

## 赤外線を利用したコンクリートのひび割れ深さの測定に関する基礎的研究

関東学院大学大学院工学研究科土木工学専攻 学生会員 工学士 ○高橋 正亨  
 関東学院大学工学部社会環境システム学科 正会員 工博 出雲 淳一

### 1. はじめに

高度成長期に急激に建造されたコンクリート構造物は今後、補修・補強の対象になることが予想され、膨大な社会資本のストックを効率的に維持管理していくことが重要な課題となっている<sup>1)</sup>。

コンクリート構造物の点検において、観察される変状の一つとして、ひび割れが挙げられ、コンクリートにひび割れが発生すると、コンクリートの剛性や強度が低下し、構造性能にも影響を及ぼす。

著者はこれまで、コンクリート表面に観察されるひび割れから、コンクリート構造物の劣化度を定量的に評価する手法を提案している<sup>2, 3, 4, 5)</sup>。しかし、コンクリート構造物の劣化・損傷を評価する際には、ひび割れ深さについても考慮する必要があるため、コンクリート表面からひび割れ深さを測定する方法についても新たに検討を行うことにした。

本研究では、コンクリート構造物に発生したひび割れ部分とコンクリート表面との間には温度差が生じることに着目し、コンクリート表面を強制的に加熱することによって生じる表面温度差を赤外線サーモグラフィを用いて、ひび割れ深さを推定するための手法を検討することを目的としている。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験供試体

実験用供試体には 200mm×100mm×1200mm の鉄筋コンクリート (RC) はりを製作し、2000kN 万能試験機を用いて、予め曲げひび割れを発生させた後、はりの側面に観察されるひび割れ深さを測定した。曲げひび割れを発生させたはり下面のひび割れには、赤外線サーモグラフィを用いた際のひび割れ位置が確認できるように、ひび割れを含む 80mm×200mm の領域に 20mm 間隔で、測定対象のひび割れにマーキングを施した(図-1 参照)。

コンクリート表面を加熱後、コンクリート供試体周辺からの放熱を防ぐために、供試体側面、裏面に厚さ 20mm の断熱材を取り付けて、コンクリート周辺温度の影響を極力受けないようにした。さらに、強制加熱をした際に断熱材が高熱のため融けるのを防ぐ対策として、加熱する断熱材の上をダンボールで覆うことにした(図-2 参照)。

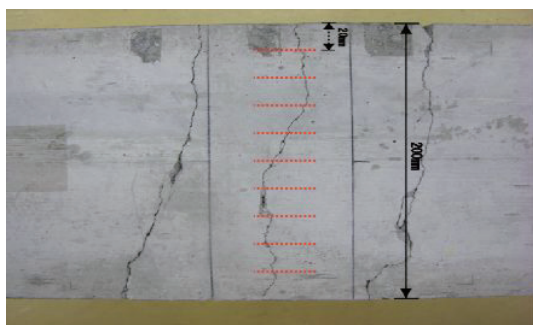


図-1 ひび割れ幅と測定領域

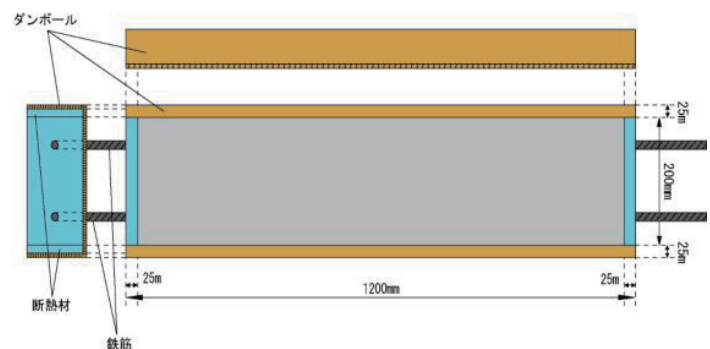


図-2 供試体における断熱材の配置

## 2.2 実験方法

実験は、温度と湿度を管理することができる恒温室内で行うことにした。赤外線カメラを三脚に固定し、コンクリート供試体の上から撮影を行った。使用したコンクリート供試体は、供試体A、供試体B、および供試体Cの3種類で、測定されたひび割れ幅は、0.1mm～0.8mm、ひび割れ深さは、20mm～100mmであった。ひび割れ測定箇所には、白熱球のサイズに切り抜いた発泡スチロールを設置して、白熱球による加熱照射を行った後に表面温度を赤外線カメラで撮影した。

