

論文 コンクリートの熱伝導特性に及ぼす調合の影響

関 俊力*1・山田 和夫*2

要旨: 本研究では、モルタルおよびコンクリートの熱伝導特性に及ぼす水セメント比および含水率の影響について一連の実験的・解析的検討を行った。その結果、モルタルの場合には、水セメント比の増大および含水率の低下とともに試験体表面近傍の内部温度上昇は著しくなり、内部の温度勾配は大きくなる傾向を示すこと、モルタルの熱拡散率は、水セメント比が大きくなるに従って増大するが、コンクリートの熱拡散率は、水セメント比の影響が明確ではないこと、本研究で提案した手法を用いて熱伝達率を算定することにより、モルタルおよびコンクリート試験体内部の熱伝導特性を合理的に説明できること、などが明らかとなった。
キーワード: コンクリート, 非破壊試験, 熱伝導率, 熱拡散率, 熱伝導特性, 水セメント比, 含水率

1. はじめに

測定結果として得られる表面情報からその原因となる未知の内部状況を推定しようとする非破壊試験は、広い意味でいえば全て逆問題であり、特にコンクリートの内部探査を目的としたサーモグラフィ法では、得られる表面情報と内部状況との関係を支配するのはコンクリートの熱伝導特性である。筆者らは、この点を踏まえて、これまでにサーモグラフィ法を適用したコンクリートの非破壊試験方法の確立を目的とした基礎的研究として、逆解析手法を適用したサーモグラフィ法によるコンクリートの内部探査の適用性¹⁾について検討を行うとともに、日射²⁾やセメントの水和熱³⁾を熱源として利用したパッシブな測定方法、並びに冷却や加熱などの強制熱源^{4),5)}を利用したアクティブな測定方法について一連の検討を行った。その結果、コンクリートの内部探査を目的とした逆問題としてのサーモグラフィ法の推定精度を向上させるには、対象コンクリートの熱伝導特性を支配する各種熱特性（後掲の式(1)および(2)中の熱伝導率(k)および熱拡散率(D)または密度(ρ)×比熱(c))を正確に把握しておく必要のあることが明らかとなった。そのため、別報⁶⁾においては、コンクリートの熱伝導特性に及ぼす空気量および粗骨材量の影響について一連の検討を行った。本研究では、引き続きコンクリートの熱伝導特性に及ぼす調合要因および含水率の影響について一連の実験的および解析的検討を行うこととした。

2. 本研究で定量化の対象とした熱特性値

コンクリートの内部探査を目的としたサーモグラフィ法のように、内部発熱が無い熱伝導問題における支配方程式は、一般的に次式⁷⁾で与えられる。

$$k \cdot \nabla^2 T - \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \cdot c = k/D \quad (2)$$

ここに、 T : 温度, t : 時間, k : 熱伝導率, ρ : 密度, c : 比熱, D : 熱拡散率。

内部探査を目的としたサーモグラフィ法は、得られた表面情報から推定したい内部状況を未知量として上式を逆解析的に解く問題に相当するため、コンクリート内部の熱特性値が推定結果に直接影響することになる。本研究では、上記の未知量のうち熱拡散率を次式⁸⁾を用いて算定し、熱伝導率はプローブ法を用いて実測した。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (3)$$

ここに、 $C(x,t)$: 任意の位置(x)および時刻(t)における温度(°C), C_0 : 表面温度(°C), x : 表面からの深さ(cm), t : 経過時間(sec), D : 熱拡散率(m^2/hr), $\operatorname{erf}(s)$: 誤差関数(ただし、相補誤差関数($\operatorname{erfc}(s) = 1 - \operatorname{erf}(s)$))の計算に際しては、式(4)に示す近似式を用いた)。

$$1 - \operatorname{erf}(s) = 1 / (1 + 0.278393 + 0.230389s^2 + 0.000972s^3 + 0.078108s^4)^4 \quad (4)$$

3. 実験方法

3.1 実験の概要

本実験の概要を表-1に示す。本実験では、図-1に示す150×150×150mmの立方試験体を使用し、水セメント比(W/C)を40, 65および90%に設定したモルタル試

表-1 実験の概要

試験体記号	種類	W/C (%)	砂セメント比 (S/C)	乾湿の状態	空気層温度 (°C)	熱電対設置深さ (mm)
M40	モルタル	40	1.25	乾燥	60	10 20 40 70 100
M65		65	3.00			
M90		90	4.50			
C40	コンクリート	40	1.25	乾燥		
C65		65	3.00			
C90		90	4.50			
D65	モルタル	65	3.00	乾燥		
W65		65	3.00	湿潤		

