

# 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の検査方法に関する基礎的研究

Inspection Method for Internal Void in Concrete by Thermography Based on Thermal Analysis

高 羅 信 彦\*・魚 本 健 人\*\*

Nobuhiko TAKARA and Taketo UOMOTO

## 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。

その結果、コンクリート内部に空隙が存在する場合、内部の温度解析を行い表面の温度分布を算出することで、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るということが明らかとなった。またその結果を利用することにより最適測定時間が予測することが可能であるということがわかった。空隙の存在する深さが浅いほ

ど、空隙の上部のコンクリート表面温度と健全部の温度の差が大きくなることが解析により明らかとなった。コンクリート表面より空隙の位置が深いところに存在する空隙を検知する場合、与える熱量を大きくすることにより検出が可能になるということが解析より明らかとなった。

## 2. 実験概要および実験結果

### 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。寸法は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> ) |     |     |     |
|---------|--------------------------|-----|-----|-----|
|         | WC                       | C   | S   | G   |
| 55      | 160                      | 290 | 868 | 989 |

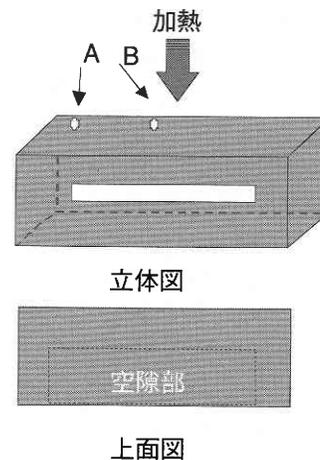


図1 空隙モデルの概略図

\*千葉工業大学大学院

\*\*東京大学国際・産学共同研究センター

2.2 実験方法

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、断熱状態状態に作り、遠赤外線加熱装置を用いてコンクリート表面を均等に加熱した。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、加熱面と深さ方向断面における面の二種とした。深さ方向におけるコンクリート内部の温度分布の測定方法には、測定時間に達したらず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60分後の表面温度を最大、初期温度を最小値とする相対温度により表現している。測定結果は既往の研究<sup>1)</sup>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極めて温まりやすいことがわかる。さらに、下面に空隙が存在している領域の温度分布は、ほぼ一定である傾向も既往の研究と一致している。その程度は60分の加熱で生じる空隙部の上面のコンクリート表面温度(点A)に対して健全部(点B)では75%程度の温度である。

次にコンクリート内部の温度分布について着目すると、

表2 赤外線画像装置の仕様

|         |              |
|---------|--------------|
| 最小検出温度差 | 0.025℃       |
| 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℃から1200℃  |
| フレームタイム | 60フレーム/秒     |

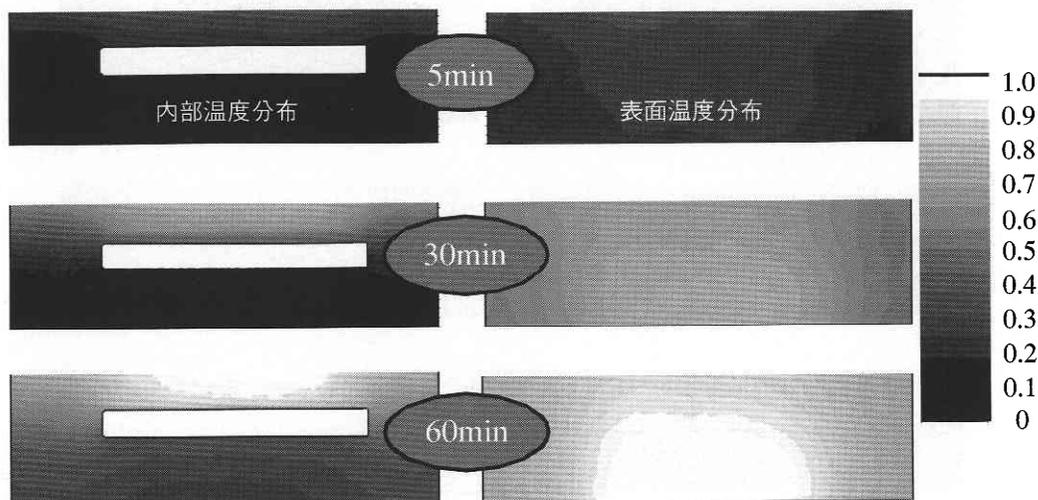


図2 内部空隙を有する供試体の表面温度と内部温度の分布変化 (実験結果)

