

# 論文 赤外線法によるコンクリート構造の表層部欠陥の評価

高木政道\*1・尼崎省二\*2

要旨：赤外線法のコンクリート構造物への適用として、コンクリート表面のひび割れモニタリングおよび鋼板巻立て工法におけるモルタル充填評価を試みた。その結果、温度差画像を用いることによって、遠隔地からは目視できない表面ひび割れの発生モニタリングおよび鋼板裏面の空隙検出が可能であることが判明した。温度差画像によるひび割れモニタリングでは、ひび割れ幅が小さいほど容易であること、鋼板裏面の空隙などの欠陥は寸法が大きく、欠陥部の熱伝導率が小さいほど検出しやすく、欠陥の厚さは検出には大きく影響しないことが判明した。

キーワード：赤外線法、ひび割れモニタリング、モルタル充填評価、非破壊検査

## 1. はじめに

コンクリート構造の表層部にひび割れ、空隙などの欠陥部が存在すると、熱伝導率などの熱的特性が周囲と異なる。従って、表層部の欠陥は、表面に温度変化を与えることによって、温度変化量として現れると考えられる。この変化量を赤外線サーモグラフィを用いた時系列画像間の演算処理による2画像間の温度変化画像（以下、温度差画像と略記）を作成することにより、表層部欠陥の探査が可能になると思われる。

本研究では、温度差画像によって①遠隔地から表面ひび割れ発生を広範囲でモニタリングする方法および、②鋼板巻立て工法により補強されたコンクリート部材のモルタル未充填部を評価する方法について実験的検討を行うとともに、有限要素法による欠陥を有するコンクリート構造物表層部の3次元非定常熱伝導解析による熱伝導について解析的検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 表面ひび割れのモニタリングに関する実験

実験には、B150 mm x H240 mm x L2000 mmのRCはり（W/C=55%、目標空気量4%）を2点集中荷重によってひび割れを発生させた後、図1のように2体のはりを一組としてひび割れを再現した供試体を作製した。RCはりは平均ひび割れ幅の異なる6体（図2参照）を作製し、再現した平均ひび割れ幅（主鉄筋位置

で測定）は0.07~0.52 mmの間で変化させた。表面温度変化は、前報[1]の結果から、供試体上側はりの表面を日射により加熱した後、遮蔽によって生じる温度低下過程に撮影した。温度差画像を得るため15~30分日射加熱した後、5分を基本とした撮影間隔で、日射遮蔽後15~30分間撮影した。また3次元熱伝導解析との比較を行うため、1分間隔でひび割れ部と健全部（測定点は引張縁から5 cmの位置で、ひび割れ部とひび割れから水平方向2 cmの位置2箇所の平均（健全部）の温度を赤外線法により測定した。

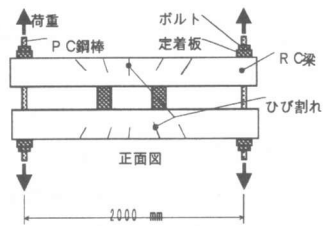


図1 供試体の組立図

\*1 東海旅客鉄道㈱、工修（正会員）

\*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科、工博（正会員）

## 2. 2 注入モルタルの内部欠陥評価に関する実験

実験には、鋼板巻立て工法で補強されたRC柱の一面をモデル化するため、B 150 mm x H 240 mm x L2000 mmのRCはり4体をPC鋼棒により一体化したコンクリート壁に鋼板（B 900 mm x H 1800 mm、厚さ6 mm）をアンカーボルトで取り付けた図2に示す供試体を用いた。鋼板には、あらかじめ欠陥をモデル化した表1に示す発泡スチロール、両面テープ、ビニールシートを貼付しておき、それぞれ空隙、浮き、剥離とした。なお、板とコンクリート壁の間隙は40 mmとし、注入モルタルには、流動性に優れた市販の早強性無収縮モルタル（W/C=38%、1:1:0.38）を使用した。

