

# 論文 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

山田 和夫\*<sup>1</sup>・安藤 秀則\*<sup>2</sup>

**要旨**：本報では、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強制加熱時間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、長時間強制加熱を行うことによって介在物の検出性能は向上するが、その検出性能は介在物の種類およびその埋設深さによって著しく相違すること、強制加熱を利用した実用的な試験方法としては、10分～20分間程度の加熱を行い、その後の自然冷却時間中に観察される表面温度差の上昇現象を利用して検出精度の向上を図った方が良いこと、などが明らかとなった。

**キーワード**：非破壊検査, 内部探査, サーモグラフィー法, 強制加熱時間, 熱伝導解析

## 1. はじめに

筆者らは、これまでに日射<sup>1)~4)</sup>およびセメントの水和熱<sup>5),6)</sup>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探査について一連の検討を行った。また、別報<sup>7)</sup>では、これらの日射や水和熱を利用したパッシブな測定方法とは別に、強制的な加熱や冷却を利用したアクティブな測定方法についての検討を行い、強制加熱または冷却を行うことによって介在物の検出性能は向上するが、強制加熱または冷却には最適時間が存在し、時間の設定に注意が必要であることが明らかとなった。そのため、本研究では、引き続きサーモグラフィー法によるコンクリートの内部評価方法を確立することを目的とした基礎的研究として、サーモグラフィー法による内部探査結果に及ぼす強制加熱時間の影響について実験的・解析的な検討を行うこととした。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験の概要

実験の概要を表-1および表-2に示す。本実験では、図-1に示すように、寸法が100(縦)×100(横)×5(厚さ)mmの発泡スチロール板、木板および鉄板が試験体中央の所定の深さに埋

設されている寸法が300(縦)×300(横)×100(厚さ)mmの平板モルタル試験体を用いて、試験

表-1 実験の概要

介在物			測定表面色	
種類	埋設深さ (mm)	寸法 (mm)	欠陥部	健全部
無し	—	縦:100 横:100 厚: 5	打放し	打放し
発泡スチロール板	20			
	40			
	60			
木板	20			
鉄板	20			

表-2 強制加熱時間

介在物		強制加熱時間 (分)
種類	埋設深さ (mm)	
無し	—	110
発泡スチロール板	20	10, 20, 30, 40, 50, 110
	40	40, 50, 60, 70, 80, 110
	60	70, 80, 90, 100, 110
木板	20	10, 20, 30, 40, 50, 110
鉄板	20	5, 10, 20, 30, 40, 110

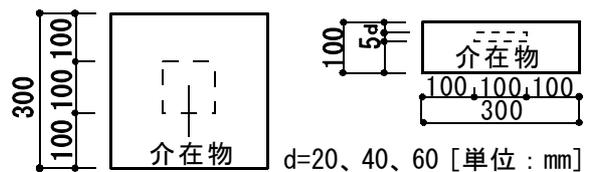


図-1 試験体の形状・寸法

\* 1 愛知工業大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

\* 2 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (正会員)

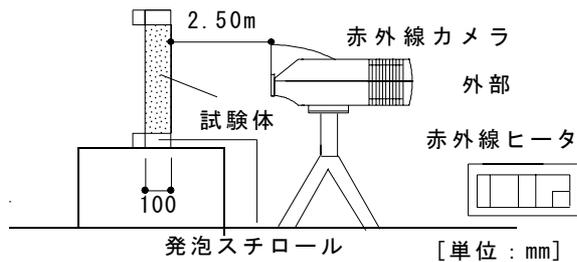


図-2 強制加熱による計測システム

体の表面温度分布状況と介在物の種類および埋設深さとの関係について調査を行った。なお、実験要因としては、表-1および表-2に示すように、介在物の種類（介在物無し、発泡スチロール板、木板、鉄板の4水準）、埋設深さ（20, 40, 60および100（介在物無し）mmの4水準）および試験体表面の加熱時間（埋設物の種類および埋設深さに応じて5~110分の範囲で4または5水準の加熱時間を設定した）を取り上げた。

## 2.2 計測・処理方法

計測は、全て実験室内（室温： $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ）で行い、試験体側面を発泡スチロールで断熱した後図-2に示すように赤外線カメラを試験体の正面2.5mの位置に設置して、赤外線ヒータ（VAL6YDK）によって試験体表面を所定の時間（表-2参照）強制加熱した直後から試験体表面温度の計測を経過時間が5分までの間は1分毎、5分から15分までの間は2分毎、その後は試験体表面温度がほぼ加熱前の温度に低下するまで5分毎に行った。なお、加熱に際しては、予備計測の結果を踏まえて試験体表面から1.5m離れた位置に赤外線ヒータをセットして表面温度にむらが生じないように注意を払った。

