

# 論文 温度解析に基づいたサーモグラフィー法によるコンクリート中の空隙および斜めひび割れの検査方法に関する基礎的研究

高羅 信彦<sup>\*1</sup>・魚本 健人<sup>\*2</sup>

**要旨:**近年、サーモグラフィー法によるコンクリートの欠陥探査が注目されている。しかしながら現状では、測定条件が検査結果に与える影響は内部の欠陥状態により多種多様であり、これらの基礎的な関係を調べる必要がある。そこで本研究では、空隙および斜めひび割れを導入した供試体について熱照射を行い、その温度分布変化を調べた。またFEM温度解析を行い実験結果との比較検討をおこなって、欠陥状態が温度分布の測定結果および最適な測定条件に与える影響を調べた。

**キーワード:**サーモグラフィー法、非破壊検査、欠陥評価、内部空隙、斜めひび割れ

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の維持管理の重要性が高り、欠陥探知技術の向上が望まれている。現状では、コンクリート構造物の点検は主に目視で行われているため、より高精度の方法としてコンクリートの非破壊検査が注目を浴びている。

非破壊検査手法の一つに赤外線カメラを利用したサーモグラフィー法がある。サーモグラフィー法とは、欠陥部、健全部における熱伝導の差異を利用したものであり、従来コンクリート表面の温度分布のみに着目し検討しているケースが多く、欠陥の存在個所を定性的に判断するなどの概略調査に用いられる程度であり、定量的評価する手法については検討が不十分であった。込山、谷川<sup>1),2)</sup>は外壁仕上げモルタルの剥離について様々な測定条件や剥離状況を想定し解析的検討を行ってサーモグラフィー法の適用限界を明らかにしている。これに対し本研究は、近年話題になっているトンネル内、覆工コンクリートのひび割れや内部空隙といった欠陥探知へのサーモグラフィー法の適用性について実験的、解析的に検討を行ったものである。

本論文では熱拡散理論に基づいたサーモグラフィー法の効率的な試験法の確立を最終的な目的とし、FEM温度解析ソフト(マスコンクリートの温度・応力計算用パソコンプログラム:JCI)を用いて、欠陥を有するコンクリート内部の温度分布の解析を行い、実験結果との比較を行った。

## 2. コンクリート内部空隙の影響

### 2.1 空隙モデル供試体の作製方法

表-1に作製したAEコンクリートの配合を示す。また実験には、図-1に示すような深さ3cmの位置に厚さ2cmの直方体空隙を導入した。寸法10×10×40cmの角柱供試体を用いた。なお、図-1に示すように空隙は供試体断面を貫通していないものとした。

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
	W	C	S	G	Adm.
55	160	290	868	989	0.73

### 2.2 実験方法および用語の定義

図-1に示した供試体の加熱面以外の5面を発砲スチロール系特殊断熱材にて覆い、断熱状

\*1 千葉工業大学大学院 工学系研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 東京大学教授 国際・産学共同研究センター 工博 (正会員)

態を作り、遠赤外線ストーブを用いて、測定距離を30cmとしてコンクリート表面を均等に加熱した。なおコンクリートの初期温度は25度一定とした。測定時間は加熱開始から0, 5, 15, 30, 60分とした。測定機器は表-2に示す仕様の赤外線熱画像装置を使用した。測定面は、加熱面(この面に生じる温度を表面温度と定義する)と深さ方向断面(この面に生じる温度を内部温度と定義する)における面の二種とした。深さ方向における温度分布の測定方法には、測定時間に達したらすばやく断熱材をはずし撮影する方法を採用した。

## 2.3 実験結果

図-2に内部空隙を有するコンクリートの内部および表面の温度分布の経時変化を示す。温度レンジは初期温度25度を0度とし、そこから加熱し上昇した温度により表記する。測定結果は既往の研究で確認されているとおり下面に空隙が存在する部分は健全部と比較して温まりやすく、コンクリート表面に温度分布が一様に生じるという傾向と一致している。その程度は、10分の加熱で生じる空隙部のコンクリート表面温度に対して健全部では75%程度の温度である。次にコンクリート内部温度分布について着目すると、空隙の上部の領域がほかの領域よりも温度が高く、表面の温度分布と同様の傾向を示していることが分かる。

## 2.4 FEM 温度解析 2.4.1 解析条件

FEM 温度解析は JCI のマスコンクリートの温度・応力計算用パソコンプログラムを使用し、コンクリートの深さ方向における温度解析を行った。コンクリートの表面の温度分布は深さ方向における温度解析により算出された表面の温度を二次元化し表した。