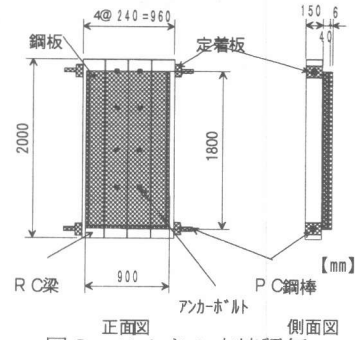


図2 モルタル充填評価の供試体

表1 欠陥の寸法および材質

欠陥の種類	発泡スチロール	両面テープ	ビニールシート
寸法	100mm x 100mm 50mm x 50mm 30mm x 30mm	150mm x 150mm 100mm x 100mm	150mm x 150mm 100mm x 100mm
厚さ	5mm・10mm	1mm・2mm・5mm	0.2mm

図2の供試体では鋼板全体の遮蔽が困難なため、表面温度変化は、供試体を覆っていたビニールシートを除去することによって日射による温度上昇過程を撮影した。温度差画像は、予備実験結果から、加熱開始直後と加熱2~5分後時系列画像間の差分処理によって作成した。

3次元熱伝導解析結果との比較を行うため、熱画像の撮影と同時に、健全部と欠陥部（一辺10 cmの発泡スチロール）の鋼板表裏の温度および欠陥に接するモルタルの温度を熱電対により測定した。なお発泡スチロールは厚さ5 mmおよび10 mmとし、熱電対は欠陥部中心に設置した。

表面ひび割れのモニタリングに関する実験では遠隔地から目視できない表面ひび割れの観察、また注入モルタルの内部欠陥評価に関する実験では、鋼板全体の撮影のため、供試体から5 m離れた位置から視野角20°で撮影できるように図3のように赤外線カメラを設置（解像度0.38 mm）した。

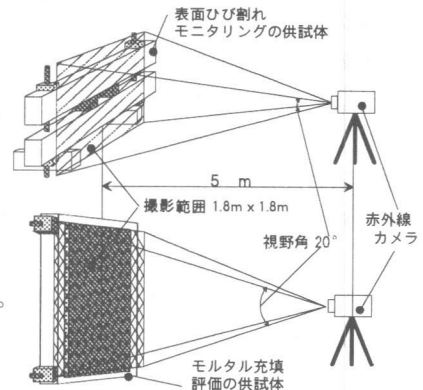


図3 カメラの設置位置と撮影範囲

表2 赤外線カメラの仕様

赤外線検知器	水銀・カドニウム・テルル液体窒素冷却型	
応答波長	8.0 ~ 13.0 μm	測定温度範囲 -40 ~ 2000 °C
感度(温度分解能)	3.0 °C で 0.05 °C	装置動作範囲 0 ~ 40 °C
温度指示誤差	指示値の1%	表示画素数 512 (水平) x 480 (垂直)
	または 0.5 °C	
	whichever is larger	焦点範囲 カメラ部前部 20 cm 以上

なお両実験とも、赤外線撮影条件を無風あるいは微風程度の環境とした。表2に本研究で使用した赤外線カメラの仕様を示す。

## 3. 3次元非定常熱伝導解析

供試体表面層部の3次元非定常熱伝導解析は、20節点アイソパラメトリック要素により行った。ひび割れモニタリングに関する解析では、幅0.1 mmのひび割れ部に着目して、図4に示す解析モ

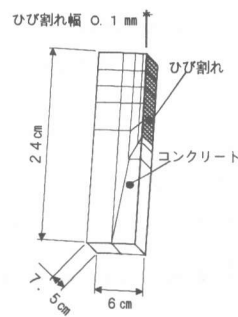


図4 解析モデル

表3 境界条件

温度変化過程	温度上昇時	温度低下時
表面からの熱流束 $q_w$	1300 ( $W/m^2$ )	
表面の熱伝達係数 $\alpha$	10 ( $W/m^2 \cdot K$ )	
外気温	20 °C	15 °C
ひび割れとコンクリート間の熱伝達係数	10 ( $W/m^2 \cdot K$ )	
初期温度	15 °C	

デルを採用し、ひび割れ部の空気とコンクリートとの熱伝導は、対流熱伝達によって表現した。解析に用いた境界条件および材料特性 [2] を表 3 および表 4 に示す。