本実験では、いずれの計測も赤外線写真の撮影にコンパクトサーモ（TVS-2000 MK II LW）を使用し、測定された表面温度データをまず試験体表面の縦・横方向に各1.5cm間隔の格子状に分割平均化した後、各節点の表面温度を求めた。使用した赤外線カメラの性能を表-3に示す。

## 3. 解析の概要

本解析では、平板試験体の対称性を考慮して

表-3 赤外線カメラの性能

測定温度範囲	$-40^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$
赤外線検出器	MCT単素
検出波長領域	$8 \sim 12 \mu\text{m}$
冷却方式	スターリング・クーラ方式
赤外線走査線数	100本
最小検知温度差	$0.1^\circ\text{C}$
検出スピード	約15フレーム/秒

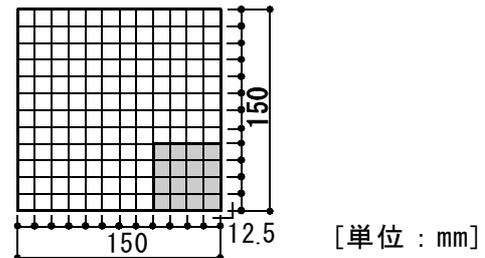


図-3 解析モデル（視点：上面）

表-4 解析に用いた構成材料の熱的特性

媒体の種類	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	比熱 ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )	熱伝導率 ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )	熱伝達率 ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ )
モルタル	2.00	$8.0 \times 10^{-4}$	1.30	
発泡スチロール	0.03	$12.6 \times 10^{-4}$	0.04	外*:30.1
木板	0.40	$13.0 \times 10^{-4}$	0.12	中*: 4.2
鉄板	7.86	$4.6 \times 10^{-4}$	44.80	内*:10.1

【注】\*：外壁面、中間層および内壁面の値。

図-3に示す1/4解析モデルを使用し、8節点アイソパラメトリック要素を用いた3次元定常および非定常熱伝導有限要素解析を行った。解析に用いた各構成材料の熱的特性を表-4に示す。なお、解析に際しては、強制加熱源と試験体との境界面を熱伝達境界とし、強制加熱による熱入力を相当外気温（ $65^\circ\text{C}$ ）として取り扱った。

## 4. 結果とその考察

図-4は、本実験で計測された試験体表面温度分布の経時変化の一例を示したものであるが、本研究では、測定結果の対称性を考慮して試験体表面温度に平均化処理<sup>1),2)</sup>を施した。以下では、いずれも平均化処理を施すことによって算定した表面温度を用いて考察することとした。