*1 愛知工業大学大学院 工学研究科生産・建設工学専攻 修士(工学) (正会員)

*2 愛知工業大学 工学部都市環境学科建築学専攻教授 工博 (正会員)

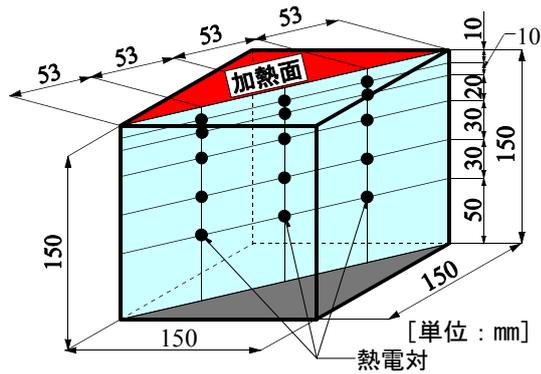


図-1 試験体の形状・寸法

表-2 標準調合表
(a) モルタル

試験体記号	W/C (%)	砂セメント比 (S/C)	単位質量(kg/m ³)			目標フロー値
			水	セメント	砂	
M40	40	1.25	334	835	1044	200±10
M65	65	3.00	307	472	1415	
M90	90	4.50	305	339	1527	

(b) コンクリート

試験体記号	W/C (%)	砂セメント比 (S/C)	単位質量(kg/m ³)			
			水	セメント	砂	粗骨材
C40	40	1.25	200	501	626	1064
C65	65	3.00	184	283	849	1064
C90	90	4.50	183	204	916	1064

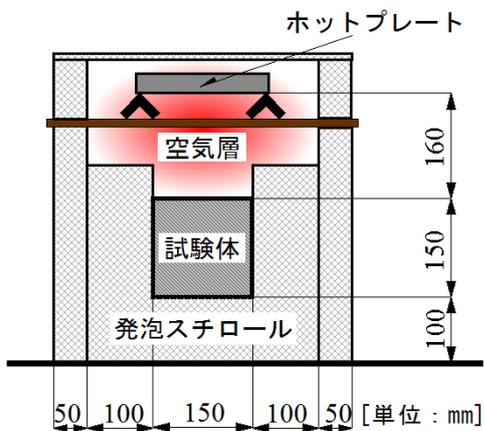
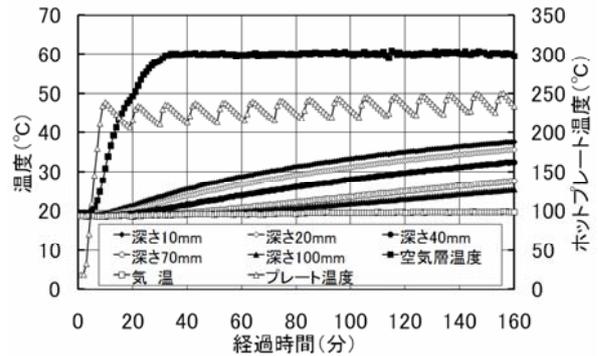
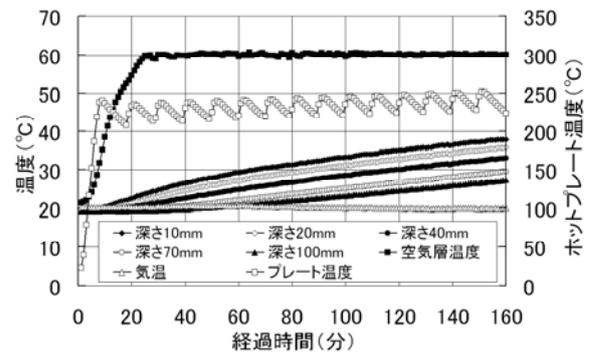