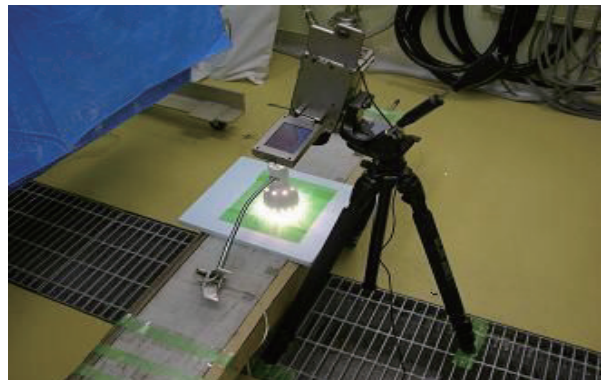


図-3 赤外線カメラの実験状況

予備実験では、白熱球による加熱を5分間行ったが、加熱時間が短いためか、ひび割れ部分を赤外線カメラで鮮明に観察することができなかった。したがって実験では、10分間の強制加熱を行うことにした。図-3は赤外線カメラによる実験状況を示している。

加熱後、5分～10分間隔でコンクリート供試体付近の温度(℃)、湿度(%)、風速(m/s)を風速計で測定した。ひび割れ周辺を縦100mm、横100mmの範囲の供試体表面温度を赤外線カメラで撮影した。

本実験に用いた赤外線カメラは、この測定範囲内では、約12000ポイントの点温度の集合から成る赤外線画像を撮影することができ、撮影した赤外線画像から、供試体表面の平均温度、ひび割れ点温度を測定することができる。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 ひび割れ幅・ひび割れ深さ

ひび割れ深さが異なるひび割れを供試体から選ぶことにした。実験に用いた供試体のひび割れ幅、およびひび割れ深さを表-1に示す。

表-1 ひび割れ幅・ひび割れ深さ

供試体の種類	供試体 A	供試体 B		供試体 C
ひび割れ No	1	2	3	4
ひび割れ幅(mm)	0.5	0.8	0.3	0.1
ひび割れ深さ(mm)	85	100	70	20

### 3.2 測定結果

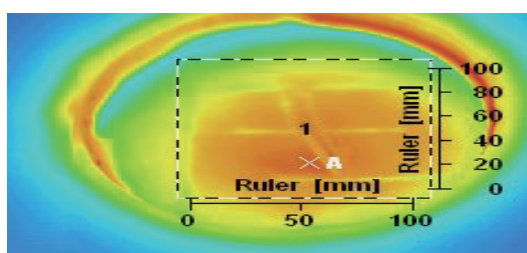
図-4、図-5は、恒温室内を25℃の一定の温度に設定して、コンクリート供試体に10分間の強制加熱を行った後、30分経過するまでのコンクリート供試体表面に観察される赤外線画像を示している。なお図中「1」は、測定範囲の中心を示している。

図-4は、ひび割れ幅0.1mm、深さ20mm、図-5は、ひび割れ幅0.8mm、深さ100mmのコンクリート供試体表面の赤外線画像を表している。ひび割れ部における温度変化を求めるために、赤外線画像上のひび割れ部に測定点を設定することにした。赤外線画像上のAの点が、ひび割れ部分での測定点でその点での温度を以後、「ひび割れ点温度」と呼ぶことにする。図-4、図-5のひび割れ箇所を比較すると、ひび

