

論文 サーモグラフィー法による内部探査結果の精度向上に関する基礎的研究

安藤 秀則*¹・山田 和夫*²

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方法を確立するための基礎的研究として、内部探査結果に及ぼす強制加熱および冷却の影響について一連の検討を行った。その結果、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、その検出性能は日射を利用する場合と同様に介在物の種類および埋設深さの影響を受けること、測定表面に色むらがあってその日射吸収率が部位的に変動している場合には、表面温度分布は介在物よりも測定表面色の部位的変動の影響を敏感に受けること、強制加熱または冷却には最適時間があり、時間の設定に注意が必要であること、などが明かとなった。
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, 強制冷却, 熱伝導解析

1. はじめに

近年、コンクリートの内部探査を目的とした極めて有効な測定方法として、サーモグラフィー法が注目を集めている¹⁾。筆者らも、この点を踏まえて、これまでサーモグラフィー法を適用した硬化コンクリートの内部探査²⁾およびコンクリート打設時の充填性評価³⁾の可能性について一連の検討を行ってきたが、サーモグラフィー法による内部探査結果の信頼性を向上させるためには、日射や水と熱を利用したパッシブな測定だけでなく、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も検討しておく必要があることがわかった。そのため、本研究では、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および冷却の影響について、一連の実験的および解析的検討を行うこととした。なお、強制加熱および冷却の効果については、既に多くの研究成果⁴⁾が報告されているが、本研究のように加熱または冷却時間の影響を含めて検討した研究成果は殆ど報告されていない。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

表-1 実験の概要

種類	介在物		試験体表面色
	埋設深さ(mm)	寸法(mm)	(中央部):(周辺部)
発泡スチロール板	20	縦:100	(打放し):(打放し)
木板	40	横:100	(白色):(黒色)
鉄板	60	(黒色):(白色)	

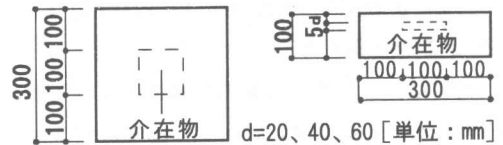


図-1 試験体の形状・寸法

実験の概要を表-1に示す。本実験では、図-1に示すように、寸法100(縦)×100(横)×5(厚さ)mmの種類の異なる介在物が試験体中央の所定の深さに埋設されている寸法300(縦)×300(横)×100(厚さ)mmの平板モルタル試験体を用いて、試験体の表面温度分布状況と介在物の埋設深さおよび測定表面の色むらとの関係について調査を行った。なお、実験の要因および水準としては、表-1に示すように、介在物の種類(発泡スチロール板、木板および鉄板の3水準)、埋設深さ(20, 40および60mmの3水準)、測定表面の

* 1 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)

* 2 愛知工業大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

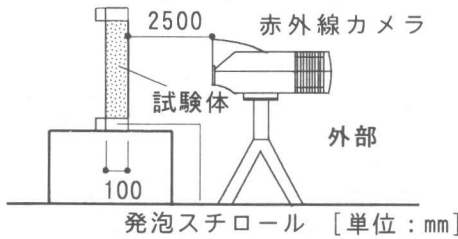


図-2 計測システム

測定温度範囲	-40°C~300°C
赤外線検出器	MCT単素
検出波長領域	8~12μm
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°C
検出スピード	約15フレーム/秒

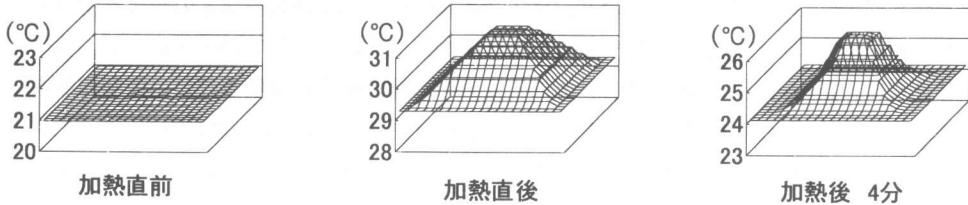


図-3 強制加熱後の表面温度分布の経時変化の例 (介在物:発泡スチロール板,埋設深さ:20mm)

色むら (一様な打放し面, 並びに介在物の埋設部と非埋設部の表面色をそれぞれ白色と黒色および黒色と白色に設定した場合の合計3水準), 試験体表面に温度変化を与えるための強制熱源 (赤外線ストーブによる強制加熱およびスポットクーラによる強制冷却の2水準) を取り上げた。