### 4.1 強制加熱方法の検討

本実験に先立ち、予備実験として本研究で用

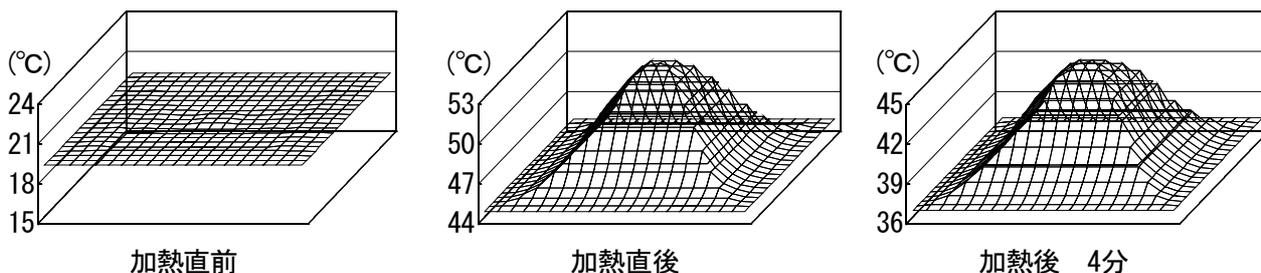


図-4 表面温度分布測定結果の一例（介在物：発泡スチロール板，埋設深さ：20mm，加熱時間：40分）

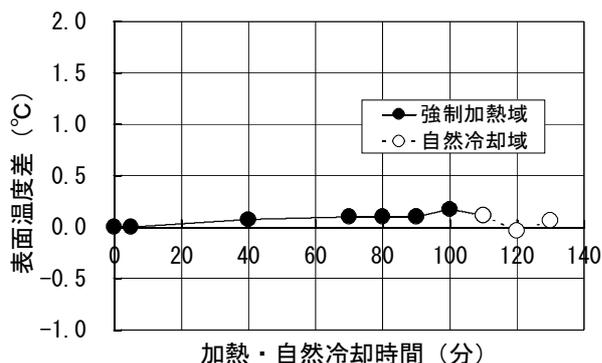


図-5 加熱方法の検討結果（介在物：無し）

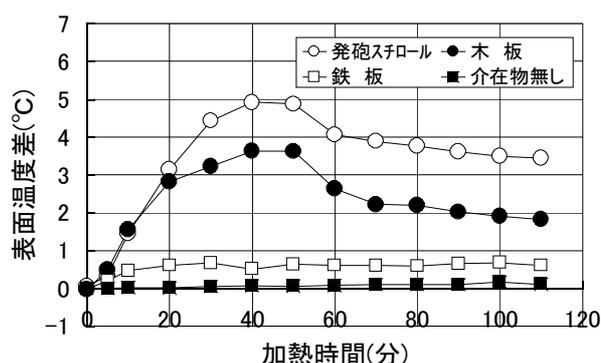


図-6 強制加熱時の表面温度差の経時変化に及ぼす介在物種類の影響（埋設深さ：20mm）

いた赤外線ヒータによる加熱方法の適用性について検討を行った。図-5は、介在物が埋設されていない打放し表面試験体を赤外線ヒータによって110分間強制加熱した場合の加熱および自然冷却時間中に計測した試験体表面中央部（介在物が埋設されている場合は埋設部と呼ぶ）の表面温度（中心位置から1.5cmの範囲（2格子間隔）の平均表面温度）と周辺部（介在物が埋設されている場合は非埋設部と呼ぶ）の表面温度（試験体表面の周端から中心に向かって1.5cmの範囲（1格子間隔）の平均表面温度）の差（以下、単に表面温度差と略記する）の経時変化を示したものである。図によれば、加熱直後の表面温度差は0.1°C程度と後述の介在物が埋設されている場合と比較して著しく小さくなっており、本研究で採用した赤外線ヒータによる加熱方法は、試験体表面をほぼ均一に加熱でき、コンクリートの内部探査を目的とした加熱方法として有効であることがわかる。

#### 4.2 強制加熱時の表面温度差の経時変化

図-6は、強制加熱時の表面温度差と加熱時間と関係に及ぼす介在物種類の影響を示したものである。図によれば、試験体を構成している

母材モルタルに比べて相対的に熱伝導率の小さい発泡スチロール板および木板（前掲の表-4参照）が埋設されている試験体では、加熱開始後20分程度の範囲までは介在物種類の影響をそれほど受けていないが、熱伝導率の小さい発泡スチロール埋設の試験体は、その後も安定した表面温度差の上昇が認められ、最高表面温度差およびその最高表面温度差が観察されるまでの加熱時間は、発泡スチロール埋設の場合がそれぞれ4.9°Cおよび40分で、木板埋設の場合（それぞれ3.6°Cおよび50分）と比較して最高表面温度差は1.3°C大きく、その最高表面温度差が観察されるまでの加熱時間は10分短くなっている。なお、その後も強制加熱を続けると、表面温度差は時間の経過とともに逆に低下するようになり、別報<sup>7)</sup>で示した数値解析の結果でも指摘したように、強制加熱を利用したサーモグラフィ法による内部探査には最適加熱時間が存在し、その最適加熱時間は介在物の種類によって相違することが実験でも確かめられた。一方、熱伝導率が母材モルタルの約35倍である鉄板埋

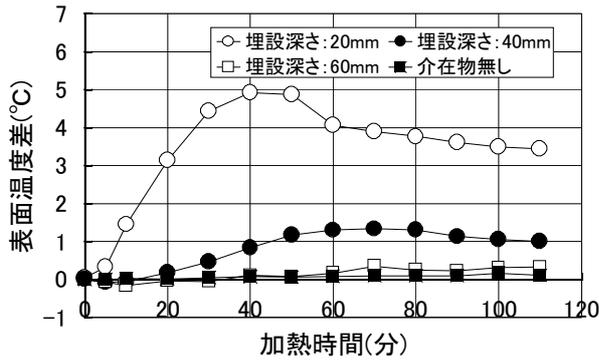


図-7 強制加熱時の表面温度差の経時変化に及ぼす埋設深さの影響  
(介在物種類：発泡スチロール板)