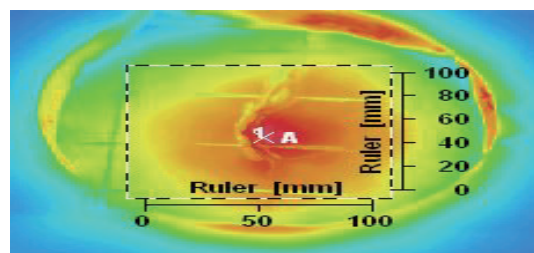
割れ幅が大きい程ひび割れ点が見えることが、赤外線画像から確認される。赤外線画像の解像度があまり高くないために、ひび割れ幅が小さくなるとひび割れ点温度の測定も難しくなることが予想される。従って、ひび割れ点温度の測定の際には、ひび割れ幅、および画像の解像度を考慮して、画像範囲を設定しながら実験を行う必要があると考えられる。また温められたコンクリート表面の温度は、時間が経過するとともに次第に周りに広がり、熱が拡散している様子が観察された。

### 3.3 ひび割れ部分の温度変化

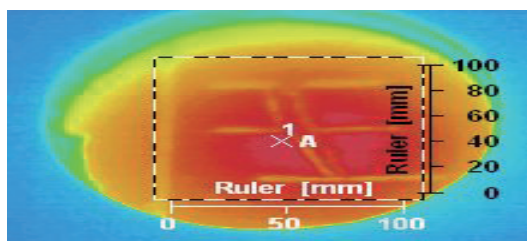
図-6～図-9 は、ひび割れ深さが 20mm, 70mm, 85mm, および 100mm の順番に、撮影した赤外線カメラの画像から測定されたコンクリート供試体表面の平均温度とひび割れ点温度の経時的な変化を表している。



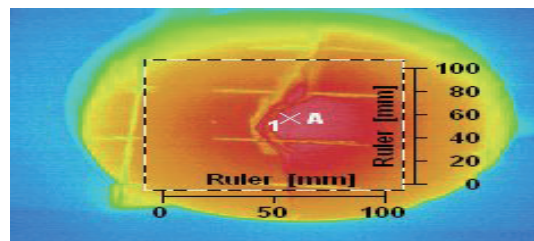
照射直後



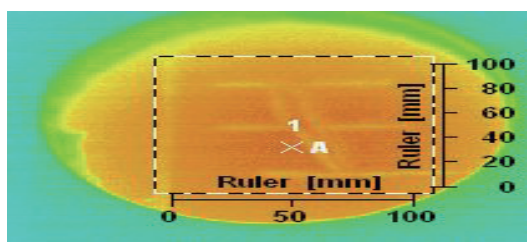
照射直後



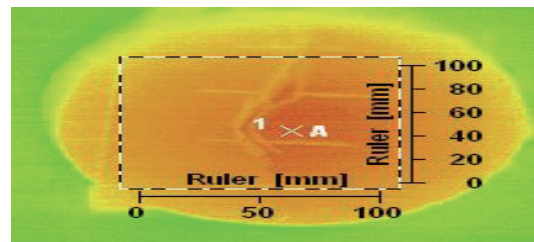
10 分後



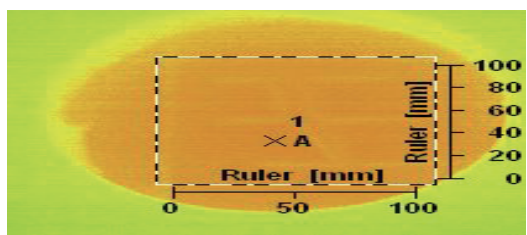
10 分後



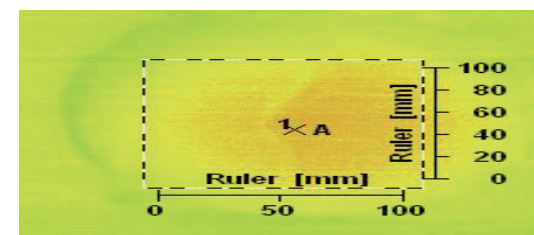
20 分後



20 分後



30 分後



30 分後

図-4 コンクリート表面の赤外線画像  
(ひび割れ幅 0.1mm, 深さ 20mm)

図-5 コンクリート表面の赤外線画像  
(ひび割れ幅 0.8mm, 深さ 100mm)

