

研究速報

温度解析に基づいたサーモグラフィー法による コンクリート中のひび割れの検査方法に関する基礎的研究

Inspection Method for Crack 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まり、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^{1), 2)}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空隙³⁾、ひび割れ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、コンクリートにひび割れが存在する場合、内部方向における温度解析を行い表面の温度分布を算出することで、ひび割れ角度の異なるコンクリートに生じる温度分布を予測することが可能であることが明らかとなった。解析よりひび割れ角度が小さいものほど早期に顕著な温度

分布が生じるということが分かる。またひび割れ部のコンクリート表面温度を測定することでひび割れの角度とその方向を知ることができるということが解析より明らかとなった。

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。

2. 実験概要および実験結果

2.1 斜めひび割れ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。また実験には斜めひび割れ供試体（図1）に示す。供試体は、10×10×40 cmの型枠に打設後、厚さ2 mmの鋼板を差

表1 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
	W	C	S	G
55	160	290	868	989

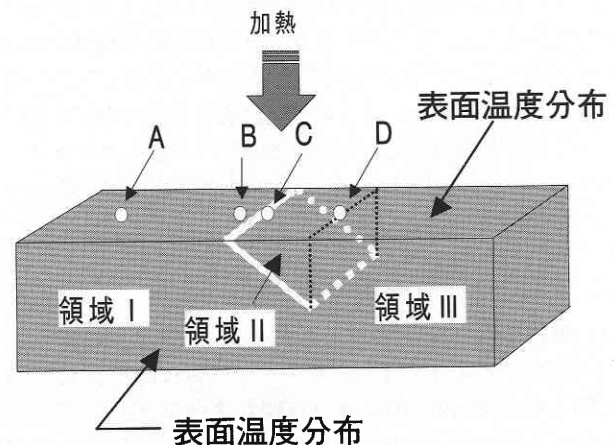


図1 斜めひび割れ供試体の概略図

*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

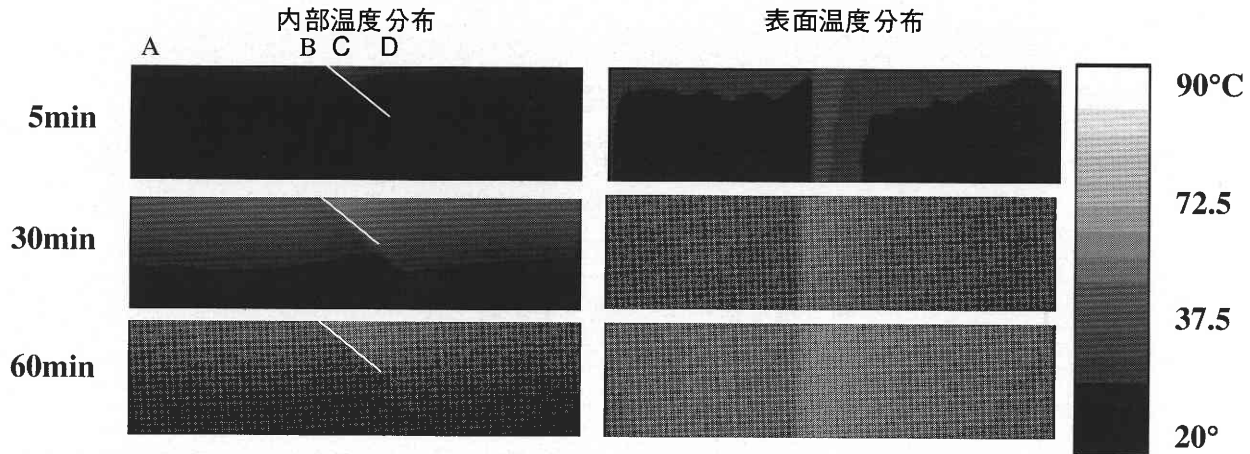


図2 ひび割れ角度35°を有する場合の表面・内部温度の経時変化 (実験結果)

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。

表2 赤外線画像装置の仕様

2.2 実験方法と用語の定義

図1に示した供試体の加熱面以外の5面を発泡スチロール系特殊断熱材にて覆い、断熱状態に作り、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(こちらに生じる温度分布を表面温度分布と定義)と深さ方向断面(同様に内部温度分布と定義)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すばやく断熱材をはずし撮影する方法を採用した。

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120°C
フレームタイム	60フレーム/秒

表3 解析に使用した物性値⁴⁾

2.3 実験結果

図2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点において約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³⁾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。