設の試験体では、最高表面温度差およびその最高表面温度差が観察されるまでの加熱時間は、それぞれ0.7°Cおよび90分で、介在物が埋設されていない場合（それぞれ0.17°Cおよび100分）とあまり差がなく、長時間加熱しても表面温度差の上昇は殆ど期待できないことがわかる。

図-7は、発泡スチロール埋設の試験体で観察された強制加熱時の表面温度差と加熱時間との関係に及ぼす介在物の埋設深さの影響を示したものであるが、埋設物が発泡スチロール板であっても埋設深さが40mmになると、最高表面温度差およびその最高表面温度差が観察されるまでの加熱時間は、それぞれ1.3°Cおよび60分で埋設深さが20mmの場合と比べて最高表面温度差は3.6度も低下している。更に、埋設深さが60mmの場合には、最高表面温度差は0.35°C（最高表面温度差が観察されるまでの加熱時間：70分）まで低下し、長時間加熱を行っても介在物の検出は殆ど不可能であるといえる。

図-8は、本実験で得られた最高表面温度差 ( $DT_{max}$ ) とその温度差が観察されるまでの加熱時間 ( $t_{max}$ ) との関係を示したものである。図によれば、最高表面温度差と加熱時間との関係は、介在物の種類および埋設深さにかかわらず一定の相関が認められ、一般的に最高表面温度差が大きくなるほどその表面温度差が観察されるまでの加熱時間は短くなり、本実験の範囲では、両者の間に以下に示す実験式が得られた。

$$DT_{max} = 1.84 \times 10^6 \cdot t_{max}^{-3.46} \dots\dots\dots (1)$$

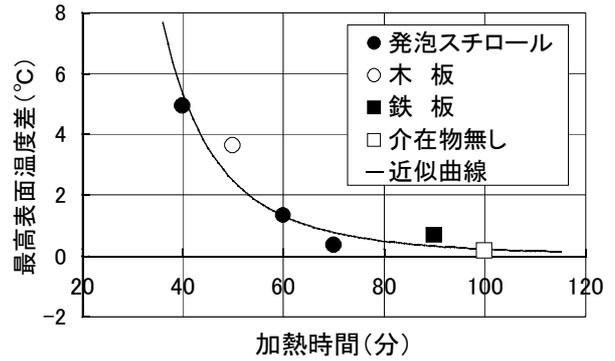


図-8 最高表面温度差とその加熱時間との関係

以上のことから、強制加熱には介在物の種類およびその埋設深さに応じた最適加熱時間が存在し、介在物の埋設深さが深くなるほど長時間の加熱が必要であることがわかる。ただし、長時間加熱し続けると、いずれの試験体も表面温度差は特定の時間を境にして低下に転ずるため、強制加熱時間には介在物の種類およびその埋設深さに応じた注意が必要であるといえる。

#### 4.3 自然冷却時の表面温度差の経時変化

図-9～図-11は、強制加熱を行った後の自然冷却時間中に計測された表面温度差（図中の破線）の経時変化に及ぼす加熱時間の影響を、介在物が発泡スチロール板でその埋設深さがそれぞれ20、40および60mmの場合について示したものである。なお、図中には、110分強制加熱中に観察された表面温度差（図中の●印）も併示してある。これらの図によれば、最高表面温度差が観察される加熱時間よりも早く自然冷却を開始した場合には、冷却開始後しばらくの

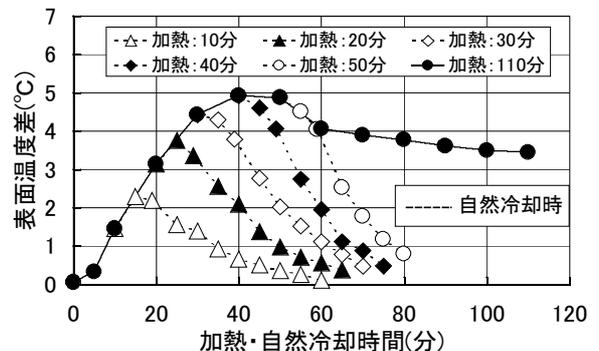


図-9 自然冷却中の表面温度差の経時変化  
(介在物：発泡スチロール板、埋設深さ：20mm)

