

サーモグラフィー法によるコンクリート構造物の検査手法の開発

The development of inspection technique of the concrete structure by thermography

高 羅 信 彦*・魚 本 健 人*

Nobuhiko TAKARA and Taketo UOMOTO

1. はじめに

1999年、北九州、福岡、礼文浜の覆工コンクリートの崩落事故が相次ぎ起き、現在鉄道トンネル覆工コンクリートの表面の剥離、剥落の調査が重要視されている。この崩落した礼文浜トンネルのコンクリートの生じていたひび割れ角度が20°、福岡トンネルでは45°、90°に生じたひび割れが連結して崩落したと評価されている。特に、スクラップ・アンド・ビルドが簡単に行えない大規模な構造物が多い土木分野のコンクリート構造物にできるだけ早期に、損傷・欠陥を発見し、適切な処置を講じて劣化の進行を防止し、安全性を確保するための補修技術の確立が急がれている。それゆえ、コンクリート構造物の劣化度を評価し、補修、補強の必要性を客観的かつ合理的に判定する診断技術の確立が必要不可欠である。現在、コンクリート構造物の点検は主に目視で行われているが、交通規制等の問題から構造物を破壊せず簡便に検査できる非破壊検査が注目を浴びている。

非破壊検査技術の一つに赤外線サーモグラフィー法がある。赤外線サーモグラフィー法とは赤外線カメラを用いて対象物から発生する赤外線を測定し、温度の異なる点を異常個所として検知する方法であり、実際に吹付法面の調査、建築物のタイルの剥離、コンクリート打設期の充填度検査などに適用されている事例がある。この手法の特徴として、広面積を一度に即座に測定でき、この面的な温度分布の時間変化から欠陥箇所等を発見することができる。しかしながら現状における問題点として、現場において熱画像から欠陥部評価する際、熟練した調査員でなければ、非常に困難となるケースが多い。その原因としてサーモグラフィー法ではコンクリート構造物の欠陥状態、配合、含水率、与える熱源の種類と熱量により大きく左右されるため実験的検証

がそのまま現場で適用できるケースが少ないためである。

そこで本研究では、ひび割れ角度の推定を効率よく行うことのできる指標の作製を目的とし次のような知見を得ることができた。ひび割れ角度が小さいものほど健全部と欠陥部において表面温度差が高くなることが実験より確認できた。このような伝熱現象を応用し、表面温度差と累積熱流束という関係を用いることで簡易的なひび割れ角度が推定できることが分かった。

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

コンクリートの配合は水セメント比55%とし、写真1にモデルの寸法および概観を示した。模擬ひび割れの角度は15、30、45、90°またひび割れ幅を0.2 mm、1.0 mm、2.0 mmとした。模擬ひび割れの導入方法はコンクリートを打設する際、厚さ0.2、1.0、2.0 mmの鋼板をコンクリート表面より角度15、30、45、90°で差込み、コンクリート硬化後に鋼板を抜き取り、模擬ひび割れとした。

2.2 実験方法と用語の定義

測定状況を図1に示す。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、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、1、5、15、30 minとした。測定面は、加熱