図-2 計測要領

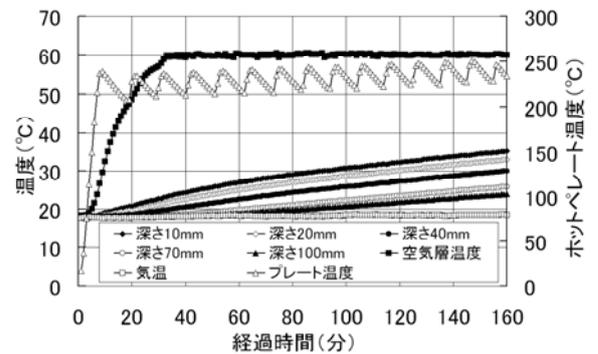
験体 (M40, M65およびM90の3種類) およびコンクリート試験体 (C40, C65およびC90の3種類) 内部の所定の位置 (加熱表面から10, 20, 40, 70および100mmの深さ) に熱電対を各3点の計15箇所設置 (図-1 参照) して、モルタルおよびコンクリート試験体内部の熱伝導特性に及ぼす水セメント比の影響について調査を行った。なお、本実験では、原則として質量が安定するまで養生室内で空中養生を行って自然乾燥させた試験体を用いたが、水セメント比がW/C=65%のモルタル試験体については、熱伝導特性に及ぼす内部含水状態の影響について検討することを目的として、乾燥状態としたD65試



(a) M40試験体



(b) C40試験体



(c) W65試験体

図-3 計測結果の例

験体と計測直前まで水中養生して湿潤状態に保持したW65試験体を用いた計測も行い、試験体内部の含水状態の影響についても調査を行った。本実験で用いたモルタルおよびコンクリートの標準調合表を表-2に示す。

3.2 計測方法

本実験で用いた計測の要領⁶⁾を図-2に示す。本実験では、熱伝導特性の計測は全て室温が約20°Cの実験室内で実施し、図に示すように、加熱面以外の5面を発泡スチロールで断熱した試験体の加熱表面から160mm離れた位置に温度調節が可能なホットプレートを設置して、試験体加熱面とホットプレートとの間の空気層の温度が60°Cの一定となるようにホットプレートの温度を制御しながら、試験体内部の15箇所 (図-1 参照) に設置した熱電対を用いて内部温度の経時変化を加熱開始から160分経過するまで1分毎に自動計測した。なお、湿潤状態

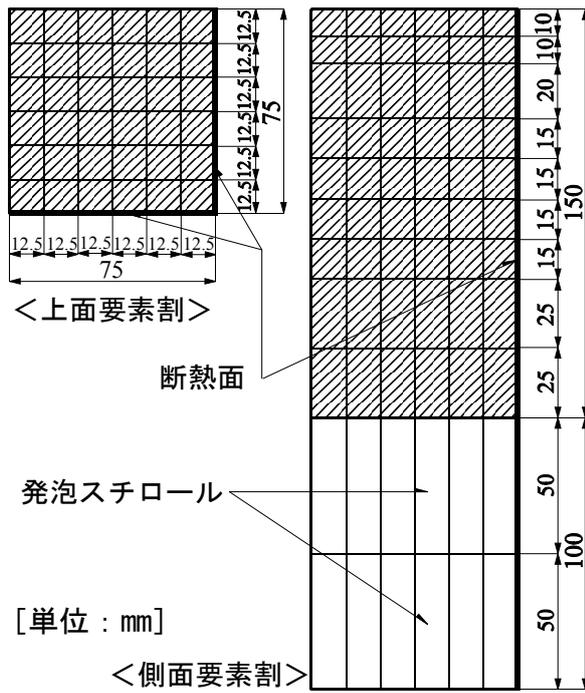


図-4 解析モデル

に保持したW65試験体の計測に際しては、加熱段階での試験体の乾燥を防ぐために、試験体表面に特殊硬質グリース（NEW-SL）を塗布した後にラップで被覆した。気温、試験体上部空気層の温度、ホットプレートの温度および内部温度に関する測定結果の例を図-3に示す。

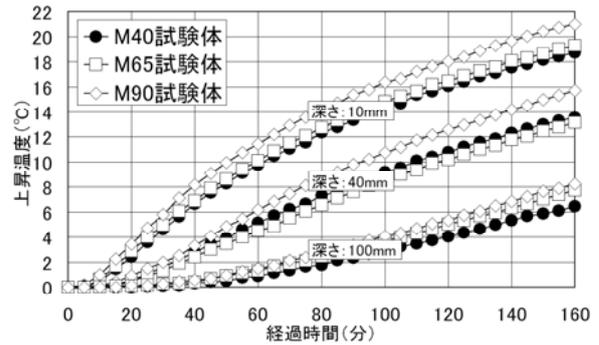
3.3 熱拡散率の算出方法

熱拡散率 (D) の算出に際しては、まず各時刻で測定された内部温度分布を4次の多項式で最小二乗近似することによって、前掲の式(3)中の各時刻の表面温度 (C_0) を推定した後、各時刻における各測定深さの内部温度の実測値と計算値との差の2乗和が最小となる熱拡散率を非線形最小二乗法を適用した逆解析により算定した。

