

炭素繊維シートで補修・補強された RC 構造物の 欠陥の検知について

Detection of Defects of RC Structures Reinforced with Carbon-Fiber Sheet

相 良 健 一*・魚 本 健 人*

Kenichi SAGARA and Taketo UOMOTO

1. は じ め に

近年、RC 構造物特に橋脚や床版などの補修・補強に炭素繊維シートを用いる工法が広く利用されている。炭素繊維シートは軽量で引張強度が高く、耐食性に優れ、施工に関しても鋼板接着工法などに比べ優れた施工性を有している。この炭素繊維シートをコンクリート構造物の表面に巻き付けあるいは貼り付けを行い補修・補強を行った場合、母材自体に欠陥が存在したり、炭素繊維シートの接着が不十分で剝離していたのでは、その効果を期待することはできない。

本報告では非接触で広範囲を短時間で測定でき、温度変化あるいは分布を可視像として得ることで欠陥部分が視覚的に把握できるという利点¹⁾を有する赤外線カメラを用いて欠陥位置の推定を試みた。

2. 欠陥部分検出の原理

一般にコンクリート構造壁やタイル・モルタルなどの仕上げ材との間に、母材の欠陥、あるいは剝離などにより空隙が存在する場合、この空隙は大きな熱抵抗を持つため温度勾配が異なる。つまり、熱などが加えられた場合、正常部分と欠陥部分との間に相対的な温度差が生じてくる。

図 1 にその相対的な温度差が生じる過程を示す。炭素繊維シートを加熱すると、まず全体的に温度が上昇する。それから温度が低下するが、正常部分に比べ欠陥部分は熱抵抗が大きい空気層の存在により温度の低下が小さく、両者

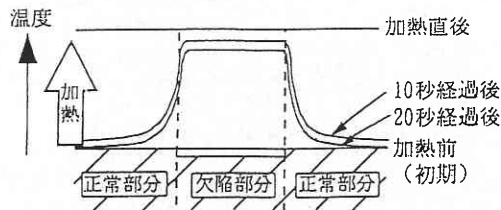


図 1 相対的な温度差の生じる過程

*東京大学生産技術研究所 第 5 部

表 1 炭素繊維シートの特性

	高伝達タイプ	低伝達タイプ
熱伝達率 (w/mk)	140	10
目付量 (g/m ²)	300	300
引張強度 (kgf/cm ²)	29000	35000
引張弾性率 (kgf/cm ²)	6.5×10 ⁶	2.4×10 ⁶
シートの厚さ (mm)	0.143	0.167

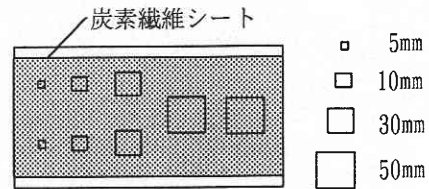


図 2 供試体

に相対的な温度差が生じる。

3. 実 験 概 要

3.1 供試体および炭素繊維シート

図 2 に示すように、コンクリート構造物の側面に、あらかじめ 1 辺が 5, 10, 30, 50 mm、深さ 2 mm 程度の正方形空隙をそれぞれ 2 箇所ずつつけた。この表面に 1 層、3 層、5 層と層数を変化させた炭素繊維シート (2 種類) をエポキシ樹脂を用いてはり付けた。

実験に用いた炭素繊維シートの特性を表 1 に示す。両者の大きな違いは熱伝達率であり 10 倍以上の違いとなっている。また、目付量 (1 m² 当たりの炭素繊維量) はともに 300 g/m² である。

3.2 実験手順

まず、スポットライトを用いて炭素繊維シート表面の人工的な加熱を行い、正常部分と欠陥部分に温度差を生じさせた。その際、炭素繊維シートとスポットライトは約 30 cm 離し、炭素繊維シート全体が均一に加熱されるようにした。