解析モデルを図-3に示す。解析モデルは実験に使用したものと同じ、深さ3cmの位置に空

表-2 赤外線熱画像装置の仕様

最小検出温度差	0.025°C
測定精度	フルスケールの±0.4%
検出素子	水平320×垂直240
観測測定範囲	-40°Cから1200°C
フレームタイム	60フレーム/秒

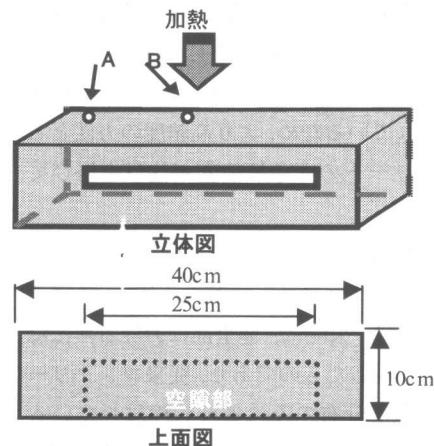


図-1 空隙モデル供試体の概略図

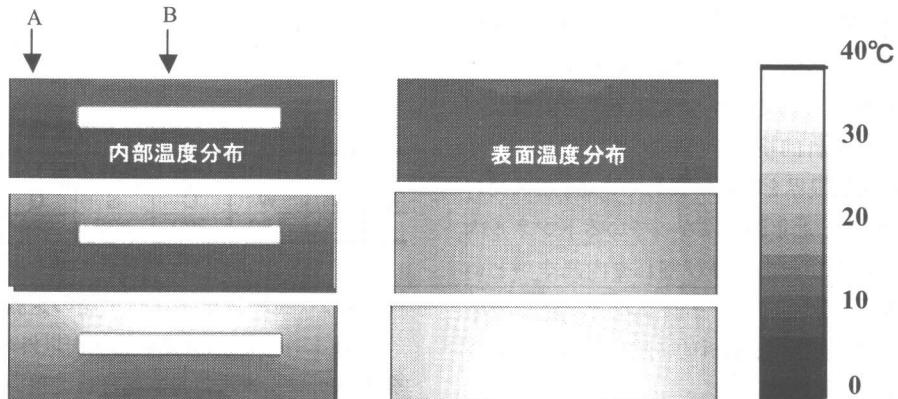


図-2 空隙を有する場合の表面温度と内部温度の分布(実験結果)

隙を有する断面  $10 \times 40\text{cm}$  の 2 次元コンクリートとした。要素数 1410、接点数 794 とした。境界条件は加熱面を対流境界とし、空隙も含めそれ以外の部分は断熱境界とした。物性値は既往の研究<sup>3)</sup>を参考にして、表-3 のように設定した。なお境界に与える熱量は、サーモグラフィー法を用いる場合の新しい解析手法の提案を前提としていることから、本論文においては実験値と解析値が一致するように熱量を設定した。

#### 2.4.2 解析結果

図-4 に解析により得られたコンクリート表面および内部の温度分布を示す。図より経時に空隙の上部の領域が他の領域よりも温度が高く、一様な温度分布を示していくことがわかる。加熱 5, 30, 60 分後と時間を追うごとにコンクリート表面の健全部 A と欠陥部 B の温度差は顕著に表れ、特に 60 分後においては健全部と空隙部の表面温度差は  $15^{\circ}\text{C}$  程度となることが分かる。

次に図-2 の実験結果と図-4 の解析結果について比較した。図より空隙モデル供試体は貫通していないということを考慮すると表面および内部の温度分布は経時変化においてもほぼ一致していることが分かる。これよりコンクリートに空隙が存在する場合、深さ方向において空隙モデルを作成し、温度解析を行うことで任

意のコンクリート表面に生じる温度分布をあらかじめ予測できるという知見を得ることができた。

図-5 には空隙の上部 B 点と健全部の A 点におけるコンクリートの表面温度差の経時変化を示した。図より今回の解析方法でいくと深さが  $3\text{cm}$  程度の場合加熱開始から約 10 分経過すれば健全部 A 点と空隙の上部 B 点には  $3^{\circ}\text{C}$  程度の温度差が生じる。本実験に使用した赤外線熱画像装置の最小温度検出範囲は  $0.025^{\circ}\text{C}$  であり、理論上は加熱開始 30 秒程度でも空隙の有無は

表-3 解析に使用した物性値<sup>3)</sup>

比熱 ( $\text{kcal/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )	0.22
熱伝導率 ( $\text{kcal/mm} \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )	$2.5 \times 10^{-3}$
密度 ( $\text{kg/mm}^3$ )	$2.4 \times 10^{-6}$