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。

3. FEM 温度解析

3.1 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のと同じ、深さ3cmおよび1.5, 6.0, 9.0cmの位置に空隙を有する断面10×40cm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

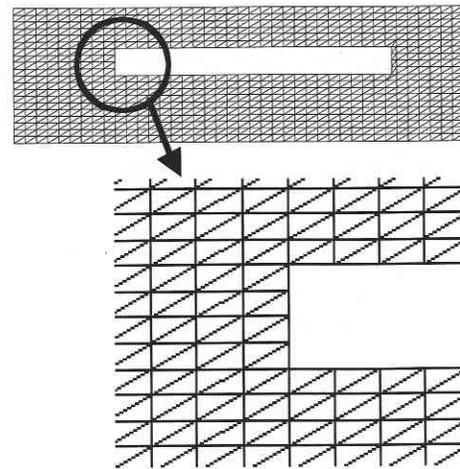


図3 空隙の解析モデル<sup>3)</sup>

研究速報

流境界とし、空隙も含めそれ以外の部分断熱境界とした。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。

3.2 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。図よりコンクリート表面の温度分布は経時的に空隙の上部の領域が他の領域よりも温度が高く、中心部より一様な温度分布を示していくことがわかる。特に加熱60分後における健全部の温度は空隙部の温度に対して75%程度にしかならないことが分かる。また内部の温度に着目すると、表面だけではなくコンクリート内部においても空隙部と健全部の境目のところで急激な温度差が生じていることが解析的に明らかとなった。

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。コンクリート表面の温度分布が解析および実験において多少異なる理由として、解析の表面温度分布は内部温度分布の解析結果の1次元データを、全表面に対して適用して2次元表示したものであるため、実験供試体と

は異なり空隙は貫通しているとしたためである。

図5には空隙の上部中央のコンクリート表面部B点と健全部の端部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。図より今回の解析条件においては、測定時間が120~150分程度でコンクリート空隙の上部と健全部の温度差が最大となりほぼ一定となることが、解析的に分かった。つまり図5に示す120~150分の区間において欠陥部の検出が容易となり、サーモグラフィー法を用いる場合の最適な測定時間帯であると判断できる。今回は遠赤外線加熱装置を用いたため最適の測定時間120~150分かかることになるが、これは熱源の種類やモデルによって大きく変化する。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予想できる。

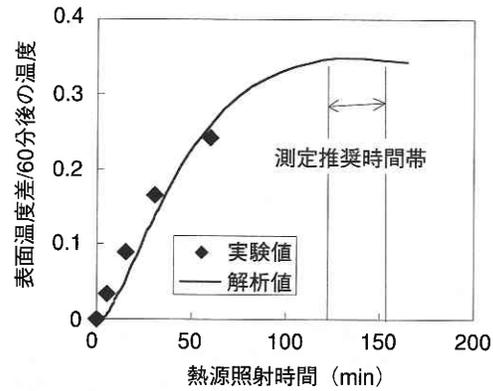


図5 空隙を有するコンクリートの表面温度差と熱源照射時間の関係 (深さ3 cm)

表3 解析に使用した物性値

|                          |                      |
|--------------------------|----------------------|
| 比熱 (kcal/kg · °C)        | 0.22                 |
| 熱伝導率 (kcal/mm · hr · °C) | $2.5 \times 10^{-3}$ |
| 密度 (kg/mm <sup>3</sup> ) | $2.4 \times 10^{-6}$ |