注入モルタルの内部欠陥評価に関する解析では、空隙が鋼板表面の温度分布に及ぼす影響を検討するため、図 5 に示す 1/4 解析モデルを採用した。これは空隙の対称性を考慮したためであり、空隙は一边 10 および 5 cm の正方形で、厚さ 10 および 5 mm の発泡スチロールとした。解析に用いた境界条件および材料特性 [3] , [4] を表 5 および表 6 に示す。

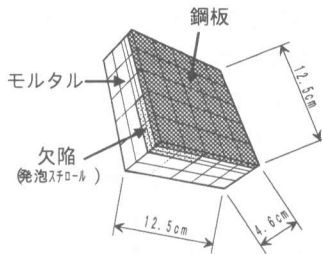


図 5 解析モデル

表 4 材料特性

材料	熱伝導率 $\lambda$ (W/m·K)	比熱 C (J/kg·K)	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
コンクリート	1.2	900	2400
空気	0.03	1007	1.176

表 5 解析条件

鋼板表面からの熱流束 $q_s$	600 (W/m <sup>2</sup> )
表面の熱伝達係数 $\alpha$	10 (W/m <sup>2</sup> ·K)
コンクリート壁の温度	15°C 一定
外気温	20 °C

表 6 材料特性

材料	熱伝導率 $\lambda$ (W/m·K)	比熱 C (J/kg·K)	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
モルタル	1.3	800	2000
鋼板	80.3	442	7870
発泡スチロール	0.018	960	15.9

表 3 および表 5 中の材料の供試体表面からの熱流束  $q_s$  は、赤外線撮影を行った 11 月中旬の滋賀県草津市における供試体表面での日射による熱流束  $q$  を村井の研究 [5] を参考にして概算することによって求めた。なお、コンクリートおよび鋼板の放射率  $\epsilon$  は、それぞれ、0.60 [6] および 0.27 [7] とした。熱伝達係数  $\alpha$  は、赤外線撮影条件である無風あるいは微風を考慮して、 $\alpha = 10$  (W/m<sup>2</sup>·K) とした [8]。また、対流による熱流束は  $q_{air} = 10(T_s - T_0)$  から算出した。ここで  $q_{air}$  : 対流による熱流束、 $T_s$  : 供試体表面温度、 $T_0$  : 表層部近傍における外気温である。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4. 1 表面ひび割れのモニタリングに関する実験

温度差画像およびこれに対応するひび割れ発生状況図の一例を図 6 に示す。温度変化の大きい箇所 (図 6 の温度差画像において白色の箇所) が、ひび割れ発生位置と比較的よく対応していること及び、この傾向は他の 6 体の梁でも同様であったことから温度差画像によって、ひび割れの発生をモニタリングできると考えられる。また平均ひび割れ幅が小さい (0.07 mm) 供試体のひび割れ部と健全部の温度差は、大きい (0.22 mm) 供試体より

も大きくなっており、温度差画像によるひび割れ検出は、ひび割れ内外の空気の移動が困難となるいわゆる断熱効果のために、ひび割れ部の温度変化が小さくなるためと考えられる。

出光ら [9] によると、通常の赤外線撮影によるひび割れ部検出のための赤外線カメラとコンクリート面との距離は、ひび割れ幅 1.0~2.5 mm で 5 m 程度、ひび割れ幅 0.15~0.35 mm で 1.6 m 程