また、図には、コンクリート表面の平均温度から恒温室の温度(25°C)を差し引いた値、ひび割れ点温度から恒温室の温度(25°C)を差し引いた値およびひび割れ点温度からコンクリート表面温度の平均値を差し引いた値の経時変化も表している。図-6~図-9のグラフからも、温度測定領域内のコンクリート表面平均温度とひび割れ点温度は、時間の経過とともに一定温度に収束していく。ひび割れ点での温度は、コンクリート表面の平均温度よりも高い傾向が認められる。これは、コンクリート供試体のひび割れ部分には、空気が存在して、温められたひび割れ部の空気がコンクリートに比べて冷めにくいために、ひび割れ点温度はコンクリート表面の平均温度よりも高くなるものと考えられる。

またひび割れ点温度と平均温度の差は、ひび割れ深さが大きいほどその差が大きくなっていることが確認された。

図-10は、加熱終了直後に測定されたひび割れ点温度とコンクリート表面の平均温度との差とひび割れ深さとの関係を示したものである。また図-10には、指数関数による回帰曲線、および相関係数も示している。相関係数は0.83となり、ひび割れ点温度とコンクリート表面の平均温度との差とひび割れ深さの間には相関性が認められる。すなわち、加熱後コンクリート表面に観察される温度差にひび割れ深さが関係しているものと考えられる。

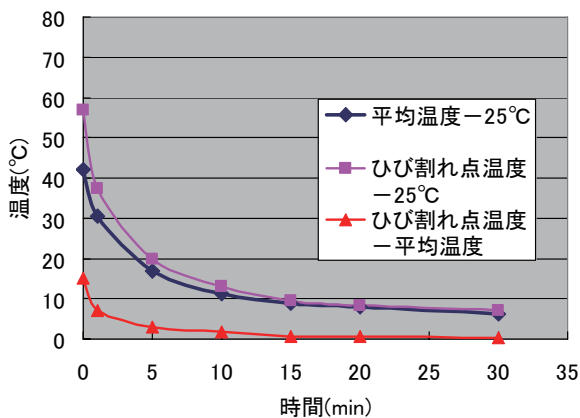


図-6 測定された温度の時間的変化  
(ひび割れ深さ 20mm)

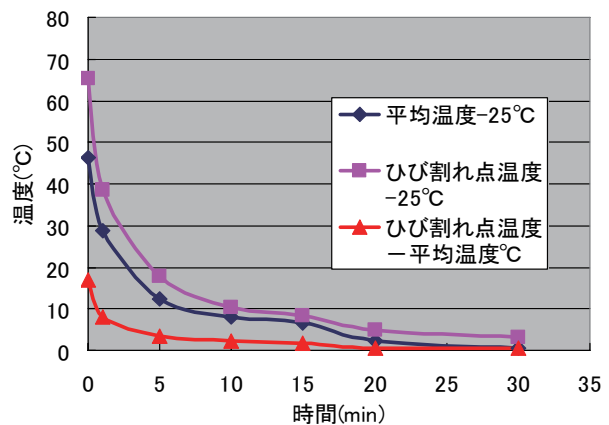


図-7 測定された温度の時間的変化  
(ひび割れ深さ 70mm)

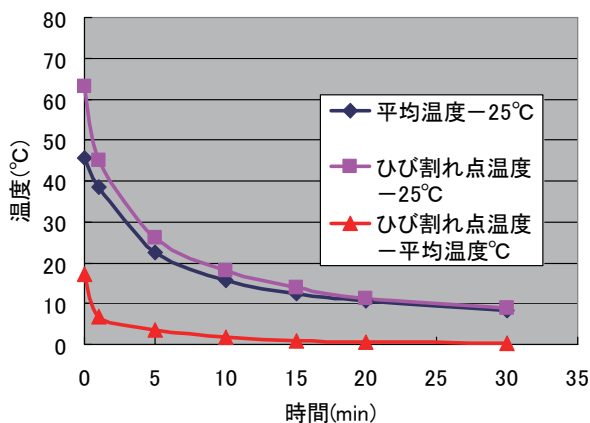


図-8 測定された温度の時間的変化  
(ひび割れ深さ 85mm)