温度の計測は炭素繊維シートを 1 層から 3 層、5 層と層数を変化させ、それぞれに対し 2 回ずつ行った。赤外線画

研究速報
 像はモニター上で確認できるが、画像処理を行うため、フロッピーディスクに加熱終了後から10秒間隔で120秒経過後まで連続してデジタルデータとして記録した。なお、この時の撮影範囲は図2に示されるように炭素繊維シートを貼り付けた供試体全体である。

4. 実験結果

4.1 熱赤外線画像の原画像（一次データ）による検出

炭素繊維シートの層数を変化させたとき、赤外線カメラによって撮影された原画像（一次データ）を写真1(a), (b), 2(a), (b)に示す。それぞれ、写真(a)が高熱伝達率の炭素繊維シート（以下高伝達タイプ）、写真(b)が低熱伝達率の炭素繊維シート（以下低伝達タイプ）である。

まず、写真1についてであるが、これは炭素繊維シートを1層貼り付けたもので、スポットライトで10秒間加熱し、加熱終了より10秒経過後の原画像である。写真1(a)の高伝達タイプでは、50 mm および30 mm の欠陥までは確

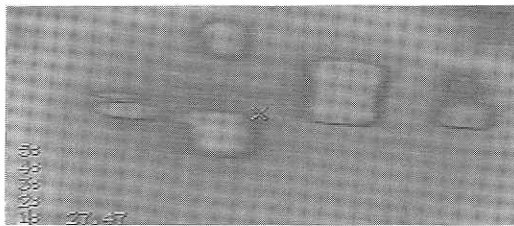


写真1(a) 高伝達タイプ1層 (原画像)

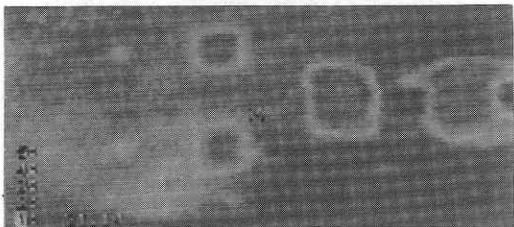


写真1(b) 低伝達タイプ1層 (原画像)

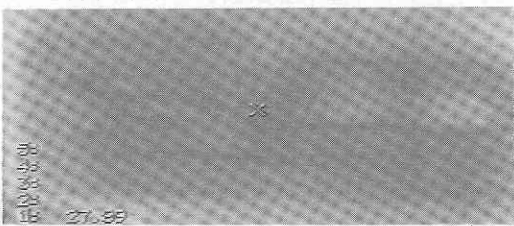


写真2(a) 高伝達タイプ3層 (原画像)

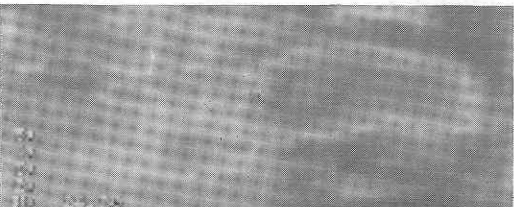


写真2(b) 低伝達タイプ3層 (原画像)

認できたが、10 mm および5 mm は確認が困難であった。下の30 mm の欠陥（写真1(a)中央）の左にも温度がコンクリート構造壁に比べ高いところが見受けられたため、炭素繊維シート表面を目視してみたところ、エポキシ樹脂が付着していた。このエポキシ樹脂により熱容量が増加し、温度が少し高く表れたと思われる。これに対し、写真1(b)の低伝達タイプでは50 mm, 30 mm および高伝達タイプでは確認できなかった10 mm の欠陥まで確認できた。ただ全体的にはどちらもぼやけており、正常部分か欠陥部分かの判断が困難なところが見られた。

