コンクリートの水セメント比 W/C と熱拡散率 h^2 の関係

ペーストの熱拡散率との関係が考えられる。また、細粗骨材の石質が同じで、その熱拡散率がセメントペーストのそれより大きいとき、骨材最大寸法が大きくなるほど単位骨材量は増加するから、コンクリートの熱拡散率は増加するのであって、このことは図-8 および図-1, 3 からも明らかに認められる。

(4) 混和材料が熱拡散率に及ぼす影響

配合シリーズ 2, 3 は、混和材としてフライアッシュを割合でそれぞれ 50%, 30% 混和したコンクリートの配合である。図-1 ①, ②, ③ を比較すると、セメントペーストの熱拡散率は 3 者ほとんど等しく、骨材量と熱拡散率との関係にも顕著な差異は認められない。したがって、フライアッシュコンクリートとプレーンコンクリートの熱拡散率はほとんど同等であると判断される。この原因は次のとおりであろうと思われる。すなわち、

プレーンコンクリートと同一コンシステンシーのフライアッシュコンクリートをつくるには、単位水量をかなり減じなければならない。単位セメント量 ($C+F$) を一定としたとき、セメント量を同重量のフライアッシュでおきかえると、フライアッシュの比重はセメントのそれより小さいので、($C+F$) の容積はおきかえ前より大きくなる。したがって、単位骨材量は、コンクリートの熱拡散率を大きく変えるほど著しい増減はないのである。

次に、混和剤を使用した場合について考える。たとえば、減水剤 P の使用によって、セメント量約 10%, 水量約 15% それぞれ減ずることができ、連行空気量は約 3% となる。配合シリーズ 1 のコンクリートについて、セメント、水、および空気量をそれぞれ上記だけ増減させると、その結果はおよそ 0 となるから、骨材量は変化しない。また、空気量の多少は、通常の範囲では、熱拡散率に大きな影響を及ぼさないこと³⁾ が明らかである。したがって、混和剤を使用しても、コンクリートの熱拡散率が大きく変わることはないであろうと思われる。

(5) 複合材料としてのコンクリートの熱拡散率

既述のとおり、骨材自身の熱拡散率がこれを用いたコンクリートの熱拡散率にかなり大きな影響を及ぼす。しかしながら、骨材の熱拡散率は一般に不明であって、これを直接測定することは可能である²⁾ が、供試体の製造などに困難な点が多く、非常にむずかしい。そこで著者らは、セメントモルタルによって熱拡散率が既知のモデル粗骨材 M1, M2 を製造した。これらを用いたコンクリートの熱拡散率測定結果は図-3 ③④~④⑤ のとおりである。この結果を複合材料としての見地から検討した。すなわち、コンクリートをモルタルと粗骨材の両素材から構成される複合材料と仮定する。コンクリートから粗

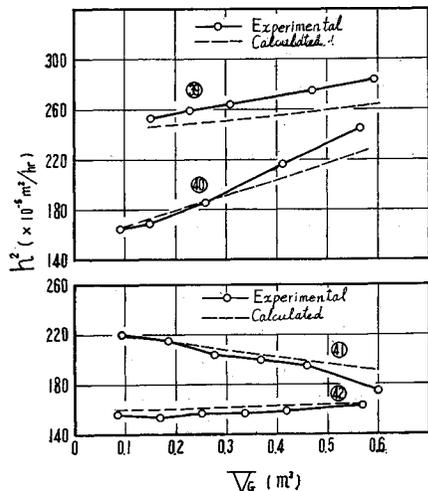


図-9 熱拡散率の実測値と推定値の比較

骨材を除去し、残りのモルタル部分が単位体積となるように換算する。この換算配合のモルタルの熱拡散率はすでに得られている当該配合シリーズの一連の熱拡散率測定結果からただちに求められる。コンクリートの熱拡散率は素材の熱拡散率とその絶対容積の積に比例すると仮定し、両素材について求めたこれらの積の和をコンクリートの熱拡散率の推定値とした。図-9 は、この推定値と実測値とを比較した結果で、実測値との差は数%を越えない。このような誤差が生じた原因として、骨材量と熱拡散率との関係が必ずしも直線的でないこと、熱拡散率の測定誤差が存在すること、などが考えられる。しかし、数%の推定誤差を認めることにすれば、上記の考え方は非常に有効であると考ええる。