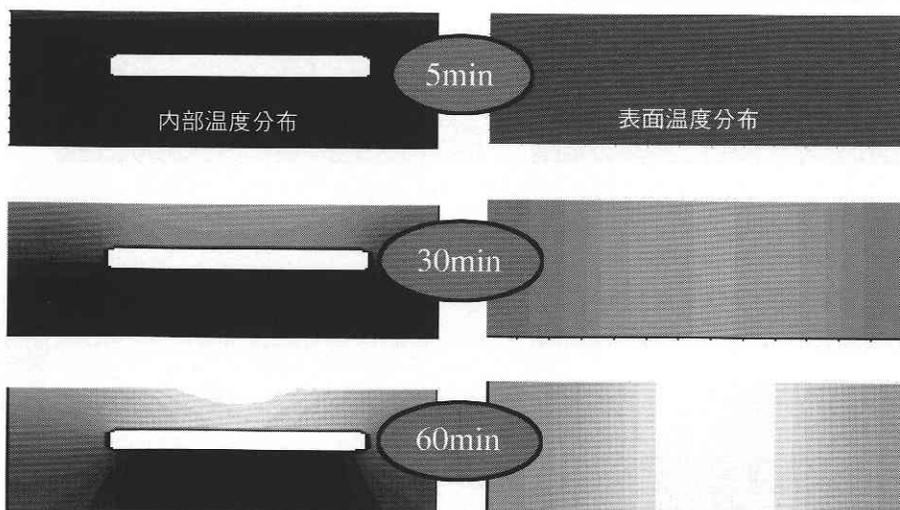


図4 内部空隙を有する供試体の表面温度と内部温度の分布変化 (解析結果)

次に図6に空隙の深さを1.5, 3.0, 6.0, 9.0 cmと変化した時に生じる空隙の上部のコンクリート表面部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。図より空隙がコンクリート表面に近いほど、短い熱源照射時間で空隙の上部のコンクリート表面部B点と健全部のA点において高い温度差が生じるということが解析より明らかになった。また図に示すように偏曲点における傾きは、空隙がコンクリート表面に近いほど大きく、温度差が一定となる時間が短いということも解析より明らかとなった。

図7に空隙の深さと最大の表面温度差の関係を示した。図よりコンクリート表面より空隙の位置が深いところに存在するほど表面温度差の検知が困難になるということが分かる。また図に示すように解析により与える熱量を2.0倍にすることで表面温度差が大きくなるということが分かる。特にこの変化の大きさは空隙の存在する深さが浅いほど顕著に表れるということがわかった。このことからコンクリート表面より空隙の位置が深いところに存在する空隙を検

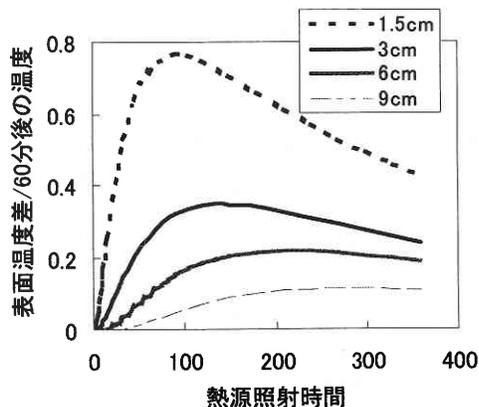


図6 空隙の深さを変化した時に生じる表面温度の違いについて (解析結果)

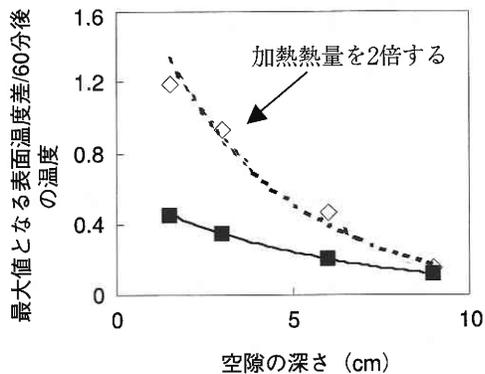


図7 空隙の深さとコンクリート表面温度差の最大値の関係 (解析結果)

知する場合、与える熱量を大きくすることにより検出が可能になるということが解析により確かめられた。このコンクリート表面の温度差の検知は、赤外線熱画像装置のスペックに依存するため、測定する際、その対象とする空隙の深さを考慮して選定しなければならない。

#### 4. ま と め

本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) コンクリート内部に空隙が存在する場合内部の温度解析を行い表面の温度分布を算出することで、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、内部温度の解析を行い、それぞれの条件に応じて図5の縦軸に表面温度差、横軸に測定時間のグラフを描くことであらかじめ最適な測定時間を予測することが可能である。
- 3) 空隙の存在する深さが浅いほど、空隙の上部のコンクリート表面温度と健全部の温度の差が大きくなるということが解析により明らかとなった。
- 4) コンクリート表面より空隙の位置が深いところに存在する空隙を検知する場合、与える熱量を大きくすることにより検出が可能になる限界が存在するということが解析より明らかとなった。

#### 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。なお本研究費の一部は平成12年度科学研究費補助金基盤研究(A)(2)課題番号12305029(代表:魚本健人)によったものであることを付記する。

(2001年2月9日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 込山貴仁・谷川恭雄:スモーキ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) 込山貴仁・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.