次に写真2についてであるが、これは炭素繊維シートを3層貼り付けたもので、スポットライトで10秒間加熱し、加熱終了より10秒経過後の原画像である。写真2(a)の高伝達タイプでは、50 mm および30 mm の欠陥の一部までは確認できたが、全体的にはぼやけておりそのほかの欠陥は確認が困難であった。また、この場合もエポキシ樹脂の影響らしく、欠陥部分以外で温度が高く表れているところが見受けられた。写真2(b)の低伝達タイプでは50 mm および30 mm の欠陥まで確認できた。施工不良のため炭素繊維シートの貼り付けが不十分であり50 mm の欠陥がつかってしまったが、欠陥部分として確認できた。

最後に炭素繊維シートを5層貼り付けた場合であるが、高伝達タイプでは正常部分と欠陥部分に相対的な温度差が生じず50 mm の欠陥でさえ確認が困難であった。スポットライトによる加熱時間を10秒から30秒に変更したが結果は同じであった。これに対し、低伝達タイプでは、50 mm および30 mm の欠陥まで確認できた。

高伝達タイプと低伝達タイプの炭素繊維シートの加熱終了後からの時間経過に伴う正常部分と欠陥部分の温度差を

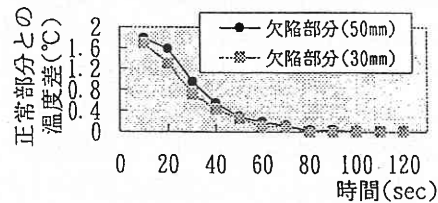


図3 時間経過に伴う正常部分との温度差 (高伝達タイプ)

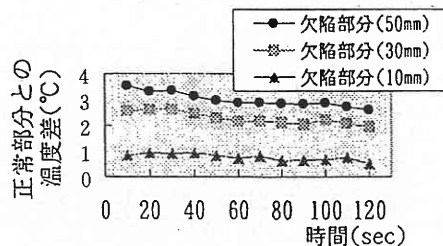


図4 時間経過に伴う正常部分との温度差 (低伝達タイプ)

表 2 信頼確率と t

信頼確率(%)	50	69.2	80	83.3	90	95	97.5	99
t	0	0.50	0.842	1.000	1.282	1.645	1.960	2.054

図 3, 4 に示す. 両者ともに各欠陥部分と正常部分との温度差は, 加熱直後が最も大きく欠陥の確認が容易であった. 高伝達タイプは時間の経過とともに正常部分との温度差が小さくなり, 加熱終了から約60秒を経過すると欠陥部分の確認ができなくなったのに対し, 低伝達タイプでは加熱終了からの時間が経過しても正常部分との温度差はほとんど低下せず欠陥部分が確認できた.

4.2 画像処理による検出

(1) 2 値画像表示法

画像処理手法として, まず2値画像表示する方法²⁾を用いた. これはスポットライトによる加熱をする前の画像(初期熱画像)と加熱後の熱画像との画像間差分処理を行い, 温度変化量を求め, その温度変化量にしきい値を設定して2値表示する方法である. しきい値は温度変化のある部分の画素温度のヒストグラム表示から, 平均値と標準偏差を求め, 次の式(1)を用いて設定した.

$$T_{\text{threshold}} = T_{\text{mean}} - t\sigma \tag{1}$$

- $T_{\text{threshold}}$: しきい値
- T_{mean} : 平均値
- t : 信頼確率に関する係数
- σ : 標準偏差

ここで, しきい値を設定する際, 信頼確率に対する t は表 2 のようになる^{3), 4)}.