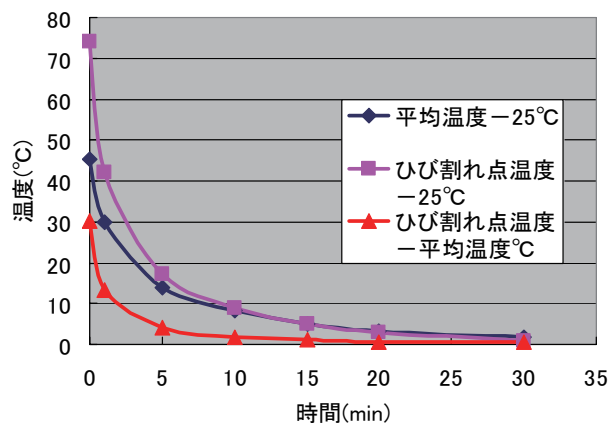


図-9 測定された温度の時間的変化  
(ひび割れ深さ 100mm)



### 3.4 積算温度とひび割れ深さとの関係

各供試体の実験において、温度差分(ひび割れ点温度-コンクリート表面温度の平均値)を時間で積分することによって求めた値を以後「積算温度」と呼ぶことにする。積算温度の時間的な変化を図-11に示している。

このグラフから温度測定内の積算温度はひび割れ深さが100mm, 70mm, 85mm, および20mmの順に、大きくなっていることが理解される。ひび割れ深さが深い程、ひび割れ内部の空気量が多いと考えられ、積算温度も大きくなると推察されるが、ひび割れ深さが70mm, 85mmとでは、積算温度は逆転しており表面で観察されるひび割れ深さと内部のひび割れ状況の違い、測定誤差などが影響しているのではないかと考えられる。

加熱をやめてから5分経過した時の、ひび割れ深さが20mmの場合の積算温度が31(°C×min)であったのに対して、ひび割れ深さが100mmの場合積算温度は、57(°C×min)であった。30分後には、ひび割れ深さが20mmの場合の積算温度が55(°C×min)であったのに対して、ひび割れ深さ100mmの場合には積算温度は89(°C×min)までに上昇し、およそ34(°C×min)の積算温度の差が生じていることが確認された。積算温度の差は、ひび割れ深さが影響するものと考えられ、積算温度からひび割れ深さが推測することができるのではないかと考えられる。

### 3.5 ひび割れ深さと積算温度との関係

各供試体の実験において、30分間の積算温度とひび割れ深さの関係を示したものが図-12である。図-12以外にも10分後、15分後、20分後における積算温度とひび割れ深さの関係についても求めて検討を行ったが、30分間の積算温度とひび割れ深さの相関性が最も良い結果となった。図-12には、近似曲線、および相関係数も示している。相関係数は