比熱 (kcal/kg・°C)	0.22
熱伝導率 (kcal/mm・hr・°C)	2.5×10 ⁻³
密度 (kg/mm ³)	2.4×10 ⁻⁶

3. FEM 温度解析

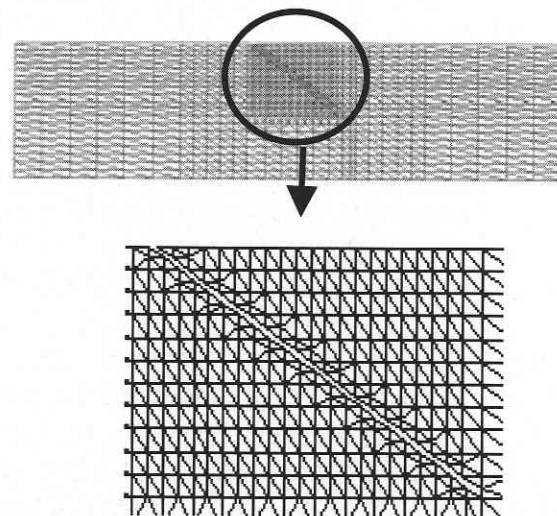


図3 斜めひび割れの解析モデル

3.1 解析条件

解析のモデルの一例として斜めひび割れ角度35度の場合を図3に示した。図よりひび割れ角度35度のモデルは要素数1546、節点数853とした。同様にひび割れ角度15度、90度についても行った。

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は既往の研究⁴⁾を参考にし、表3の値を用いた。

3.2 解析結果

図4に解析により得られたひび割れ角度35度のコンクリート表面および内部の温度分布を示す。図より照射時間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

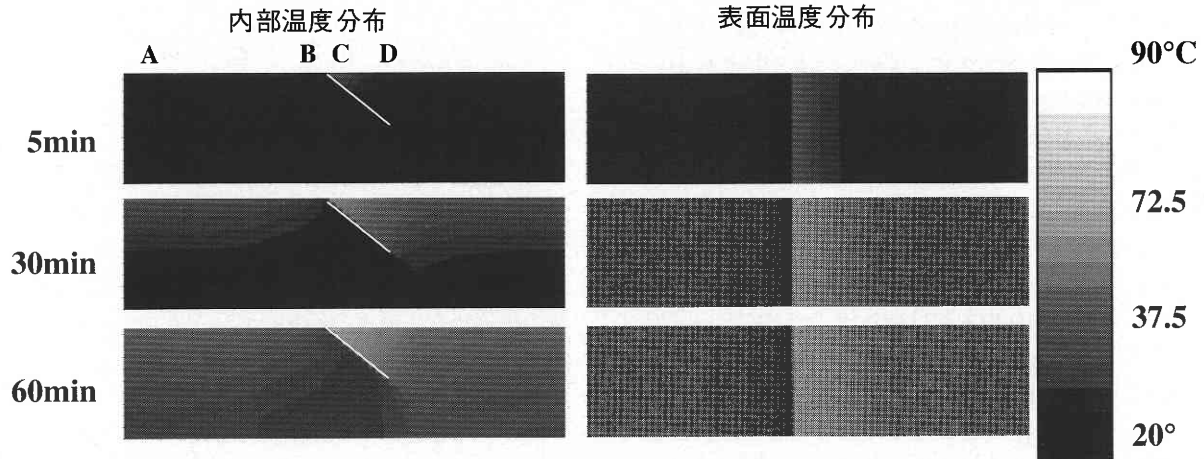


図4 ひび割れ角度35°を有する場合の表面・内部温度の経時変化(解析結果)

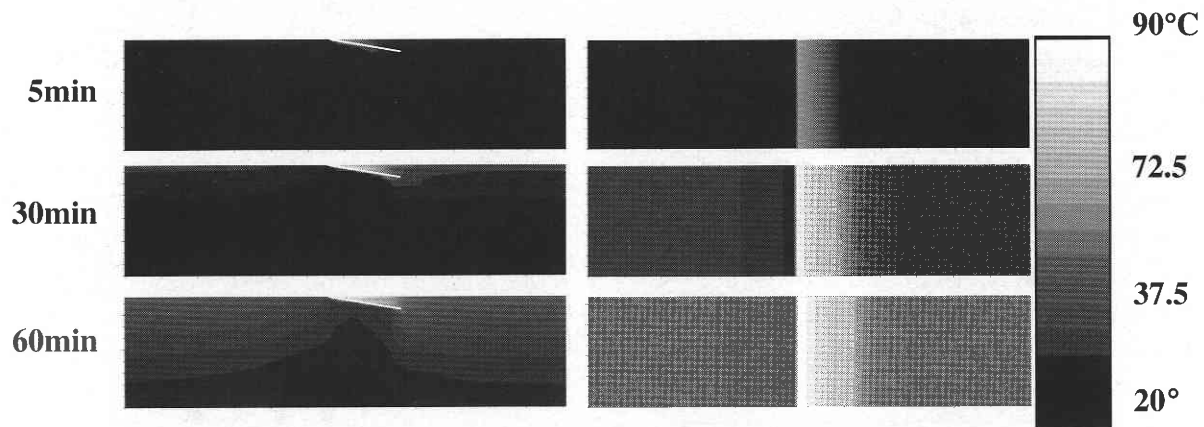


図5 ひび割れ角度15°を有する場合の表面・内部温度の経時変化(解析結果)