計測された温度のヒストグラムは正規分布に従う. t

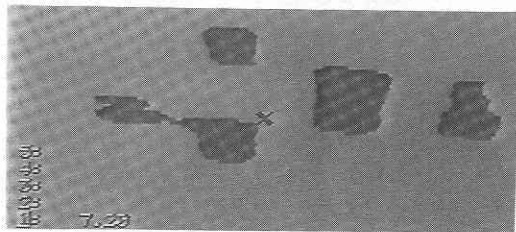


写真3(a) 高伝達タイプ1層 (2値画像表示)

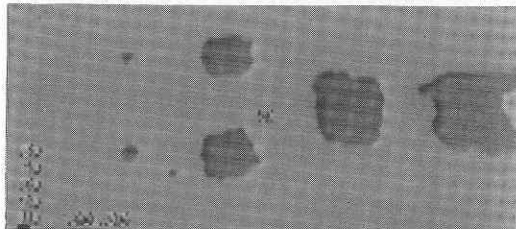


写真3(b) 低伝達タイプ1層 (2値画像表示)

大きくなる, つまり信頼確率が高くなれば, 欠陥部分を含む可能性が大きくなり, 信頼区間は長くなる. 区間が長くなれば平均値と温度の差があるところまで含まれるようになり, 2値画像表示したときに, 欠陥部分付近の温度変化が微妙なところの見分けが困難になってしまう.

炭素繊維シート1層の場合, tはおおよそ1.282から1.645のとき, 炭素繊維シート3層の場合, おおよそ1.0から1.645のときが欠陥部分の確認が容易であった. ヒストグラム基準面の取り方にもよるが, tはあまり大きすぎではいけないようである.

炭素繊維シート1層についてしきい値を設け, 2値画像表示したものを写真3(a), (b)に示す.

写真3(a), (b)はそれぞれ写真1(a), (b)と比べ2値画像表示としたことで, 全体的にぼやけていたものを正常部分と欠陥部分に区別でき, 確認が容易になった. 写真3(a)では少なくとも30 mm以上の欠陥, 写真3(b)では10 mm以上の欠陥は容易に判別できた. なお, このときのtは1.645を用いた.

(2) 区間変換処理法

次に, 熱赤外線画像が0から255のデジタルデータとして与えられることに着目して, 画像処理を行った. 熱赤外線画像のデジタルデータは通常, 温度が低いところは数値が小さく, 高いところは大きくなり, それらのデータを用いて次の式(2)によって画素温度を表すことができる.

$$T_p = T_l + p(i, j) \times SN \tag{2}$$

- T_p : 画素温度 (°C)
- T_l : 設定した下限温度 (°C)
- SN : 設定した感度 (°C)
- $p(i, j)$: デジタルデータ (0~255)

式(2)は切片 T_l , 傾き SN, 横軸の範囲 0~255 の一次関数を意味する. しかし, (2)式では実際の温度計測において, 例えばデジタルデータの値が60~230などであってもその区間のみ温度変化をとらえることはできない. そこで, ある温度からある温度までを強調することが可能である次の式(3)を提案する.

$$T_p' = A \times \text{Log}(P(i, j) / P'(i, j)) + \text{ABS}(A \times \text{Log}(P(i, j) / P'(i, j))) \tag{3}$$

- T_p' : 見かけの画素温度 (°C)

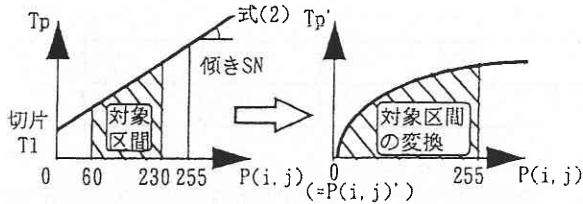


図5 式(3)を用いた対象区間の変更

$P'(i, j)$: 基準点のデジタルデータ
 A : 変数
 ABS : 絶対値

温度変化が知りたいある区間を定めることで、式(3)によりその区間外を0、その区間をあらたに255段階の温度変化で捉えることが可能である(図5)。

ここでは、炭素繊維シート1層、3層および5層(低伝達タイプ)に関して、基準点として式(1)により得られたしきい値を用い区間変換処理を施した熱赤外線画像を写真4(a), (b), 5(a), (b)および6に示す。これらの写真に見られるように、欠陥部分が正常部分から浮かび上がったような感じに見え、前述の2値画像表示と同じように欠陥部分の判定が容易になった。