2.2 計測・処理方法

本実験は, 全て愛知工業大学構造・材料実験室内で行った。計測は, 図-2 に示すように, 試験体側面を発泡スチロールで断熱した後に赤外線カメラを試験体の正面2.5mの位置に設置し, 試験体表面を所定時間強制的に加熱 (赤外線ストーブを試験体表面から22cmの位置にセットし, 表面温度にむらが生じないように赤外線ストーブを左右に連続的に移動(1往復8秒の割合で30往復の合計4分間)させて加熱) または冷却 (表面温度にむらが生じないようにスポットクーラを試験体表面から10cmの位置にセットして試験体表面に冷風を10分間当てて冷却) した直後から開始し, 試験体の表面温度を強制加熱の場合は25分間 (経過時間が5分までの間は1分毎, 5~15分の間は2分毎, その後は5分毎), 強制冷却の場合は20分間 (経過時間が4分までの間は30秒毎, 4~8分の間は1分毎, その後は2分毎) 測定

した。本実験で用いた赤外線カメラ (TVS-2000 MKII LW) の性能を表-2 に示す。なお, 本計測では, 赤外線放射エネルギーから温度を評価する際, 試験体表面色に依存する放射率の変化を無視し, 放射率を一定 ($\epsilon=0.98$) として取り扱ったため, 実際の表面温度と赤外線カメラによって測定された表面温度とは, 測定表面色に応じて微妙に相違していることになるが, この点に関する検討は, 別の機会に行うことにする。

図-3 は, 強制加熱後に測定を行った試験体の表面温度分布の経時変化の一例であるが, 本研究では, 測定結果の対称性を考慮して表面温度に別報と同様^{2,3)}の平均化処理を施した。

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図-4 に示す1/4解析モデルを使用し, 8節点アイ

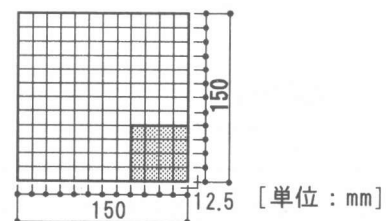


図-4 解析モデル (視点: 上面)

表-3 解析に用いた構成材料の熱的特性

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

[注]*: 外壁面、中間層および内壁面の値。

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²⁾を行った。解析に用いた各構成材料の熱的特性を表-3に示す。なお、熱源との境界面は熱伝達境界とし、日射がある場合は更に熱流束境界として取り扱った。

4. 実験結果とその考察

4.1 強制加熱および冷却方法の検討

本実験に先立ち、予備実験として赤外線ストーブによる加熱方法、並びにスポットクーラによる冷却方法について適用性の検討を行った。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ストーブによって強制加熱した場合の試験体表面中央部（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の範囲における平均表面温度）および中央部と周辺部（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（試験体側面から中心に向かって1.5cmの範囲における平均表面温度）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0.3℃程度と後述の介在物が埋設されている場合と比較して小さくなっており、本研究で採用した赤外線ストーブによる加熱方法は、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。なお、本実験で採用した赤外線ストーブによる加熱により、加熱直後の試験体表面温度は、室温（20℃）と比較して約10℃の温度上昇が認められた。また、図-6は、介在物が埋設されていない打放し表面試験体をスポットクーラに

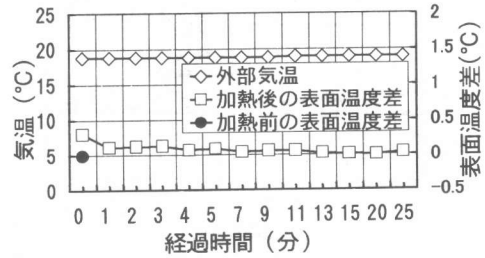


図-5 加熱方法の検討結果（介在物：なし）

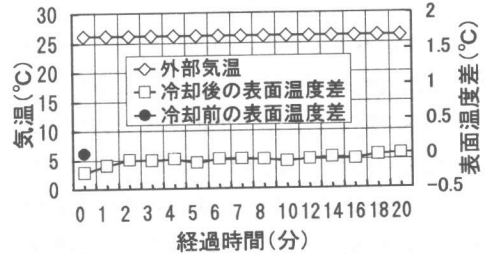


図-6 冷却方法の検討結果（介在物：なし）

よって強制冷却した場合の結果を示したものであるが、前述の強制加熱の場合と同様に、本研究で採用したスポットクーラによる冷却方法は、試験体表面をほぼ均一に冷却でき、コンクリートの内部探査を目的とした冷却方法として有効であるといえる。なお、本実験で採用したスポットクーラによる冷却により、冷却直後の試験体表面温度は、室温（25℃）と比較して約3℃の温度低下が認められた。