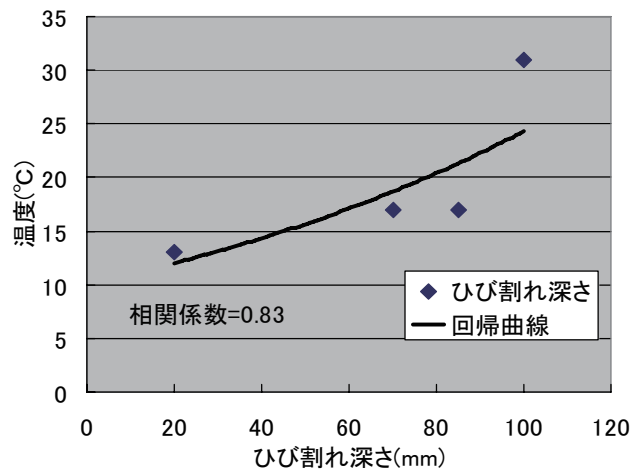


図-10 加熱直後の温度差

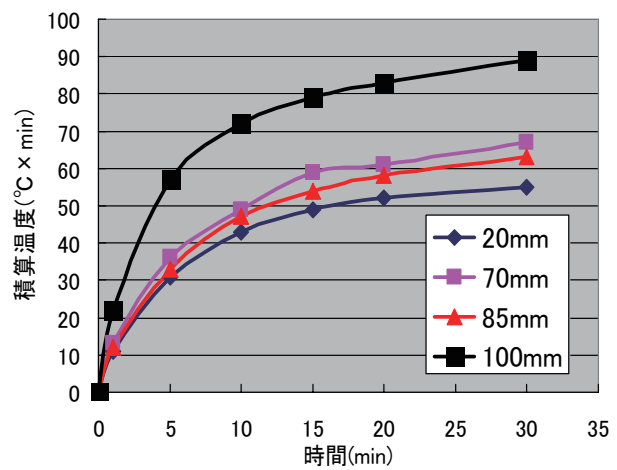


図-11 各ひび割れ深さの積算温度変化

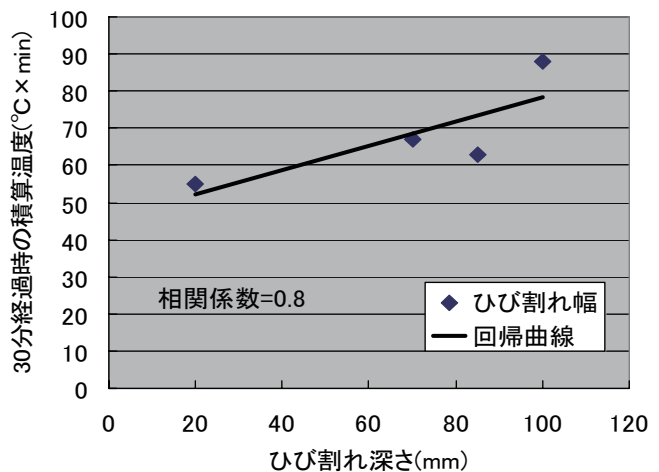


図-12 積算温度とひび割れ深さとの関係

0.8 であり、ひび割れ深さと積算温度との相関性があると考えられる。したがって、ひび割れを含む領域において積算温度を測定することにより、ひび割れ深さを予測できるのではないかと考えられる。

#### 4. 結論

赤外線を利用したコンクリートのひび割れ深さの推定方法の開発を目的に、強制加熱したコンクリート表面とひび割れ部に生じる温度差について検討を行った。今回の実験から以下のことが結論として得られた。

- (1) 照射時間を適切に設定することにより、コンクリートの表面温度とひび割れ部分の温度差をサーモグラフィを用いて測定できることが確認できた。
- (2) ひび割れがあることにより、ひび割れ点温度とコンクリート表面の間には温度差が生じ、その温度差は加熱することにより、より明確になることが確認された。
- (3) 積算温度とひび割れ深さには、相関性が認められ、赤外線サーモグラフィを用いて、コンクリートのひび割れを定量的に評価する手法の一つとなる可能性がある。

#### 5. 今後の課題

今回、実験に用いた供試体以外に、ひび割れ幅・深さを変えた供試体を製作して、さらに実験を行い積算温度とひび割れ深さに関するデータの蓄積する予定である。さらに熱流体解析を行い、理論的にひび割れ深さを推定する手法も検討していく予定である。

#### 謝辞

本実験に際しては、関東学院大学大学院工学研究科土木専攻の坂本竜樹、関東学院大学工学部社会環境システム学科の加藤将高、川上清陸、栗林陽至、田丸 武各氏の協力を得ました。ここに深く感謝の意を表す次第であります。

なお、本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業(平成 16 年度～平成 20 年度)の一環として行われたことを付記します。

#### 参考文献

- 1) 魚本健人：維持管理時代とコンクリートの技術者教育特集：コンクリート維持・管理と最近の検査・診断技術，セメント・コンクリート，No. 656，pp. 1-5（2001）
- 2) 河内令子，出雲淳一：ひび割れ図によるコンクリート部材の損傷度評価についての考察，土木学会第 58 回年次学術講演会概要集，pp. 197-198，2003. 9
- 3) 増田圭佑，出雲淳一：30 年以上供用した RC 中空床版の損傷度評価について，第 59 回土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部，5-125，2004. 9
- 4) 増田圭佑，出雲淳一：RC 橋脚のひび割れ調査に基づく劣化度の定量的評価，第 61 回土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部，5-382，2006. 9
- 5) 出雲淳一：ひび割れたコンクリートの定量的評価手法の開発と構造物への適用：セメント協会セメント・コンクリート論文集 No. 61，pp. 609-616，2007