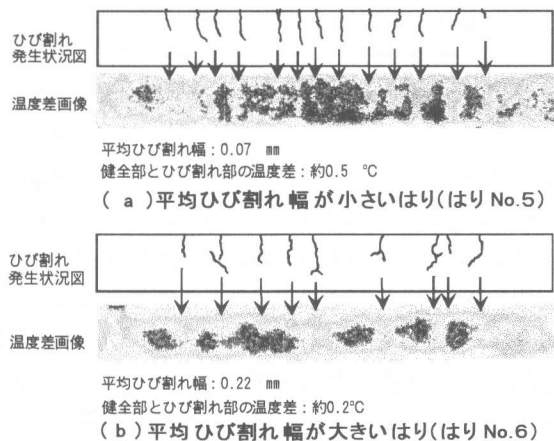


図 6 温度差画像およびひび割れ発生状況図

度としており、ひび割れが大きいほど検出が容易になると考えられるが、温度差画像を用いると、逆の結果となる。

図7および図8に、それぞれ、ひび割れ部と健全部の温度変化の解析結果および赤外線カメラによる温度の経時変化を示す。実測値では一時的に曇りになったことおよび、解析と実測値では鋼板表面における日射による熱流束、材料特性が異なるため、温度上昇量、低下量が異なっているが、解析値と実績値で温度上昇時の挙動がよく一致している。また、温度上昇時および温度低下時において実測値および解析値ともにひび割れ部は健全部より勾配が大きく、この勾配の相違は温度差画像の温度差となって現れると考えられる。しかしながら温度低下過程では、実測値ではひび割れ部が健全部より常に高温であるが、解析値ではひび割れ部と健全部の温度が逆転している。

ここで、熱伝導解析におけるひび割れ（解析ひび割れ部）と赤外線法により測定したひび割れ（実測ひび割れ部）の温度の相違は、図9(a)に示すように解析ひび割れ部の温度がひび割れ中の空気温度であるのに対し、実測ひび割れ部は図9(b)に示すように画素幅(0.38mm)とひび割れ幅の関係から、ひび割れ中の空気とひび割れ近傍のコンクリート温度の平均値になっているためと考えられる。従って、実測ひび割れ部の温度変化の勾配は、ひび割れ内の空気とひび割れ近傍のコンクリートの温度変化の勾配の平均値となり、ひび割れ内の空気温度変化勾配より緩やかになったと考えられる。このことが解析の温度低下過程において、途中からひび割れ部と健全部の温度変化が逆転した原因と思われる。これらを考慮すると、本研究に採用した熱伝導解析はひび割れを有するはりの表面における熱伝導状況をよく表現できていると思われる。

以上から、ひび割れモニタリングの可否は、ひび割れ部と健全部の温度変化勾配の差によって決まり、この勾配の差は、ひび割れ部の空気とコンクリートとの対流熱伝達によって、コンクリートからひび割れ内に熱が流れ込み、その熱がひび割れ内で断熱されることによって生じると考えられる。また、ひび割れ幅が小さいと断熱効果が強くなり、ひび割れ部と健全部の温度変化勾配の差が大きくなる。一方、ひび割れ幅が大きいと、ひび割れ内に外気から空気が流れ込むことによって、ひび割れの断熱効果が小さくなり温度変化の勾配が小さくなると考えられる。従って、ひび割れ内に熱を留める容量を持ち、かつ断熱効果が大きいほど温度差画像によるひび割れモニタリングに適していると考えられる。

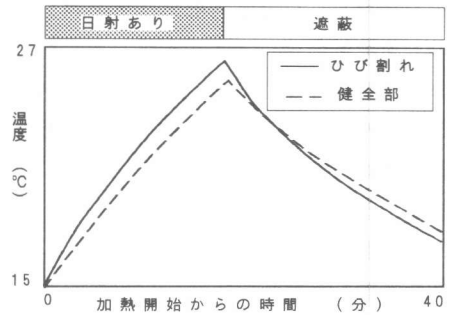


図7 ひび割れ部および健全部の温度変化（解析値）

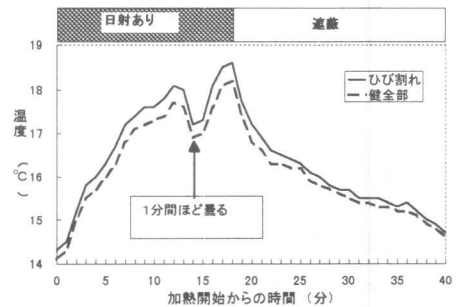


図8 ひび割れ部および健全部の温度変化（実測値）

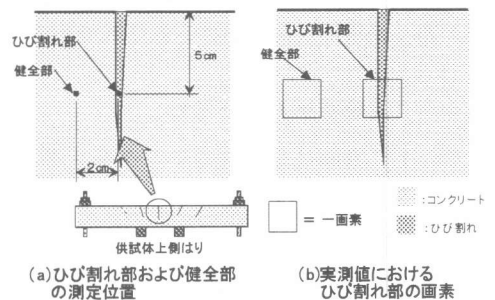


図9 ひび割れ部・健全部の測定位置および実測値におけるひび割れ部の画素

#### 4. 2 注入モルタル

##### の内部欠陥評価

モルタル注入材齢28日における日射による温度上昇時の温度差画像と内部欠陥との関係を図10に示す。温度変化量が大きい所(図9の温度差画像において淡色の所)が欠陥に相当していることが分かる。ここで発泡スチロールで作製した欠陥は、一辺が5cm以上あれば厚さに関わらず、検出