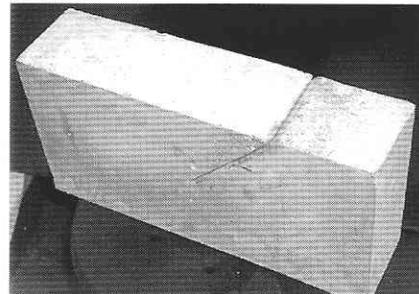


写真1 モデルの概観

*千葉工業大学

**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

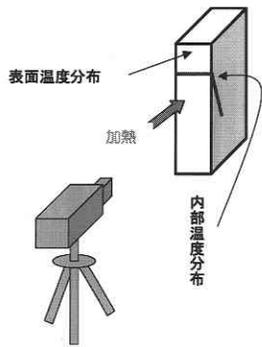


図 1 測定状況

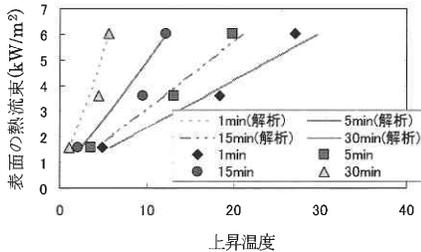


図 2 上昇温度と熱流束の関係

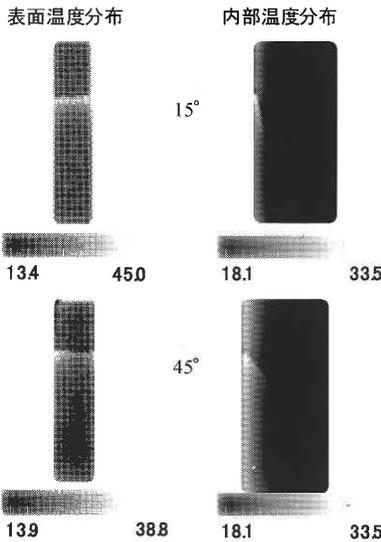


図 3 ひび割れ角度 15°, 45° の熱画像

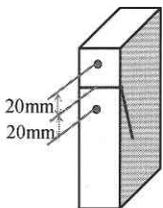


図 4 測定位置

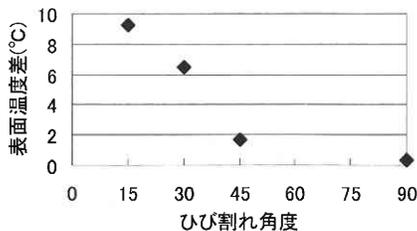


図 5 ひび割れ角度と表面温度差

面 (表面温度分布) と直角方向断面 (内部温度分布と定義) における面の 2 面とした. 遠赤外線ストーブ (1000 kW) を使用して加熱面を加熱し, 測定時間に達したら, 遠赤外線ストーブを移動させ, 表面温度分布を測定した. 次に供試体を 90° 回転させ, すばやく断熱材をはずし内部温度分布を赤外線カメラにより撮影した.

2.3 コンクリート表面の加熱量の算定手法

本実験により照射した熱流束の算定を行う. 実験では異なった熱流束を与えるために欠陥のないコンクリートに 3 パターン (300, 500, 1200 mm) の距離から熱源を照射した. その際生じる温度変化になるように逆解析 (熱物性値は実験より求めた) を行い熱流束を算定した. その結果, コンクリートに対して熱源 (1000 W) が距離 300 mm の場合は 6.0 (kW/m²), 500 mm の場合は 3.6 (kW/m²), 1200 mm の場合は 1.6 (kW/m²) となった. 次に実現場において簡易的に使用した熱源がコンクリート表面に与える熱流束を算定するグラフを図 2 に示す. この図は横軸に上昇温度, 縦軸に吸収された熱流束を表す. 例えば, 未知の熱源によりコンクリート加熱した場合, 30 分で上昇温度が 20°C の時には図 2 よりコンクリートに表面に与えられる熱流束は 4.2 (kW/m²) となる. しかしながら, 一つ重要なこととして, 伝熱論よりこの表の有効な範囲は, 6.0 (kW/m²) ~ 1.6 (kW/m²) の場合に限られる.

2.4 ひび割れ角度の評価手法の提案

図 3 に一例として熱流束 3.4 (kW/m²), 加熱時間 15 min 後における表面温度分布と内部温度分布の熱画像を示した. 図より温度レンジの最低温度はある程度そろえてあるので, ひび割れ角度の違いで, かなり表面温度分布と内部温度分布が異なるということが一見するだけで分かる. 図に示されるようにひび割れ角度が 15° の場合のようにひび割れ角度が小さいものほど, ひび割れ部は高温領域になるということが分かる.

そこで簡易的にひび割れ角度するという事で評価手法として素人では判断しにくい表面温度分布について検討を行うのではなく, 図 4 に示すようにひび割れ部から 20 mm の位置におけるポイントの表面温度差について検討を行う. そこで図 5 に熱流束 3.6 kW/m², 加熱時間 15 min におけるひび割れ角度と表面温度差の関係を一例として示した. 図よりひび割れ角度が小さいものほど表面温度差は大きくなる事が分かる. 以下の実験において様々な影響について検討するが評価手法は上記に示した手法を使う.