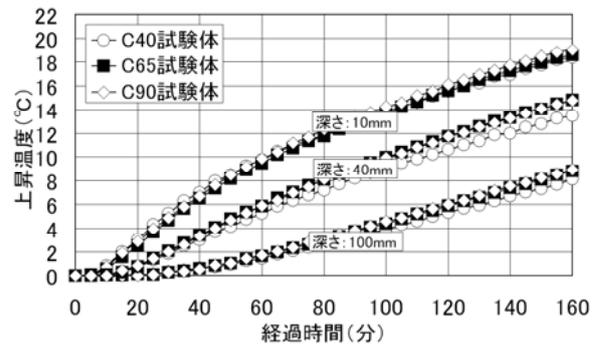
4. 解析方法

本研究では、算定した熱拡散率の妥当性を確認するために、8節点アイソパラメトリック要素を用いた3次元非定常熱伝導有限要素解析⁷⁾を行って実験結果との比較を行った。なお、本解析では、前掲の図-1に示した立方試験体の対称性を考慮して図-4に示す1/4解析モデルを使用した。また、解析に必要な熱伝導率および各時刻の試験体上層部の気温は実測値を使用し、[密度]×[比熱] ($\rho \cdot C$) は、3.3節に示した方法で算出した熱拡散率 (D) と熱伝導率 (k) を前掲の式(2)に代入して求めた。

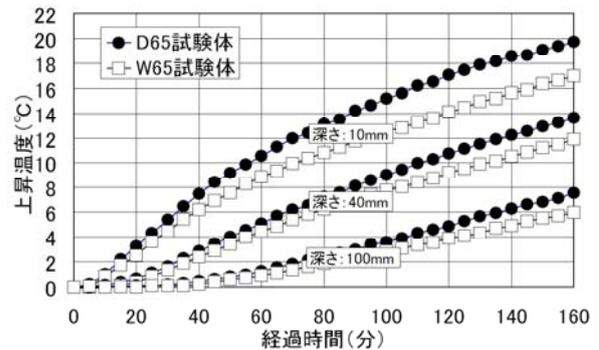
解析に際しては、まず試験体および発泡スチロールの初期温度を20℃に設定し、実測された試験体上層部の温度を入力データ（試験体表面との境界面を熱伝達境界と設定した）として、加熱開始後160分が経過するまで時間増分を5分に設定して非定常熱伝導解析を行った。



(a) 水セメント比の影響(モルタル試験体)



(b) 水セメント比の影響(コンクリート試験体)