が可能で、発泡スチロール面積が小さくなるほど温度差が小さくなっている。これは、発泡スチロールの熱伝導率はモルタルと比べて非常に小さいため鋼板裏面において断熱材として働き、鋼板が吸収した熱を鋼板に蓄積するからと考えられる。

しかしながら、一辺3cmの発泡スチロールおよび浮きと剥離をモデル化したビニールシートと両面テープによる欠陥の検出は困難であった。ビニールシートと両面テープの熱伝導率は発泡スチロールと比べるとモルタルとほぼ同程度であることから、温度差画像における温度差が、健全部の温度差と同程度になったものと思われる。

さらに、これら人工的欠陥部以外に、鋼板が実際に剥離した温度差の大きい部分と鋼板が白くなっている温度差の小さい部分が生じた。鋼板の剥離は打音法によって確認を行った。一方、鋼板が白くなっている温度差が小さい部分は、色調が日射の吸収に影響するためと思われる。従って赤外線法による内部欠陥の探査には、鋼板表面の色調の相違を考慮する必要があると考えられる。

以上の結果を検証するため健全部、欠陥部の鋼板温度を熱電対で測定した結果を図11および図12に示す。これらの図から、欠陥部の温度変化が健全部より大きく、また欠陥の厚さによる温度変化には差がないことが分かる。赤外線法と熱電対によって測定した温度には、わずかな差が生じているが、これらの結果から温度差画像における健全部と欠陥部の温度差と、発泡スチロールの厚さの温度変化に及ぼす影響が確認された。