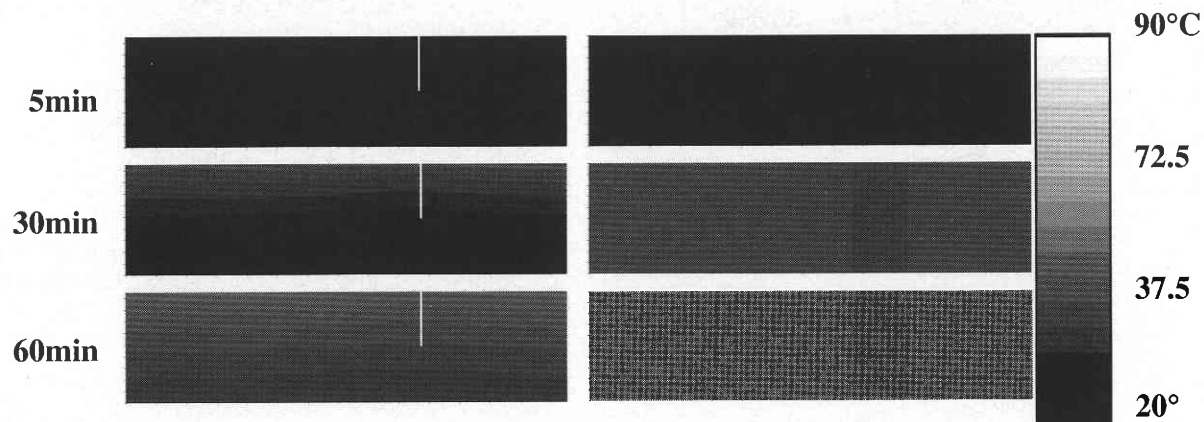


図6 ひび割れ角度90°を有する場合の表面・内部温度の経時変化(解析結果)

研究速報

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。斜めひび割れが生じてい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。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³⁾とは、明らかに異なる形態をとっていることが解析においても明らかとなった。

次に図2の実験結果と図4の解析結果について検討を行う。図より最も部材の薄いC点における温度は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いう結果となった。特に測定までの時間が長くなるとともに、その差は顕著に表れている。その原因は、今回の解析の境界条件として斜めひ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。一方、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。つまり今後、斜めひび割れの生じたコンクリートにおいて温度解析を行うためにはひび割れ部分における熱伝導を考慮した解析を行う必要があると考えられる。

次に図5、6に解析により得られたひび割れ角度が15度、90度のコンクリートにおける表面および内部の温度分布の経時変化を示した。図5よりひび割れ角度が15°である場合、ひび割れ角度が35°(図4)と比較すると、早期において健全部と欠陥部において表面温度差が生じることが分かる。逆に図6に示したひび割れ角度が90°(コンクリート表面に対して直交にひび割れが生じているタイプ)の場合、コンクリート表面においてほとんど温度差が生じないということが分かる。図7に示すように、こ

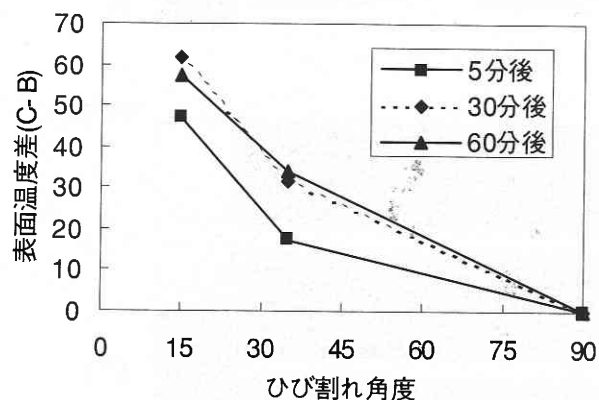


図7 ひび割れ角度と表面温度差の関係

のことから実現場においてなんらかのひび割れが生じていた場合、日光等により加熱されたひび割れ部のコンクリート表面温度を測定することで、ひび割れの方向とその角度を知ることができるということが解析より明らかとなった。

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の特徴として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。
- 2) 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。
- 3) 日光やその他の熱源を使用することにより加熱されたひび割れ部のコンクリート表面温度をサーモグラフィー法で測定することで、ひび割れの方向とその角度を推定することができ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、13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9月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 込山貴仁・谷川恭雄: スム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) 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) 高羅信彦・魚本健人: 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, 生産研究3月号, vol. 53, No. 3, pp. 62-65, 2001.
- 4) 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.