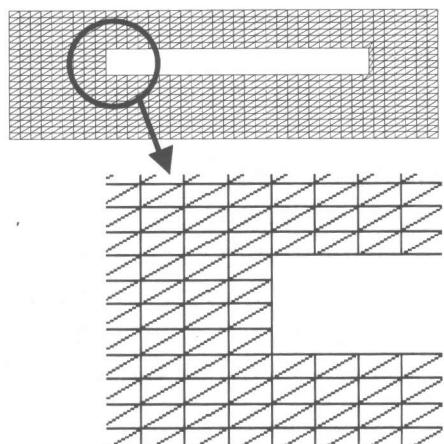


図-3 空隙の解析モデル

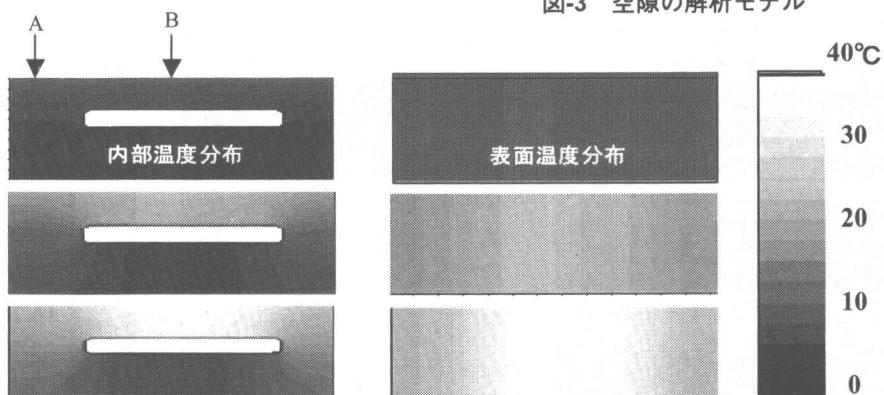


図-4 空隙を有する場合の表面温度と内部温度の経時変化(解析結果)

検出することができる。しかしながら均等にコンクリート表面を加熱することは、非常に困難であり、実現場への適用を考えた場合、少なくとも2~3°Cの温度差が生じる程度が良いのではないかと考えられる。これらのことからサーモグラフィー法の解析手法に本研究で用いた解析を利用することで事前に最適な測定時間を予測することは実測上有用であると考えられる。現在、実現場においては経験的に熱源の照射時間等が決められており、必ずしもそれぞれの欠陥部に適した測定時間が採用されていないのが現状である。しかし欠陥部が空隙である場合においては、以上の概念を採用することで、より効率的な作業を行うことができる。

なお今回の研究においては、サーモグラフィー法の新しい解析手法の提案ということを前提としているため、空隙の厚さ、大きさの検出には着目しておらず、今後の課題として既往の研究<sup>4)</sup>を参考にして定量化をする必要がある。

### 3. 斜めひび割れの影響

#### 3.1 モデル供試体の作製方法

斜めひび割れ供試体を図-6に示す。供試体は、空隙モデルと同じ配合を用いて10×10×40cmの型枠に打設後、厚さ2mmの鋼板を差込み12時間後に抜きとりひび割れ角度35度を有するAEコンクリートを作製した。