(6) 細粗骨材の熱拡散率

前節において、コンクリートの熱拡散率に及ぼす各構成素材の影響は、それぞれの素材の熱拡散率と絶対容積の積に比例することが実験的に明らかとなった。したがって、コンクリートの熱拡散率とその構成素材であるモルタルの熱拡散率が既知であれば、粗骨材の熱拡散率を求めることができる。さらに、上記の考え方を発展させて、モルタルをセメントペーストと細骨材からなる複合材料と仮定すれば、セメントペーストおよびモルタルの熱拡散率を知って、細骨材の熱拡散率を推定することができる。このようにして得られた細粗骨材自身の熱拡散率を表-3に示す。ただし、セメントペーストは水セメント比が大きくなると分離が著しく、測定値の信頼性に問題があると考えられたため、測定を割愛したものである。これらについては、モルタル部分の骨材量と熱拡散率との関係からセメントペーストのそれを近似的に図上で求めた。セメントペーストの熱拡散率は、一般に $100 \sim 150 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{hr}$ であって、平均 $130 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{hr}$ 程度である¹⁹⁾から、近似的には、この値を用いてよいと考えられる。表-3 は、わが国においてごく普通に産する岩石の成因、化学成分などを基準とした分類法²³⁾に準じて本研究に用いた骨材を配列した結果であって、骨材の熱拡散率および比重を併記した。ただし、天然骨材、人工軽量骨材、および重量骨材に対して本分類法は適用できないが、参考のため、人工軽量骨材のデータも表示した。同表から骨材の熱拡散率に関する普遍的な規則性を導くには、さらに多くのデータの積み重ねが必要と思われる。しかし、おおむね次のような傾向が認められる。火成岩についてみれば、花崗岩、石英斑岩などのように SiO_2 を多く含む岩石は、玄武岩、角閃岩など SiO_2 含有量の比較的少ないものより熱拡散率が高い。このことは、沈積岩、変成岩についても同様であって、珪岩、砂岩、砂質粘板岩などの熱拡散率はかなり大きい値

表-3 細粗骨材の熱拡散率 $h^2 (\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{hr})$ および比重 S.G.

		h^2	S.G.			h^2	S.G.			h^2	S.G.	
火 成 岩	花 崗 岩	G	450	2.65	斑 岩	G	342	2.64	角 閃 岩	G	340	2.92
		S	416	2.61		S	267	2.62		S	327	2.85
		S	482	2.64		S	361	2.80				
	輝 緑 岩	G	442	2.61	玢 岩	G	328	2.53	玄 武 岩	G	323	2.73
		S	323	2.59		S	272	2.73		S	258	2.68
		S	360	2.57		S	325	2.59				

		h^2	S.G.	
沈 積 岩	火 山 灰	G	125	1.29
		S	153	2.44
	硬 砂	G	591	2.67
		S	467	2.71
	砂	G	416	2.64
		S	349	2.60
砂	G	562	2.69	
	S	494	2.60	
粘 土	G	417	2.57	
	S	383	2.60	
粘 板 岩	G	360	2.56	
	S	417	2.68	
石 灰	G	396	2.71	
	S	413	2.68	
		353	2.67	

		h^2	S.G.	
変 成 岩	珪 岩	G	668	2.64
		S	561	2.59
	片麻 岩	G	374	2.80

		h^2	S.G.	
人 工 軽 量 骨 材	人 工 骨 材	G	188	1.40
		S	142	1.34
		S	169	1.80
		S	158	1.60
	バ ラ イ ト	G	156	1.92
		S	148	1.88
		169	2.02	
		35	0.22	
		61	0.56	

である。火山灰、人工軽量骨材などは、一般に SiO_2 を多く含むといわれているが、熱拡散率は非常に小さい。これは、骨材の組織がポーラスなためであると考えられる。同種の岩石の熱拡散率は、比重の大きなものほど大きいようである。石灰岩のように、 SiO_2 含有量の小さいものでも大きな熱拡散率を示すものがある。以上のように、同表は使用骨材の熱拡散率を推定する際の目安を与えるものとする。