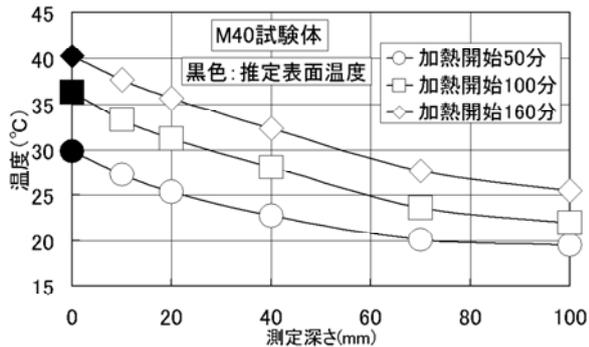


(c) 含水率の影響(モルタル試験体)
図-5 内部温度の経時変化

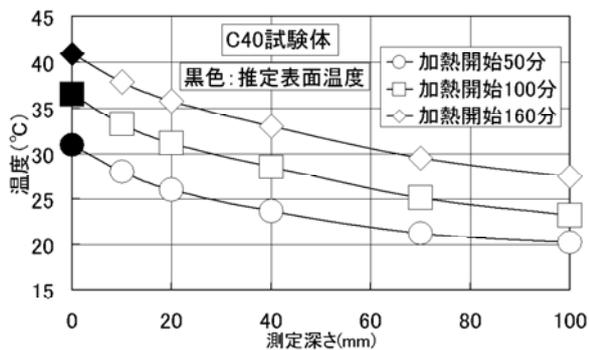
5. 結果とその考察

5.1 内部温度分布性状

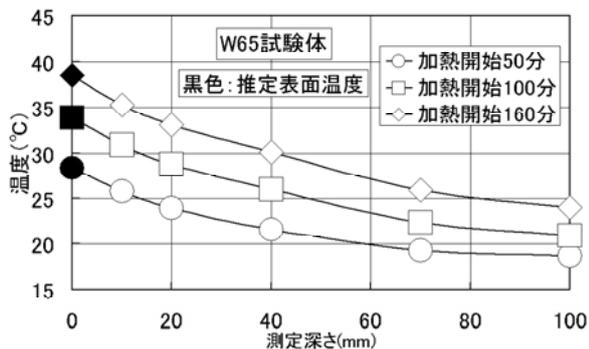
図-5(a)および(b)は、それぞれモルタルおよびコンクリート試験体の内部温度の経時変化に及ぼす水セメント比 (W/C) の影響を、また図-5(c)は、モルタル試験体の内部温度の経時変化に及ぼす含水率の影響を熱電対の設置深さ別に示したものである。これらの図によれば、図-5(a)に示したモルタル試験体の場合には、熱電対の設置深さに関わらず水セメント比が大きくなるほど温度上昇も大きくなっており、熱伝導特性が向上する傾向にあることがわかる。また、水セメント比が内部温度に与える影響は、試験体表面からの深さが深くなるに従って徐々に小さくなっており、水セメント比の小さい試験体の方が、内部の温度勾配は小さくなることを示している。図-5(b)に示したコンクリート試験体の場



(a) M40試験体

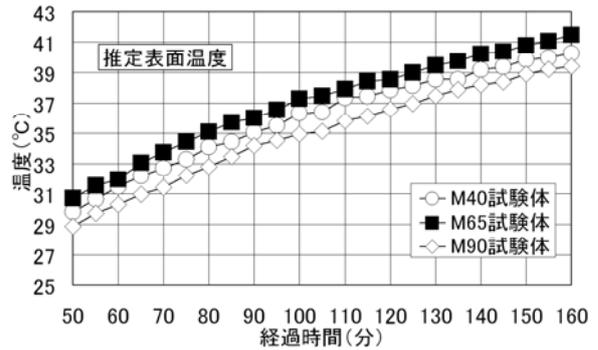


(b) C40試験体

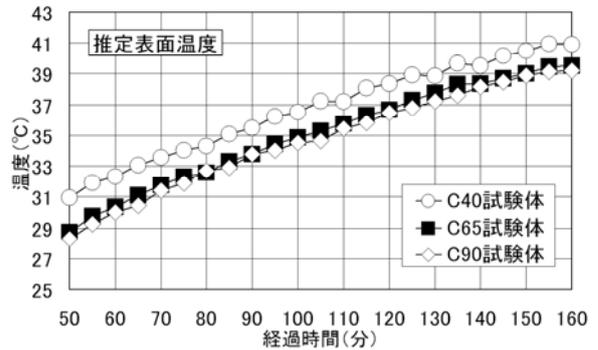


(c) W65試験体

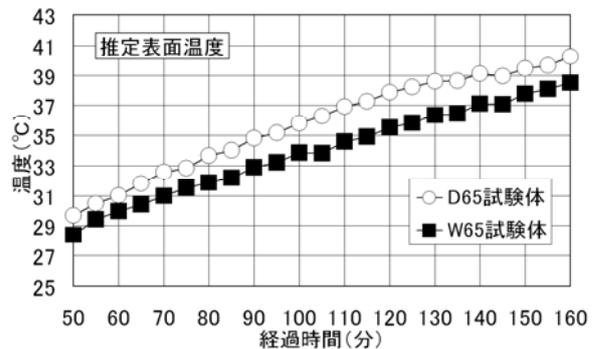
図-6 表面温度の推定結果の例



(a) 水セメント比の影響(モルタル試験体)



(b) 水セメント比の影響(コンクリート試験体)



(c) 含水率の影響(モルタル試験体)