4.2 強制加熱を利用した内部探査

図-7～図-9は、強制加熱後の打放し表面試験体の表面温度差の経時変化に及ぼす介在物種類の影響を埋設深さ別に示したものである。まず埋設深さが20mmの結果を示した図-7に

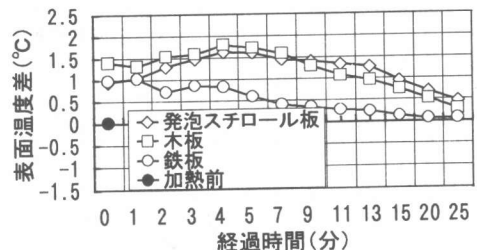


図-7 表面温度差の経時変化に及ぼす介在物の影響（埋設深さ：20mm）

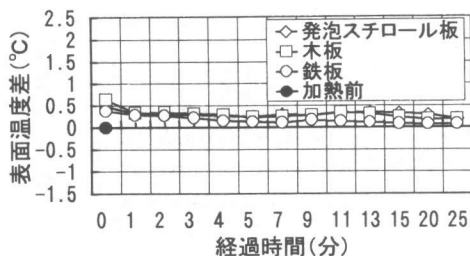


図-8 表面温度差の経時変化に及ぼす介在物の影響 (埋設深さ: 40mm)

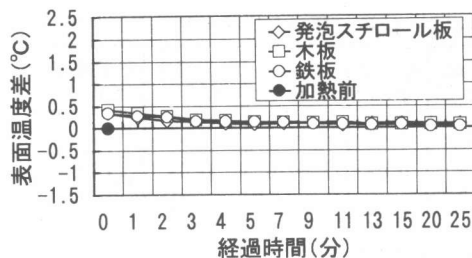


図-9 表面温度差の経時変化に及ぼす介在物の影響 (埋設深さ: 60mm)

よれば、熱伝導率の小さい発泡スチロール板および木板埋設の表面温度差は、加熱後徐々に増大して4~5分経過した時点で最高値(発泡スチロール板埋設の場合が1.6°C、木板埋設の場合が1.8°C)が観察されるが、熱伝導率の大きい鉄板埋設の場合には、加熱後約1分で表面温度差は最高値(1.0°C)を示している。その後は、いずれの試験体も表面温度差は徐々に低下していく傾向を示すが、その低下傾向は熱伝導率の小さい発泡スチロール板や木板埋設の試験体よりも熱伝導率の大きい鉄板埋設の試験体の方が大きくなっており、表面温度差の経時変化は、埋設物の種類によって著しく相違しているのがわかる。これに対して、介在物の埋設深さが40mmおよび60mmの場合は、図-8および図-9から明らかなように、最高表面温度差は、いずれの試験体も加熱直後に観察され、介在物の埋設深さが40mmの場合が0.4~0.6°C、60mmの場合が0.3~0.4°Cと介在物種類による相違は比較的小さく、表面温度差の経時変化に及ぼす介在物種類の影響も埋設深さが20mmの場合と比較して極めて小さくなっている。図-10は、強

制加熱後に観察された最高表面温度差と介在物の埋設深さとの関係を介在物種類別に示したものであるが、埋設深さが40mm以上になると最高表面温度差が著しく小さくなり、熱伝導率の小さい発泡スチロール板や木板であっても介在物の検出が困難になることがわかる。特に、埋設深さが60mmの場合には、最高表面温度差が介在物種類に関わらず前述の介在物が埋設されていない場合と殆ど相違がなく、今回の実験で用いた4分間の加熱では、介在物の検出が不可能となっている。この点に関しては、4.4節で若干の考察を加えることにする。

図-11は、発泡スチロール板埋設の試験体で観察された最高(または最低)表面温度差と介在物の埋設深さとの関係を試験体表面色別に示したものである。図から明らかなように、観察された最高表面温度差は、介在物埋設部よりも非埋設部の日射吸収率の方が小さい場合(それぞれ黒色と白色)には、埋設深さに関わらず打放し表面試験体の場合と比較して0.4~0.5°C大きくなっているが、逆に埋設部よりも非埋設部の日射吸収率の方が大きい場合(それぞれ白色