3. 実験結果

3.1 ひび割れ幅の影響

実構造物のひび割れを診断する際, 様々なひび割れ幅を

持っていることが予測される。特にサーモグラフィー法のようにひび割れ部分における熱伝導率の差異で表面温度が変化する原理を利用していることを考慮すると、ひび割れ幅の影響を把握しておく必要がある。そこで図6に加熱時間5min、熱流束3.6(kW/m²)におけるひび割れ角度と表面温度差の関係を図示し、ひび割れ幅の影響について検討した。図より同じ加熱時間、熱流束を加えても、ひび割れ幅により表面温度差が異なることが分かる。特に、ひび割れ角度が15°の場合、ひび割れ幅の影響が大きいことが分かる。

3.2 熱流束の影響

図7に加熱時間5min、ひび割れ幅1.0mmにおけるひび割れ角度と表面温度差の関係を図示し、熱流束の影響について検討した。図よりひび割れ角度15°の場合、それぞれ熱流束の違いにより、表面温度差が大きく異なることが分かる。しかしながらひび割れ角度30°以上になると熱流束：6.0(kW/m²)、3.6(kW/m²)の間にはほとんど表面温度差に差がなくなることがわかる。また、図より5minの加熱でひび割れ角度45°を検出するためには3.6(kW/m²)の熱流束が必要ということもわかる。つまり実現現場において加熱時間の短縮と目標のひび割れ検出角度においては、熱流束は非常に重要な因子となる。

3.3 加熱時間の影響

図8にひび割れ幅1.0mm、熱流束3.6(kW/m²)におけるひび割れ角度と表面温度差の関係を図示し、加熱時間の影響について検討した。図より同じ熱流束を与えても加熱時間の違いにより、大幅に表面温度差が変化することがわかる。特にこの条件の場合、5minの加熱で検出できるひび割れ角度は30°程度であり、ひび割れ角度45°を算出するためには15minの加熱を有することが分かる。

3.4 ひび割れ角度の推定手法の提案

上述したように熱流束、加熱時間、ひび割れ幅による表面温度差への影響はかなり大きい。特に本手法では表面温度差からひび割れ角度を推定するため、この影響要因を抽象的にするのではなく、具体的な評価基準を作らなければ、現場における推定は困難なままである。そこで本研究においては、累積熱流束による評価手法で、熱流束、加熱時間を一律の軸に乗せることを提案する。

累積熱流束とは熱流束(kW/m²)×加熱時間(s)で表す。つまり低い熱流束を長時間加熱するのと、短時間で強制加熱するものを評価する手法である。ひび割れ幅1.0mmにおける累積熱流束と表面温度差の関係を図9に示した。図よりひび割れ角度の違いにより絶対的に必要な累積熱流束が存在することがわかる。欠陥のないコンクリートにおいて生じる表面温度差の誤差が0.5°C程度であることから1°C以上の表面温度差が生じた場合において欠陥部分であ

ると想定すると、ひび割れ角度が15°で約360kW・s/m²、ひび割れ角度30°で1440kW・s/m²、ひび割れ角度45°で3240kW・s/m²の累積熱流束を加えれば欠陥部として熱画像より判断できる。この評価方法は実際に現場において使用する熱源の熱流束の違いによって生じる欠陥部を算出するのに必要な加熱時間も選定することができる。