4. 結 言

コンクリート構造物の設計、施工の際に必要な材料の諸性質に関する基礎的資料のうち、コンクリートおよび骨材の熱的性質に関するものが非常に重要な場合がある。しかし、この種の研究報告はきわめて少なく、いまだに明らかにされていない面が多い。本研究は、コンクリートの熱的性質に関する研究の一環として行なったものであって、各種材料を用いたコンクリート、モルタル、およびセメントペーストの配合 387 種を定め、これ

らについて熱拡散率および熱伝導率を測定し、比熱を推定した結果をとりまとめたものである。特にコンクリートおよび骨材の熱拡散率について、これを種々の角度から究明した。それらの結果を要約すれば、次のようになる。

(1) 細粗骨材の石質が同じ場合、コンクリートの熱拡散率および熱伝導率は、骨材量の増加とともにほぼ一定の割合で増加あるいは減少する傾向がある。骨材の熱拡散率がセメントペーストのそれに比較して大きいときは増加傾向、小さいときは減少の傾向を示すのであって、両者の差が大きいほどその割合は大きくなると考えられる。細粗骨材の石質が異なる場合、骨材量の増加にともなう熱拡散率および熱伝導率の変化は、モルタル部分とコンクリート部分とで違った傾向を示す場合がある。これは両骨材の熱拡散率が大きく異なるからであるうと考えられる。また、比熱の変化は、熱拡散率、熱伝導率と全く逆の傾向を示す。

(2) 熱拡散率 h^2 (m²/hr) と熱伝導率 K (kcal/m・hr・°C) との間には次式 (1) が成立する。両測定法を比較すると前者が後者より簡便かつ迅速であるから、前者を知って後者を推定するほうが有利であって、その場合の標準誤差は 0.156 kcal/m・hr・°C である。

$$K=725 \cdot h^2 \dots\dots\dots (1)$$

比熱 C (kcal/kg・°C) とコンクリートの単位容積重量 ρ (kg/m³) との間には次式 (2) が成立する。同式を用いて比熱を推定するときの標準誤差は 0.040 kcal/kg・°C である。

$$C=\frac{725}{\rho} \dots\dots\dots (2)$$

(3) 一般に、水セメント比が大きくなれば、セメントペーストの熱拡散率は小さくなるし、モルタルおよびコンクリートのそれは大きくなる傾向を示す。また、細粗骨材の石質が同じで、その熱拡散率がセメントペーストのそれより大きな場合、骨材最大寸法が大きいほど単位骨材量は増すので、コンクリートの熱拡散率は大きくなる傾向を示す。

(4) 混和材料として、フライアッシュあるいは減水剤を用いたコンクリートの熱拡散率は、これを混和しないコンクリートのそれとほとんど同等であると考えられる。

(5) コンクリートをモルタルと粗骨材の両素材からなる複合材料と仮定すると、コンクリートの熱拡散率に及ぼす各構成素材の影響は、それぞれの素材の熱拡散率と絶対容積の積に比例する。したがって両素材について求めたこれらの積の和はコンクリートの熱拡散率の推定値を与える。また、コンクリートおよびこれを構成するモルタル部分の熱拡散率が既知であるとき、粗骨材の熱

拡散率を推定できるし、モルタルがセメントペーストと細骨材の両素材からなると仮定すれば、モルタルおよびセメントペーストの熱拡散率を知って、細骨材の熱拡散率を推定できる。なお、セメントペーストの熱拡散率を近似的に 130×10^{-5} m²/hr としてよい。両推定値とも、平均値からのばらつきは数%以下であった。このようにして、従来、きわめて困難とされていた骨材自身の熱拡散率を容易に推定できる。

(6) 前記方法によって求めた細粗骨材の熱拡散率は、石灰岩を除く普通骨材の場合、SiO₂含有量の多いものほど大きい値を示す。同種の石質については、比重が大きいほどその熱拡散率は大きくなるようである。