2値画像表示法を用いた写真3(a), (b)と区間変換処理法を用いた写真4(a), (b), 5(a), (b)および6を比較して、前者が正常部分、欠陥部分の判定のみであったのに対し、後者は正常部分と欠陥部分の判定はもちろん欠陥部分の温度変化をとらえることが可能であり、より優れた手法と言える。高伝達タイプの炭素繊維シート1層では30 mm以上、3層では50 mm以上、低伝達タイプの炭素繊維シート1層では10 mm以上、3層では30 mm以上、5層でも30 mm以上の欠陥が検知できた。

5. ま と め

本報告で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 炭素繊維シートを貼り付けたコンクリート構造壁と空隙などの欠陥部分の温度差を、赤外線カメラを用い広範囲、短時間で測定でき、かつ欠陥位置がおおよそ確認できた。高熱伝達率と低熱伝達率の炭素繊維シートを比較した場合、後者のほうが確認できる欠陥の大きさ、加熱終了後からの時間の長さ、層数などに優れており補修・補強に適する。
- (2) 赤外線カメラによって得られた熱画像にしきい値を設け、2値画像表示することで、欠陥位置をはっきりさせることができた。また、区間変換処理を用いることで正常部分と欠陥部分の判定がより容易になった。

(1996年4月19日受理)

参 考 文 献

- 1) 魚本健人, 加藤 清, 広野 進: コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, 1993.
- 2) 渡辺 正: サーモグラフィ法によるコンクリート施工のモニタリングシステムに関する研究, 博士論文, 1994.
- 3) 村田二郎, 長滝重義, 菊川浩治: 土木材料コンクリート, 共立出版, 1991.
- 4) 伊藤 学, 亀田弘行訳: 土木・建築のための確率統計の基礎, 丸善, 1990.

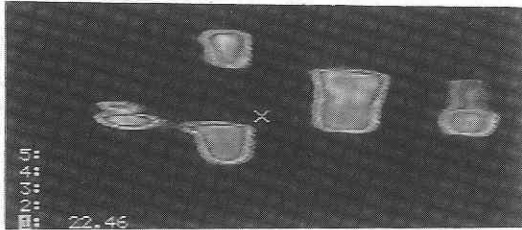


写真4(a) 高伝達タイプ1層(区間変換処理画像)

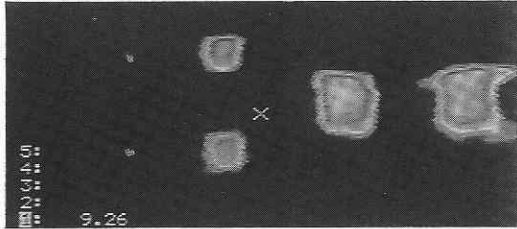


写真4(b) 低伝達タイプ1層(区間変換処理画像)

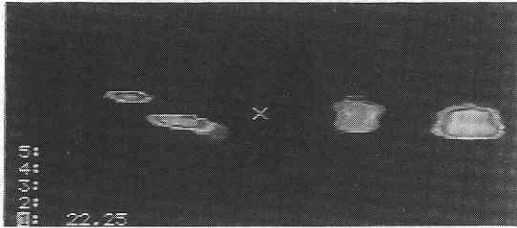


写真5(a) 高伝達タイプ3層(区間変換処理画像)

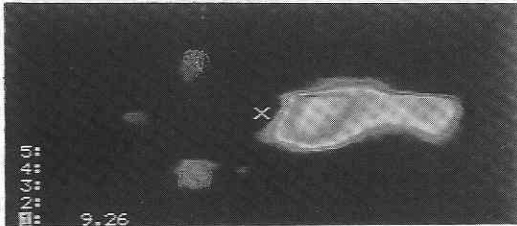


写真5(b) 低伝達タイプ3層(区間変換処理画像)



写真6 低伝達タイプ5層(区間変換処理画像)