### 3.2 実験方法

加熱条件、断熱状態、撮影方法はすべて2.2に示した空隙モデル供試体と同一の方法により実験を行った。

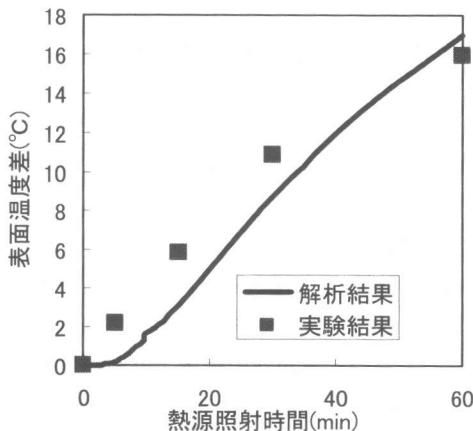


図-5 斜めひび割れを有するコンクリートの表面温度差と熱源照射時間の関係

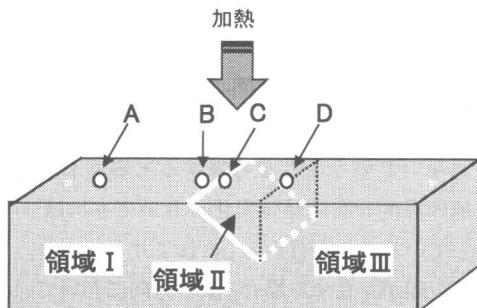


図-6 斜めひび割れ供試体の概略図

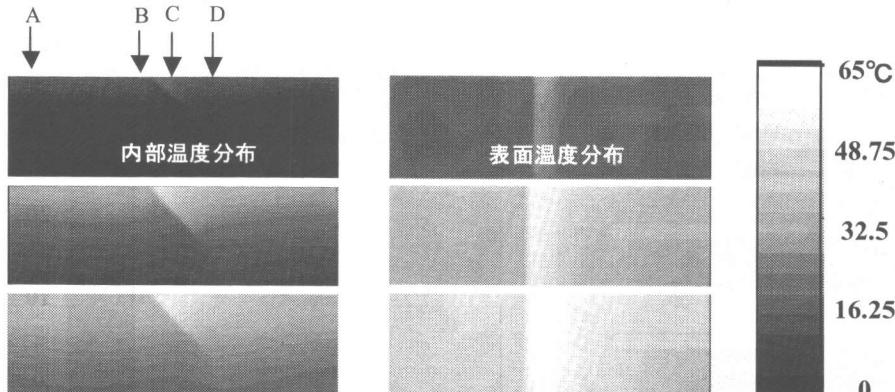


図-7 斜めひび割れ有する場合の表面温度と内部温度の経時変化（実験結果）

### 3.3 実験結果

図-7はコンクリートの内部および表面の温度分布の経時変化を示す。温度のレンジは初期温度25度を0度とし、そこから加熱し上昇した温度により表記する。

図より斜めひび割れの生じている場合、領域Ⅱのコンクリート温度がほかの領域よりも相対的に高いことが分かる。その程度は60分後のC点とA点において10°Cの温度差が生じた。またコンクリート表面の温度分布においてはC点～D点の順に連続的な温度分布が生じるのに対して、B点からA点に対しては連続的な温度分布が生じにくいことが実験的に明らかになった。これよりコンクリート内部に空隙が水平に存在する温度分布とは、明らかに異なる形態をとっていることが分かる。

### 3.4 FEM 温度解析

#### 3.4.1 解析条件

解析のモデルを図-8に示した。図より斜めひび割れモデルでは、ひび割れ角度は実験用供試体と同じ35度とし、ひび割れの頂点が加熱面の真下にくるようにした。ひび割れ角度35度のモデルは要素数1546、節点数855とした。境界条件は加熱面を対流境界とし、ひび割れ部及び外周部は断熱境界とした。解析に用いた物性値および熱量は、空隙モデルと同様の値を用いた。

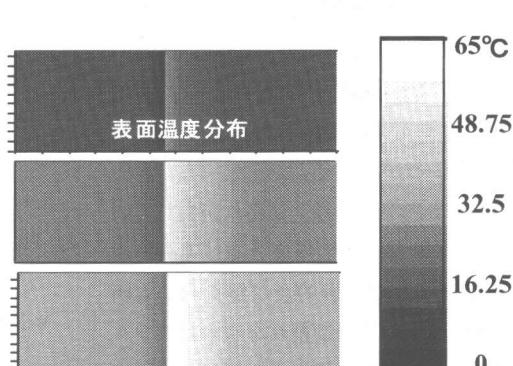
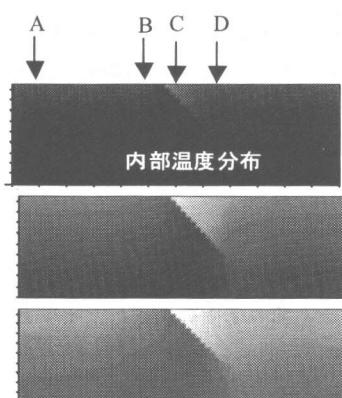


図-9 斜めひび割れ有する場合の表面温度と内部温度の経時変化（解析結果）

### 3.4.2 解析結果

図-9に解析により得られたコンクリート表面および内部の温度分布を示す。図より照射時とともに部材の薄い領域Ⅱにおいてコンクリート内部の温度が他の領域よりも高いことが分かる。またコンクリート表面部の温度分布においても領域Ⅱの温度が高いことが分かる。コンクリート表面の温度分布にはC点からD点の方向およびB点からA点の方向に温度変化が生じることが解析的に明らかとなった。