一辺10cm、厚さ10mmの発泡スチロール欠陥の解析結果を図13に示す。日射加熱開始から15

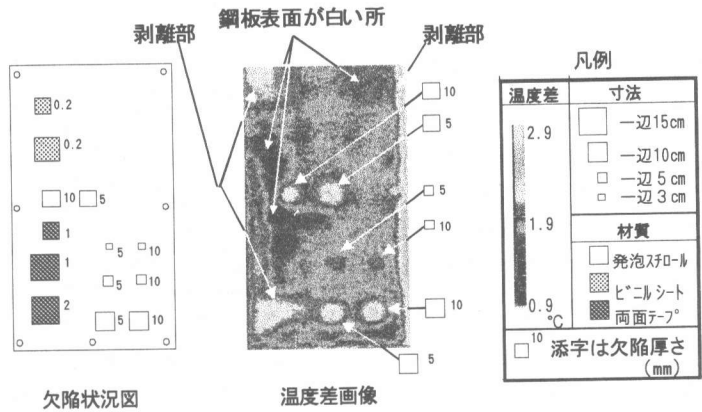


図10 欠陥状況図および温度差画像

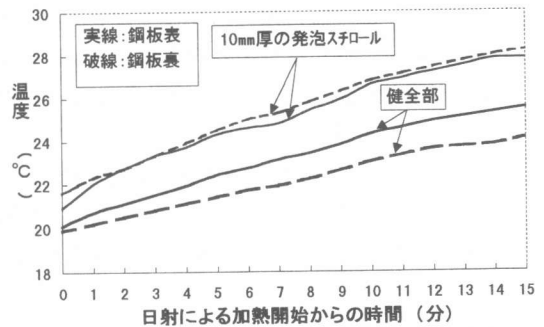


図11 欠陥部および健全部の経時温度変化

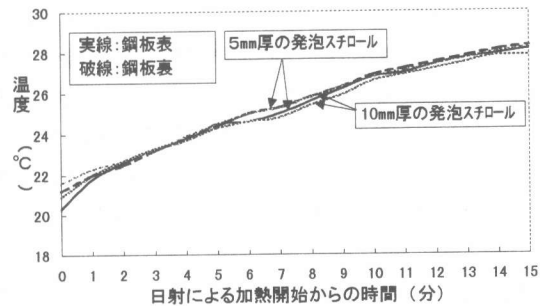


図12 厚さの異なる欠陥の経時温度変化

分後の欠陥部と健全部の温度変化量は $1.1^{\circ}\text{C}$ で、実測値 $1.5^{\circ}\text{C}$  (図9)よりも少ない。しかしながら、供試体には日射加熱以前から欠陥部と健全部に温度差があること、および解析での鋼板の熱伝導率の正確さを考慮すると、熱伝導解析は鋼板表面での熱伝導をよく表現しており、解析値は実測値によく一致していると考えられる。

また図14、図15に示す欠陥面積および厚さの影響に関する解析結果でも、欠陥面積は温度変化に大きく影響し、厚さはほとんど影響していないことが分かる。

## 5. 結論

本研究では、赤外線法によるコンクリート表層部の欠陥の評価を表面ひび割れのモニタリングおよび鋼板巻立て補強された橋脚のモルタル未充填部検出について行った。この2つの実験および解析から得られた結果を要約すると、以下のようである。

- 1) 温度差画像を用いると、目視できない距離からでもコンクリート表面のひび割れをモニタリングすることができる。
- 2) ひび割れ幅 $0.07\sim 0.52\text{ mm}$ の範囲では、ひび割れ幅が小さいほどモニタリングが容易である。
- 3) 注入モルタルの内部欠陥検出精度は、空隙の面積によって決まる。
- 4) 赤外線法による注入モルタルの内部欠陥の探査には、鋼板表面の色調の相違を考慮する必要がある。

## 引用文献

- [1] 高木政道, 尼崎省二: 赤外線法によるコンクリート表面のひび割れ評価、土木学会第51回学術講演会講演概要集、pp. 1200-1201、1996、9
- [2] 日本機械学会: 伝熱工学資料、日本機械学会、pp. 189、1959
- [3] 日本機械学会: 伝熱工学資料、日本機械学会、pp. 189、1959
- [4] 桃木昌子, 山田和夫, 桃木佳子: コンクリート表面温度に及ぼす内部空隙の影響に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、pp. 655-660、1995
- [5] 村井俊治: 日照, 日射の効果に関する基礎的研究、土木学会論文報告集第215号、pp. 49-59、1973、7
- [6] 日本機械学会: 伝熱工学資料、日本機械学会、pp. 322, 329、1959
- [7] 西川兼康, 藤田恭伸: 機械工学基礎講座 伝熱学、理工学社、pp. 302、1982
- [8] 日本機械学会: 伝熱工学資料、日本機械学会、pp. 322, 329、1959  
出光隆, 山崎竹博, 宮部和, 高山俊一: 赤外線映像装置を用いたひび割れ観測、セメント技術大会報告集、pp. 436-441、1991

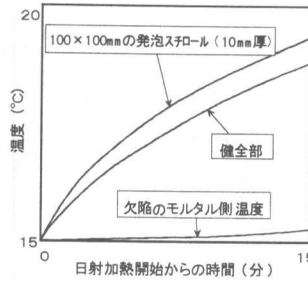


図13 一辺10 cm、厚さ10 mmの発泡スチロール欠陥の温度変化 (解析値)

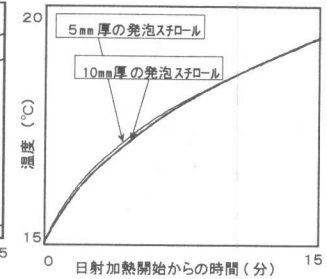


図14 欠陥の厚さの違いによる温度変化 (解析値)

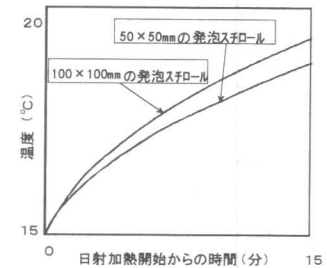


図15 欠陥寸法による温度変化 (解析値)