図-7 推定された表面温度の経時変化

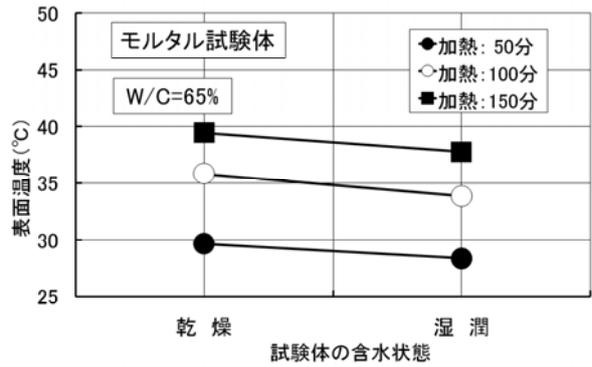
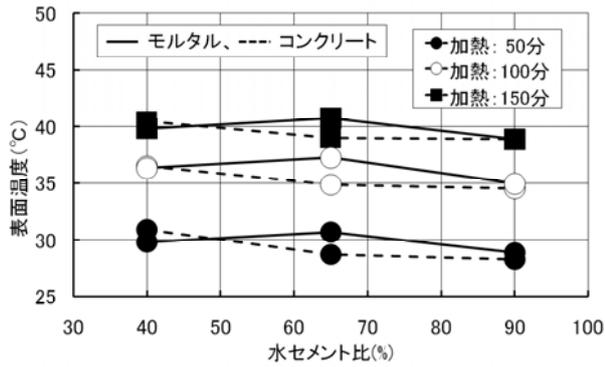
合においても、若干ではあるが水セメント比が大きくなるに従って温度上昇が大きくなる傾向を示しているが、水セメント比が内部温度に及ぼす影響はモルタル試験体の場合に比べて小さく、特に水セメント比(W/C)が65および90%のC65試験体(図中の■印)およびC90試験体(図中の◇印)の内部温度の経時変化は類似した結果を示している。これは、コンクリート試験体の場合には、内部に粗骨材が混入されているため、水セメント比の影響として結果を支配するモルタル部分がモルタル試験体に比べて少ないためと考えられる。一方、図-5(c)に示した内部温度の経時変化に及ぼす含水率の影響については、湿潤状態のW65試験体(図中の■印)よりも乾燥状態のD65試験体(図中の○印)の方が温度上昇が著しくなっているが、この内部温度上昇の差は、試験体表面からの深さが深くなるとともに小さくなっており、水中

養生を行って内部空隙が水で満たされて含水率が增大すると、内部の温度勾配は小さくなる傾向を示している。

5.2 熱拡散率の算定結果

図-6に、3.3節で示した方法により内部温度から表面温度を推定した結果の例を示す。また、図-7(a)および(b)に、それぞれモルタルおよびコンクリート試験体に対して推定された表面温度の経時変化を示す。これらの図によれば、加熱表面上部の空気層が一定の気温(本実験では60°Cとした)に保持された条件下では、モルタルおよびコンクリート試験体の表面温度は、やや上に凸の関係を示しながら時間経過とともに上昇し、かつ水セメント比が小さいほど大きくなる傾向を示している。

図-8(a)および(b)は、それぞれ加熱開始後50、100および150分が経過した時点における推定表面温度に及ぼす水セメント比および試験体内部の含水率の影響を示



(a) 水セメント比の影響 (b) 含水率の影響
 図-8 推定された表面温度に及ぼす水セメント比および試験体内部の含水率の影響

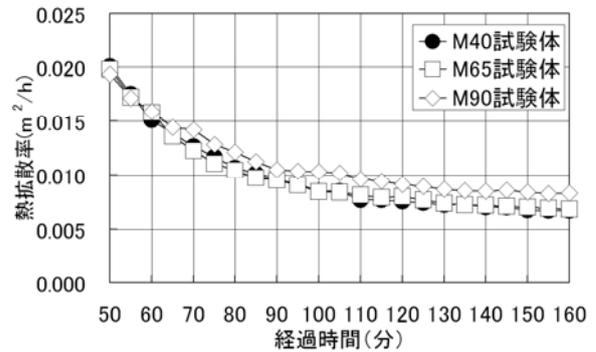
したものである。これらの図によれば、加熱時間に関わらず試験体の表面温度は、一般的に水セメント比が大きくなるほど、かつ乾燥状態の試験体よりも湿潤状態の試験体の方が低下する傾向を示しているのわかる。

図-9(a)~(c)は、3.3節に示した方法で算出した熱拡散率の経時変化に及ぼす水セメント比または含水率の影響を試験体の種類別に示したものである。これらの図によれば、各時刻毎に算定された熱拡散率は、いずれの試験体も時間の経過とともに低下するが、その低下率は時間の経過とともに徐々に小さくなっており、その後は、特定の値に収束する傾向を示している。特に、加熱初期の時間帯では、まだ熱が試験体全体に伝わっていないため、得られた熱拡散率は安定していないが、熱が試験体全体に伝わった加熱開始から120分経過以降の時間帯になると、ほぼ一定値に収束するのが読み取れる。