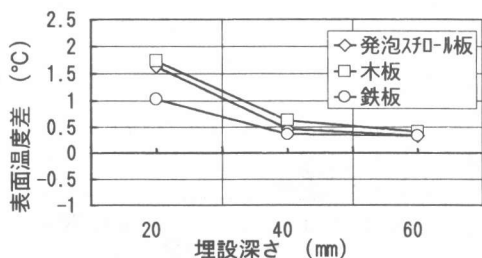


図-10 加熱後の最大表面温度差と埋設深さとの関係に及ぼす介在物種類の影響

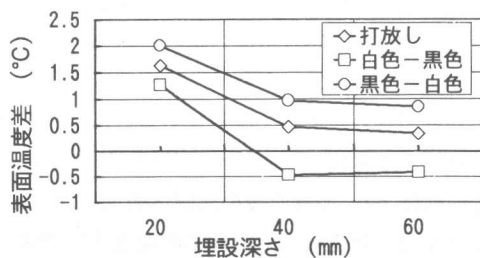


図-11 加熱後の最大表面温度差と埋設深さとの関係に及ぼす測定表面色の影響

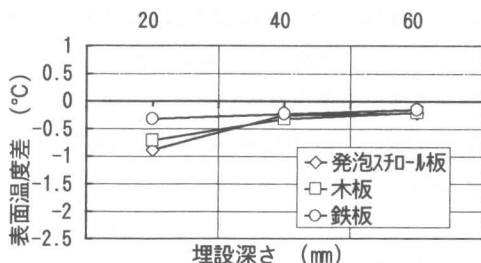


図-12 冷却後の最小表面温度差と埋設深さとの関係に及ぼす介在物種類の影響

と黒色)には、逆に小さくなっている。特に、介在物の埋設深さが40mm以上になると、表面温度は非埋設部よりも埋設部の方が小さく(負値)になっており、表面温度差の計測だけでは、介在物の検出が不可能であることがわかる。

4.3 強制冷却を利用した内部探査

図-12は、打放し表面試験体を強制冷却した後、観察された最低表面温度差と介在物の埋設深さとの関係を介在物種類別に示したものである。本実験では室温から-3°C程度の冷却であったが、図によれば、介在物の埋設深さが20mmの試験体の最低表面温度差は、発泡スチロール板の場合が-0.88°C(冷却後3分)、木板の場合

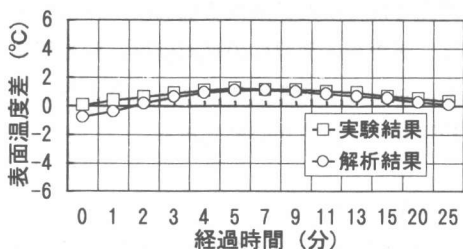


図-13 表面温度差に関する実験結果と解析結果との比較(白色-黒色)

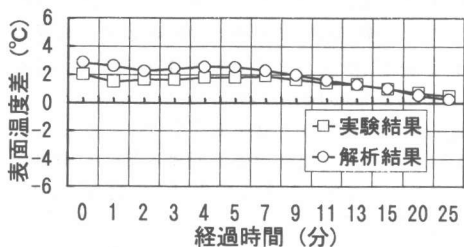


図-14 表面温度差に関する実験結果と解析結果との比較(黒色-白色)

が-0.71°C(2分30秒)および鉄板の場合が-0.32°C(30秒)となっており、10分程度の冷却時間を設定すれば、液体窒素やアルコールなどを利用した冷却方法を用いなくても介在物の検出が可能であることがわかる。ただし、介在物の埋設深さが40mm以上になると、本実験で用いた冷却方法では検出が不可能であるといえる。

4.4 強制加熱・冷却に関する若干の考察

図-13および図-14は、強制加熱を受けた場合の表面温度差に関する実験結果と解析結果との比較を、介在物埋設部と非埋設部の表面がそれぞれ白色と黒色および黒色と白色にペイントされている試験体について示したものである。これらの図によると、試験体表面が部分的に色分けされている場合であっても、実験結果と解析結果とは比較的よく一致していることがわかる。そのため、以下では本解析手法を用いて行った数値実験により、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および冷却の効果について若干の考察を行うことにする。