本研究の一部は、著者の1人が財団法人電力中央研究所、函館工業高等専門学校に在職中に行なったもので、関係各位のご指導、ご協力に対し厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior: Boulder Canyon Project Final Reports, Part VII—Cement and Concrete Investigations, Bulletin 1, Thermal Properties of Concrete, 1940.
- 2) Thomson, W.T.: A Method of Measuring Thermal Diffusivity and Conductivity of Stone and Concrete, Proc. of A.S.T.M., Vol. 40, 1940.
- 3) 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. 1~11, 1954.
- 4) 原田 有: 高温度におけるセメントモルタルおよびコンクリートの熱伝導率の変化, 日本建築学会研究報告, No. 49, pp. 1~8, 1954.
- 5) Lentz, A.E. and G.E. Monfore: Thermal Conductivity of Concrete at Very Low Temperatures, Jour. of PCA Research and Development Laboratories, pp. 39~46, May, 1965.
- 6) Campbell-Allen, D. and C.P. Thorne: The Thermal Conductivity of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 15, No. 43, pp. 39~48, March, 1963.
- 7) Missenard, A.: Recherches Théoriques et Expérimentales sur la Conductivité Thermique des Bétons, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Nos. 211-212, pp. 949~968, Juillet-Août, 1965.
- 8) 斉藤 武・岡垣 理: 湿った物質の伝熱特性, 日本機械学会誌, Vol. 62, No. 484, pp. 75~81, 昭和 34 年 5 月.
- 9) 西 忠雄・有坂正典: 軽量コンクリートの熱伝導率一特に含水を異にする場合, 構造用軽量コンクリートシンポジウム, 日本 ACI, 昭和 39 年 11 月.
- 10) 徳田 弘・伊藤 勉: 人工軽量骨材を用いたコンクリートの熱的性質について, 土木学会コンクリートライブラリー No. 10, pp. 26~31, 昭和 39 年.
- 11) 徳田 弘: パーライトコンクリートおよび火山灰コンクリートの 2, 3 の性質, 土木学会第 21 回年次学術講演会概要集, 第 IV 部, pp. 70-1~70-2, 昭和 41 年.
- 12) 中条金兵衛・佐治健治郎・本間栄五郎: 原子炉遮蔽用コンクリートの熱特性に関する研究, 日本セメント(株) 研究所要報, No. 164, 昭和 32 年 8 月.

- 13) 徳田 弘・庄谷征美：複合材料としてのコンクリートの熱拡散率，日本材料学会第 21 期学術講演会講演概要集，pp. 73~74，昭和 47 年 5 月。
- 14) 徳田 弘・庄谷征美・国分修一：膨張性セメント混和材を用いたコンクリートの熱拡散率に関する研究，土木学会膨張性セメント混和材を用いたコンクリートに関するシンポジウム，昭和 47 年 8 月。
- 15) 長谷川英雄・長坂善美夫：コンクリートの熱的性質に関する 2, 3 の実験，土木学会第 19 回年次学術講演会概要集，第 IV 部，pp. 69-1~69-2，昭和 39 年。
- 16) 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，技術研究報告（土木 63014），昭和 39 年 3 月。
- 17) 徳田 弘・伊藤 勉：コンクリートの熱拡散率に及ぼす配合，フライアッシュ混和，および粗骨材の石質の影響，セメント技術年報，XVII，pp. 249~255，昭和 38 年。
- 18) Tokuda, H. : Some Experimental Results on Thermal Properties of Concrete, Proc. of the 7th J.C.T.M., The Society of Materials Science, Japan, pp. 122~123, 1964.
- 19) Tokuda, H. : Experimental Studies on Thermal Properties of Concrete, Proc. of the 8th J.C.T.M., The Society of Materials Science, Japan, pp. 112~114, 1965.
- 20) International Sub-Committee on Concrete for Large Dams : Collection of Data on the Thermal Properties of Concrete for Dams, 1958.
- 21) Mitchel, L.J. : Thermal Properties of Hardened Concrete, Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Aggregates, A.S.T.M. STP No. 169, pp. 129~135, 1956.
- 22) Herbert K. Cook : Thermal Properties of Concrete Aggregates, A.S.T.M. STP No. 169, pp. 325~333, 1956.
- 23) 土木学会編：土木工学ハンドブック（下巻），p. 2541，昭和 39 年。

(1972.8.21・受付)