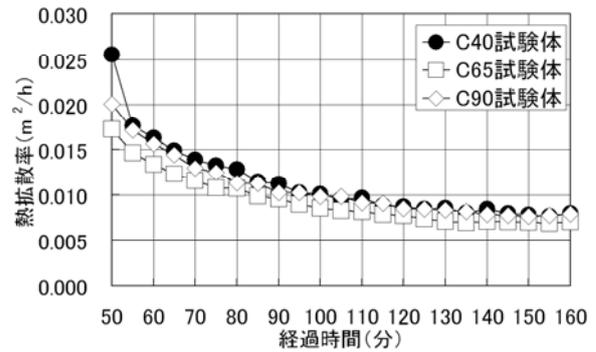
図-9(a)に示したモルタル試験体の場合には、加熱初期の時間帯では、算定された熱拡散率は水セメント比によって殆ど差が認められないが、時間の経過とともにその差は大きくなり、一般的に水セメント比が大きいほど熱拡散率も大きくなっている。ただし、水セメント比(W/C)が40および65%のM40試験体(図中の●印)およびM65試験体(図中の□印)の差は明確ではない。これに対して、コンクリート試験体の場合(図-9(b)参照)には、モルタル試験体の場合に比べて熱拡散率に及ぼす水セメント比の明確な影響は認められない。また、熱拡散率に及ぼす含水率の影響(図-9(c)参照)については、加熱初期の時間帯では、含水率の大きい水中養生試験体(W65試験体、図中の□印)の方が算定された熱拡散率は大きくなっているが、時間の経過とともにその差は小さくなり、加熱後160分が経過した時点では、熱拡散率に及ぼす含水率の影響は殆ど認められない。

5.3 実験結果と解析結果との比較

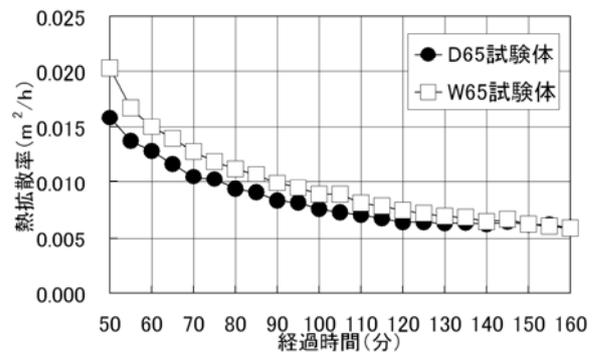
解析に用いた各構成材料の熱的特性を表-3に示す。なお、表中の密度および熱伝導率は実測値であり、熱拡散率は、前掲の図-9に示した結果を踏まえて加熱開始



(a) 水セメント比の影響(モルタル試験体)



(b) 水セメント比の影響(コンクリート試験体)



(c) 含水率の影響(モルタル試験体)

図-9 算定された熱拡散率の経時変化

後160分が経過した時点で算定した値を採用した。図-10(a)~(c)は、試験体の内部温度の経時変化に関する実験結果と解析結果との比較を実験シリーズ毎に示した例である。これらの図によれば、加熱開始初期の時間帯

表-3 解析に用いた構成材料の熱特性

試験体記号	密度 ρ (g/cm ³)	熱拡散率 (m ² /h)	比熱 c (cal/g \cdot °C)	密度 \times 比熱 ($\rho \cdot c$)	熱伝導率 (W/m \cdot K)
M40	2.13	0.00668	0.24	0.51	1.42
M65	2.16	0.00680	0.22	0.48	1.37
M90	2.09	0.00829	0.17	0.35	1.22
C40	2.38	0.00800	0.22	0.52	1.73
C65	2.30	0.00706	0.27	0.61	1.82
C90	2.26	0.00791	0.20	0.46	1.51
D65	2.16	0.00680	0.22	0.48	1.37
W65	2.12	0.00793	0.19	0.41	1.37
発泡スチロール	0.03	—	0.30	0.009	0.04

において試験体表面近傍で多少の相違は認められるが、全体的な内部温度の経時変化に関する実験結果と解析結果とは比較的良く一致しており、本解析手法および本実験において各水セメント比および各含水率ごとに算定した熱拡散率を用いることにより、モルタルおよびコンクリートの熱伝導特性を合理的に説明することができる。