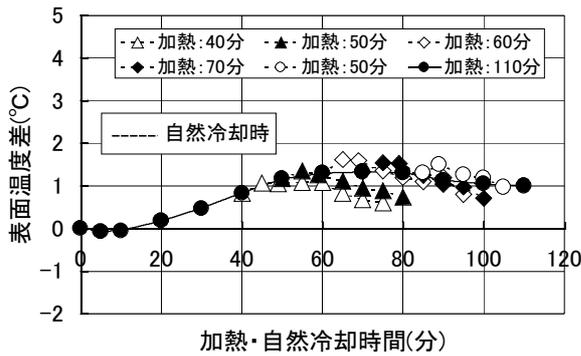


図-10 自然冷却中の表面温度差の経時変化  
(介在物：発泡スチロール板、埋設深さ：40mm)

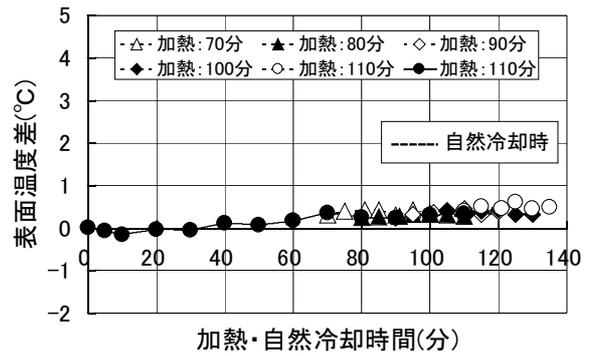


図-11 自然冷却中の表面温度差の経時変化  
(介在物：発泡スチロール板、埋設深さ：60mm)

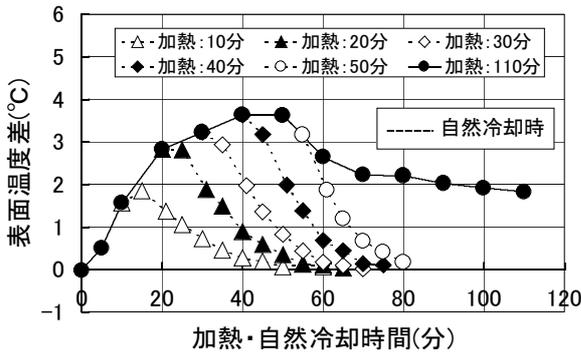


図-12 自然冷却中の表面温度差の経時変化  
(介在物：木板、埋設深さ：20mm)

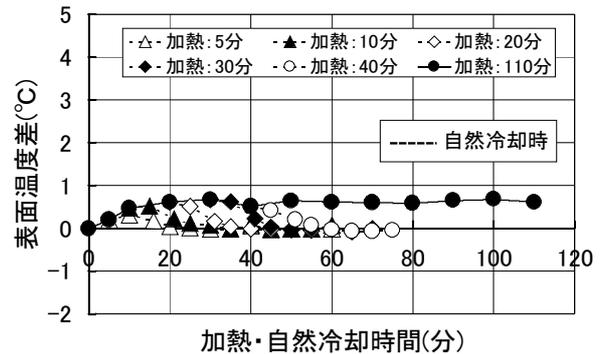


図-13 自然冷却中の表面温度差の経時変化  
(介在物：鉄板、埋設深さ：20mm)

間は時間の経過とともに表面温度差の上昇現象が認められることがわかる。また、その後の時間経過に伴う表面温度差の低下傾向は、自然冷却開始時点での表面温度差が大きいほど著しくなる傾向を示している。

図-12および図-13は、強制加熱後の自然冷却時間中に計測された表面温度差の経時変化に及ぼす加熱時間の影響を、介在物がそれぞれ木板および鉄板の場合（埋設深さ：20mm）について示したものである。図によれば、木板埋設の場合（図-12参照）には、定性的な傾向は上述の介在物が発泡スチロール板でその埋設深さが20mmの場合と同様であるが、熱伝導率の大きい鉄板埋設の場合（図-13参照）には、熱伝導率の小さい発泡スチロール板および木板埋設の試験体のように長時間加熱を行っても強制加熱に伴う表面温度差の上昇が期待できないため、自然冷却時での特徴的な表面温度差の変化傾向は認められず、表面温度差の経時変化は介在物種類により著しく異なった傾向を示している。

以上のことから明らかなように、長時間加熱によって介在物の検出性能は向上するが、本研究で対象とした厚さが100mmのモルタル平板では、最高表面温度差が観察されるまでに40分以上の加熱が必要となるため、合理的な試験要領としては、最高表面温度差が観察される時間以前に加熱を終了し、その後の自然冷却時間中に観察される表面温度差の上昇現象を利用して検出精度の向上を図った方が実用的である。