しかしながら上述したものはひび割れ幅1mm指標であり、現場においてひび割れ幅を測定してそれにあった指標を用いるのは、作業の効率化という観点からあまり好まし

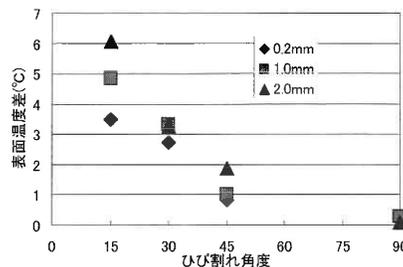


図6 ひび割れ幅の影響

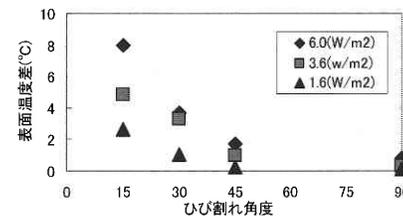


図7 熱流束の影響

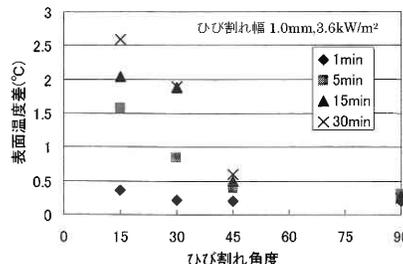


図8 加熱時間の影響

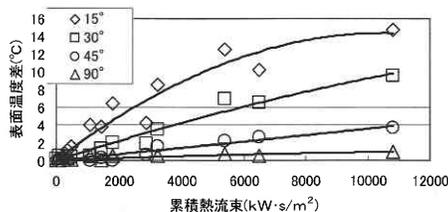


図9 累積熱流束と表面温度差の関係

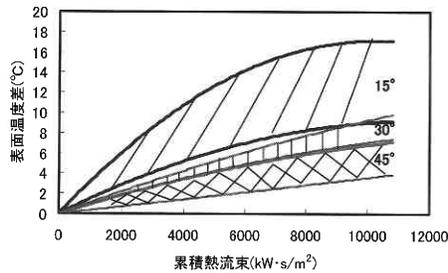


図10 累積熱流束によるひび割れ角度の算出表

くない。そこで図10にひび割れ幅(0.2~2.0 mm)の影響も考慮し一括した指標を示す。測定精度に関しては15°程度になるが、サーモグラフィー法の長所である作業の効率化を最大限に伸ばすことを考えれば十分な測定精度である。

4. 実構造物に生じたひび割れ角度の推定

4.1 実験概要

実際のひび割れを作製するために、RC梁に曲げ荷重を行い、様々なひび割れを発生させた。加熱面および測定面は、荷重をかけた際に部材の引っ張り側にあたる底面とした。また実際に生じているひび割れ角度を確認するために側面をデジタルカメラにて映像を納め、そのひび割れ角度を算定した。以上のことを踏まえて、上章で提案した評価手法を適用させ推定した。

4.2 推定手順と結果

手順1：熱流束の算出

使用した遠赤外線ストーブ(1000 W)を距離500 mmより照射し、コンクリートを加熱したところ15 minで約13°Cが上昇温度となる加熱条件であった。そこで上記の2.3の手法より今回の加熱条件を当てはめると熱流束は3.6 kW/m²と判断できる。

手順2：画像の記録

図11に示すように時間(s)後の表面温度差(T1)を記録する。この場合ひび割れ部を境に表面温度が1°C~2°C異なり、実際のひび割れでも表面温度差をとれることが分かった。

手順3：累積熱流束と表面温度差の関係

今回の場合における累積熱流束=Q(熱流束)×加熱時間=3.6×1800=6480 kW·s/m²となる。また表面温度差は上記したように1~2°Cであることから図12の累積熱流束と表面温度差の関係から推測するとひび割れ角度は45°C以上90°C未満となる。

4.3 実験結果との整合性

実際にこの梁に生じていたひび割れの側面図を写真2に示した。写真よりひび割れが68°C~90°Cの範囲にある。

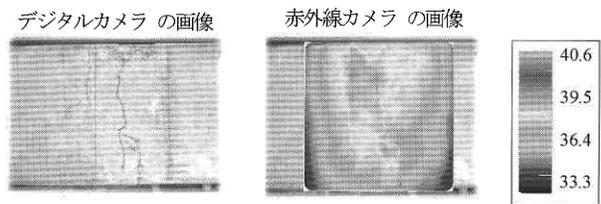


図11 画像の記録

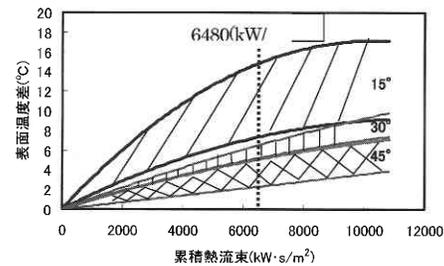


図12 累積熱流束と表面温度差の関係(手順3)

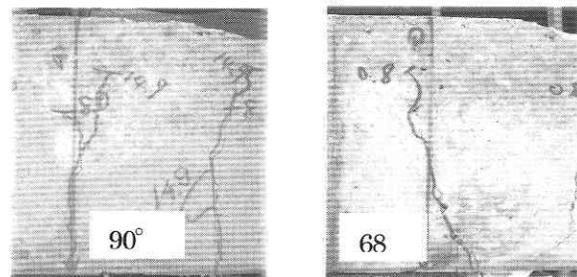


写真2 ひび割れ側面図

このことから本手法により実際のひび割れ角度の予測は累積熱量とひび割れ角度の関係より簡易的に求めることができる。

5. ま と め

本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) 累積熱流束という概念から熱量、加熱時間、ひび割れ幅を考慮した指標を作製し、簡易的にひび割れ角度を予想できる手法について提案した。

謝 辞

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。

(2002年3月12日受理)