6. 結論

熱伝導特性の把握を目的とした本研究によって得られた結果を要約すると、およそ以下のようにまとめられる。

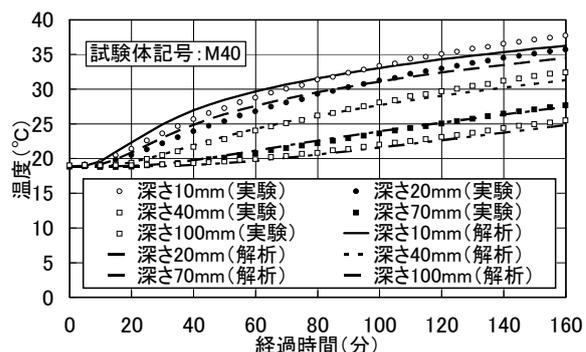
- 1) モルタルの場合には、水セメント比の増大および含水率の低下とともに試験体表面近傍の内部温度上昇は著しくなり、内部の温度勾配は大きくなる傾向を示す。ただし、コンクリートの場合には、熱伝導特性に及ぼす水セメント比の影響は明確ではない。
- 2) モルタルの熱拡散率は、水セメント比が大きくなるに従って増大する傾向を示すが、コンクリートの熱拡散率は、水セメント比の影響が明確ではない。
- 3) 本提案手法を用いて測定対象であるモルタルおよびコンクリートの熱伝導率を算定することにより、モルタルおよびコンクリート試験体内部の熱伝導特性を合理的に説明することができ、逆問題としてのサーモグラフィー法の推定精度の向上が期待できる。

謝辞

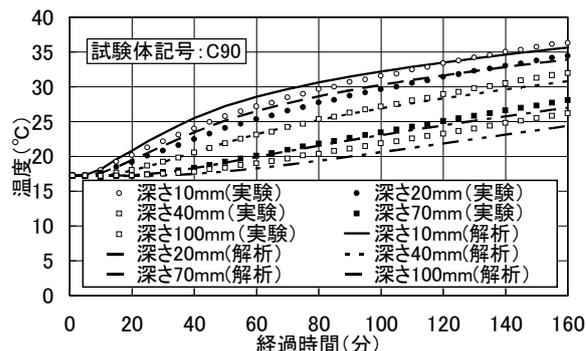
本実験とデータ整理に際して、多大なるご助力を得た愛知工業大学学部学生の浅井和美さん、井上晃一君、小幡大晃君および水野幸恵さんに対して謝意を表します。

参考文献

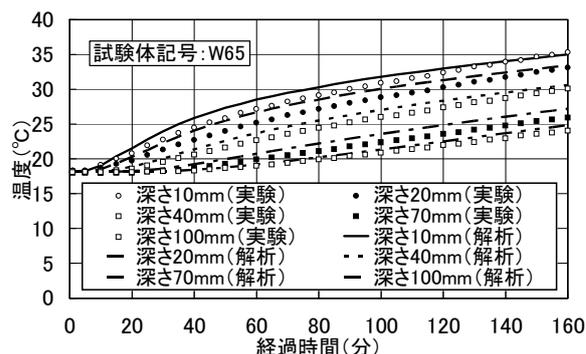
- 1) 勝見 隆, 山田和夫, 桃木昌子: 逆解析手法を適用したサーモグラフィー法によるコンクリートの内部探査, コンクリート工学年次論文報告集, 第19巻, 第1号, pp.1315-1320, 1997.6
- 2) 山田和夫, 桃木昌子: サーモグラフィー法によるコンクリートの内部探査結果に及ぼす日射量の影響に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.1215-1220, 1996.6
- 3) 山田和夫, 桃木昌子, 勝見 隆: サーモグラフィー法を適用したコンクリートの充填性評価に関する基礎的



(a) M40試験体



(b) C90試験体



(c) W65試験体

図-10 実験結果と解析結果との比較の例

研究, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.222-227, 1997.12

- 4) 勝見隆, 山田和夫: サーモグラフィー法によるコンクリートの充填性評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1285-1290, 1999.7
- 5) 山田和夫, 安藤秀則: 強制加熱を利用したサーモグラフィー法によるコンクリートの内部評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No1, pp.1485-1490, 2002.7
- 6) 山田和夫, 関 俊力: コンクリート内部の熱伝導特性に及ぼす粗骨材および空気量の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), A-1, pp.237-238, 2007.9
- 7) 矢川元基: 有限要素法の基礎と応用シリーズ8—流れと熱伝導の有限要素法入門, 培風館, 342pp., 1990.10
- 8) 小根澤敦志ほか: 赤外線法を用いたコンクリート部材内の材料分布評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1751-1756, 2003.7