次に図-7の実験結果と図-9の解析結果について検討を行う。図より最も部材の薄いC点においては温度が解析結果の方が高いが、健全部であるA点においては低いとなった。特に測定材齢とともに、その差は顕著に表れている。その原因是、今回の解析の境界条件として斜めひ

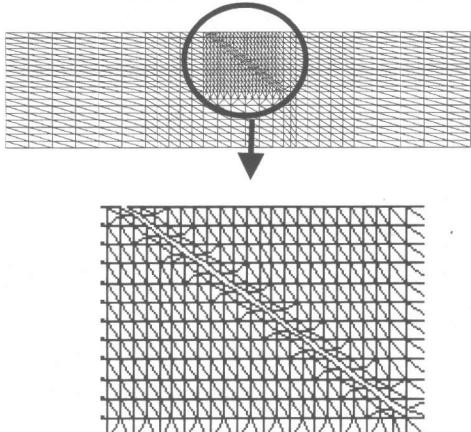


図-8 斜めひび割れの解析モデル

び割れの内部は断熱状態であるという仮定をしているためである。このため実験においてはひび割れ部分においても熱の出入りがあり領域Ⅰと領域Ⅱの境界の温度差が解析と比べ小さいという結果になっている。

次に図-10に斜めひび割れ上部のコンクリート表面のC点と健全部のA点におけるコンクリートの表面温度差の経時変化を示す。図より今回の測定条件においては、5分程度で7°C差となり今回の測定条件においては、ひび割れの有無を検出に関しては、5分程度あれば十分であり、本解析手法を用いることで事前に最適な測定時間を事前予測できるという知見を得ることができた。しかしながら経時と共に実験表面温度差は解析値が実験値を上回ることが分かる。その原因は上述の、ひび割れ部においても熱の出入りが存在するためであると考えられ、今後はひび割れ幅等も考慮した熱の伝達程度を境界条件として与えることについて検討する必要がある。

#### 4.まとめ

本研究により得られた知見および提案を以下に示す。

- 1) サーモグラフィー法の新しい解析手法として、コンクリート内部の温度解析を行い表面の温度分布を算出する方法を提案する。
- 2) サーモグラフィー法によりコンクリートの空隙部を検出する場合、本研究により提案した解析手法を用いることで、あらかじめコンクリート表面に生じる温度分布を予測することが可能であり、また測定条件に応じた最適な測定時間を決定することができる。
- 3) コンクリート内部に斜めひび割れが生じている場合、その欠陥部の表面温度分布は連続的な温度差が生じることが実験的及び解析的にも明らかとなった。また斜めひび割れを有するコンクリートにおいて、本研究で提案する解析方法を採用する場合、ひび割れ部における熱の伝達程度を境界条件として与える必要がある。

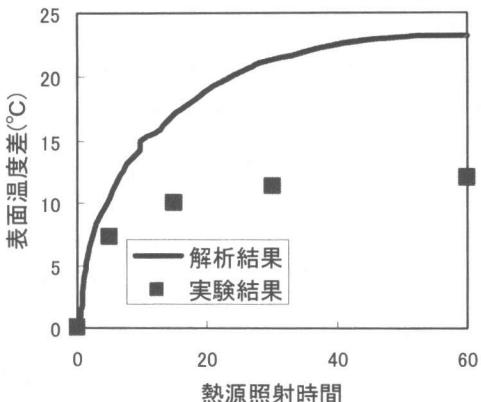


図-10 斜めひび割れを有するコンクリートの表面温度差と熱源照射時間の関係

#### 謝辞

本研究は東京大学生産技術研究所 第五部魚本研究室にて行ったものであり、同研究室の皆様にご協力を頂いたことに感謝の意を表します。また、実験、解析において多大なるご指導を頂きました(株)大林組技術研究所 平田隆祥氏ならびに東京大学大学院 蔵重勲氏には深甚の謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 辻山貴仁・谷川恭雄：スマージング技術を用いた熱画像シミュレーションによるサーモグラフィー法の適用限界に関する解析的研究、コンクリート工学論文集 vol.8, No.1, pp.95-107, 1997
- 2) 辻山貴仁・谷川恭雄：赤外線映像装置の特性と外界ノイズがサーモグラフィー法の信頼性に及ぼす影響、コンクリート工学論文集 vol.8, No.1, pp.109-120, 1997
- 3) 田澤栄一・佐伯昇：コンクリート工学、微視構造と材料特性、技術堂出版, 1998
- 4) 川瀬貴行・鎌田敏郎ら：サーモグラフィによる鋼・コンクリート間の空隙の評価、土木学会論文集 V-123, 1998