図-15および図-16は、試験体表面を本実験で用いた赤外線ストーブに対応した相当外気温

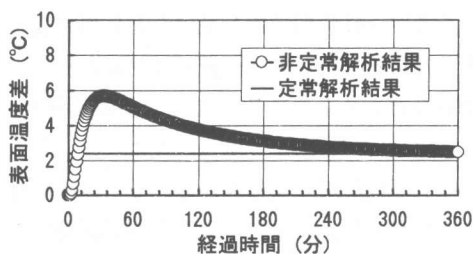


図-15 継続加熱時の表面温度差の経時変化(介在物:発泡スチロール板)

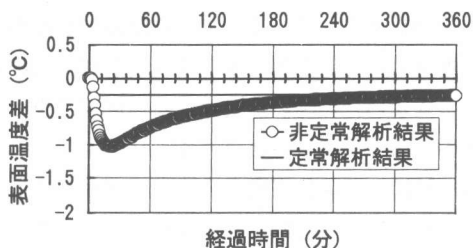


図-16 継続加熱時の表面温度差の経時変化(介在物:鉄板)

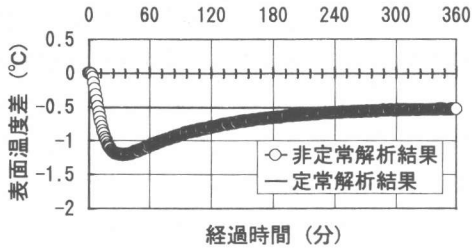


図-17 継続冷却時の表面温度差の経時変化
(介在物：発泡スチロール板)

(60°C, ただし試験体背面の気温は20°Cとした)で加熱し続けた時の表面温度差の経時変化を埋設深さが20mmで介在物がそれぞれ発泡スチロール板および鉄板の場合について示したものである。これらの図によれば、介在物が発泡スチロール板および鉄板の場合の表面温度差は、いずれも加熱時間が20~30分程度までの範囲では単調増大(または低下)して最高(または最低)表面温度差(それぞれ約5および-1°C)を示し、その後表面温度差の増減傾向が逆転して次第に定常解析結果に収束していく傾向を示している。また、加熱の対象がコンクリートの場合、介在物の種類に関わらず最高(または最低)表面温度差を示すまでに20~30分程度の時間が必要であるが、長時間加熱し続けると表面温度差は小さくなるため、加熱時間には注意を払う必要があるといえる。本実験では、加熱時間を4分に設定したが、図から明らかのように、この時点は表面温度差の変化が最も著しい段階にあったことがわかる。なお、最高表面温度差は、介在物の熱伝導率の大きいものほど小さくなっており、特に介在物が鉄板の場合には、介在物埋設部の表面温度が非埋設部よりも低くなる逆転現象が認められる。従って、強制加熱を利用する場合も、日射を利用する場合と同様に熱伝導率の大きい介在物の探査は、熱伝導率が小さいものに比べて難しいといえる。

図-17は、試験体表面を本実験で用いたスポットクーラに対応した相当外気温(17°C, ただし試験体背面の気温は25°Cとした)で冷却し続けた時の表面温度差の経時変化を介在物が発泡

スチロール板で埋設深さが20mmの場合について示したものである。この図によれば、定性的な傾向は前述の強制加熱の場合と同様であり、冷却時間が30分程度の時点で最低表面温度差(-1.2°C)が観察される。

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ストーブによる加熱方法およびスポットクーラによる冷却方法は、試験体表面をほぼ均一に加熱および冷却することができる。
- 2) 強制加熱および強制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、その検出性能は、介在物の種類および埋設深さの影響を著しく受ける。
- 3) 試験体表面に色むらがあって日射吸収率が部位によって変動している場合の表面温度分布は、介在物よりも測定表面の日射吸収率の変動の影響をより顕著に受ける。
- 4) 試験体表面を連続的に加熱または冷却すると、介在物の種類および埋設深さに応じた時間で最高または最低表面温度差が認められ、その後表面温度の絶対値は時間の経過とともに低下するため、強制加熱または冷却時間には注意が必要である。

参考文献

- 1) コンクリートの非破壊試験法研究委員会：コンクリートの非破壊試験法に関する技術の現状，日本コンクリート工学協会，pp.1-243，1992
- 2) 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
- 3) 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
- 4) コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会：委員会報告書Part II 電磁波法，日本コンクリート工学協会，pp.83-183，2001