#### 4.4 実験結果と解析結果との比較

図-14および図-15は、強制加熱およびその後の自然冷却中に観察される表面温度差に関する実験結果と解析結果との比較例をそれぞれ介在物が発泡スチロール板および木板で埋設深さが20mmの試験体について示したものである。これらの図によると、介在物が発泡スチロール板の場合、解析結果は実験結果と比較して若干加熱および冷却に伴う温度変化が著しくなっているが、全体的には実験結果と解析結果とは比較的よく一致しており、本解析手法は妥当であ

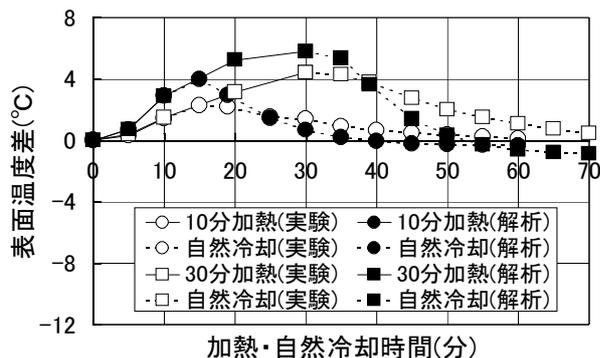


図-14 表面温度差に関する実験結果と解析結果との比較例（介在物：発泡スチロール板、埋設深さ：20mm）

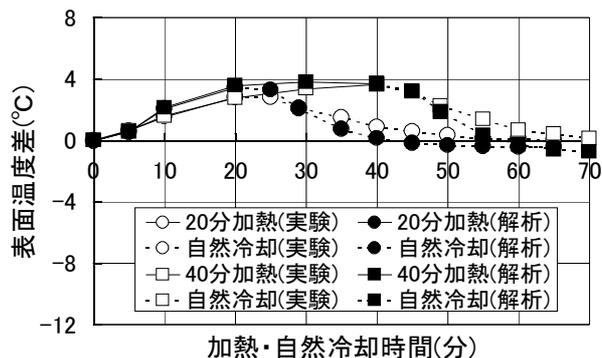


図-15 表面温度差に関する実験結果と解析結果との比較例（介在物：木板、埋設深さ：20mm）

るといえる。なお、解析結果の方が実験結果よりも加熱および自然冷却に伴う温度変化が大きくなった理由の一つとして、本研究では、赤外線ヒータによる加熱効果を相当外気温として取り扱っていることが挙げられる。この点については、今後詳細に検討していく予定である。

## 5. 結論

本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 本実験で用いた赤外線ヒータによる加熱方法は、試験体表面をほぼ均一に加熱することができる。
- 2) 長時間強制加熱を行うことによって介在物の検出性能は向上するが、その検出性能は、介在物の種類およびその埋設深さによって著しく相違する。
- 3) 試験体表面を連続的に加熱すると、介在物の種類およびその埋設深さに応じた時間で最高表面温度差が認められ、長時間加熱し続けると表面温度差は低下に転ずるため、強制加熱時間には注意が必要である。
- 4) 強制加熱を利用した実用的な試験方法としては、10分～20分程度の加熱を行い、その後の自然冷却時間中に観察される表面温度差の上昇現象を利用して検出精度の向上を図った方がよい。

## 謝辞

実験、解析およびデータ整理に際してご助力

を得た愛知工業大学4年生の足立敏秀君、大屋博子さん、角谷雅樹君に対して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 桃木昌子, 山田和夫, 桃木佳子: コンクリートの表面温度に及ぼす内部空隙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.17, No.1, pp.655-660, 1995
- 2) 山田和夫, 桃木昌子: サーモグラフィ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
- 3) 山田和夫, 桃木昌子: サーモグラフィ法を適用した非破壊検査結果に及ぼす日射吸収率の影響に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.868-873, 1996
- 4) 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, Vol.19, No.1, pp.1315-1320, 1997
- 5) 山田和夫, 桃木昌子, 勝見 隆: サーモグラフィ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研究, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.222-227, 1997
- 6) 勝見 隆, 山田和夫: サーモグラフィ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) 安藤秀則, 山田和夫: サーモグラフィ法による内部探査結果の精度向上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.23, No.1, pp.607-612, 2001