

報告 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

相良健一*1・魚本健人*2

要旨：RC 構造物の耐力を向上させる方法として、炭素繊維シートを巻き付け、あるいは、貼り付けるなどの方法がある。本報告では、炭素繊維シートをコンクリート構造壁に貼り付け後、その空隙などの欠陥が検出可能であるかを炭素繊維シートの枚数、欠陥の大きさを変え、赤外線カメラによる熱赤外線画像を用いて検討を行った。その結果、温度変化あるいは分布を測定することにより、短時間で広範囲にわたり空隙などの欠陥の位置を2値画像表示法および区間変換処理法によりおおよそ推定することができた。
キーワード：炭素繊維シート、熱赤外線画像、温度分布、2値画像表示、区間変換処理

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剥離していたのでは、その効果を期待することは出来ない。

赤外線カメラは気象、医療、宇宙、工業など多くの分野で、また土木・建築分野においてもコンクリート構造物の外壁のタイルやモルタルなどの剥離や浮き上がり部の検知手段として利用され高く評価されている。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、あるいは剥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。

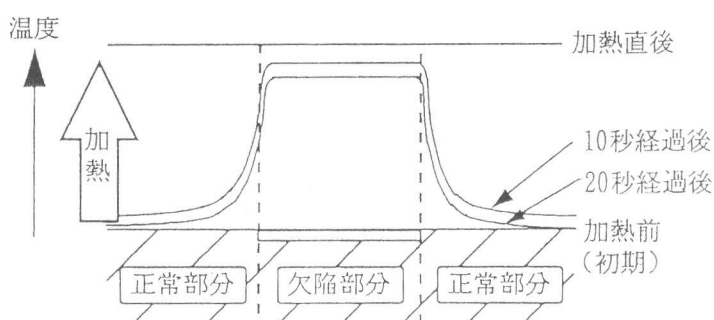


図1 相対的な温度差の生じる過程

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、両者に相対的な温度差が生じる。

ここでは画像範囲の温度および放射率を一様とし、得られた画像の中に生じた相対的な温度差を解析し欠陥部分の検出を行った。

*1 東京大学大学院、工学系研究科土木工学専攻（正会員）

*2 東京大学教授、生産技術研究所、工博（正会員）

3. 実験概要

3. 1 供試体

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5,10,30,50mm、深さ2mm程度の正方形空隙をそれぞれ2箇所ずつ設けた。この表面に1層、3層、5層と枚数を変化させた炭素繊維シート（

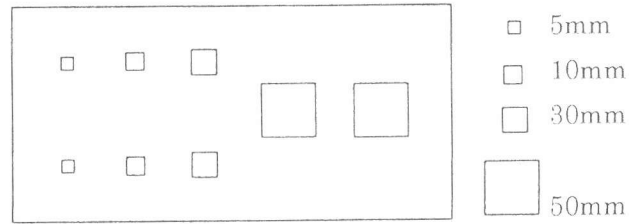


図2 供試体

1m²当たりの炭素繊維量：300g)をエポキシ樹脂を用いて貼り付けた。なお、その際、空隙を設けるために、薄い膜を欠陥表面に貼り付けエポキシ樹脂の注入に注意した。

3. 2 実験手順

まず、図3に示すように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、欠陥部分と正常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30cm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。

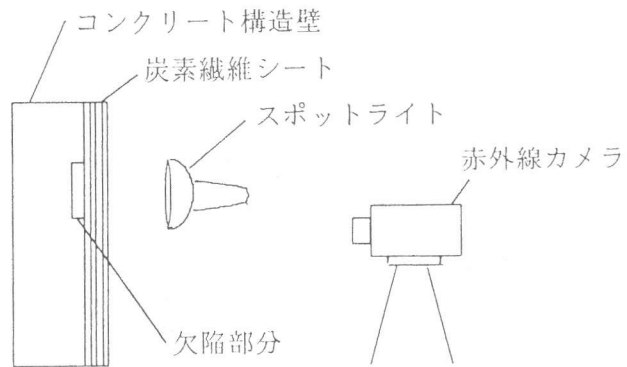


図3 実験方法

赤外線カメラはコンクリート構造物壁面の鉛直方向に正対させ、全体を画枠に納めるため炭素繊維シート表面から約1m40cm離して設置した。次に、輪郭や温度変化が明瞭になるように赤外線カメラの焦点合わせを行った。

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

実験に使用した赤外線カメラの様子は表1に示すとおりである。

表1 赤外線カメラの様

設定温度範囲	-35~950℃
最小検知温度差	0.1℃
設定感度	0.01℃以上
撮影距離	20cm以上
検知波長帯	3~5.4 μ
瞬時視野角	2.2mrad (0.12度)
観測視野角 (縦×横)	10×15度
赤外線検知器	InSb、10素子アレイ
検知器の冷却方式	アルゴンガス or 窒素ガス
走査線数	100本
表示画素数 (水平×垂直)	51200画素 (256×200)

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

炭素繊維シートの枚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1~3に示す。なお、撮影範囲は図4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。

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。50mmおよび30mmの欠陥までは確認できたが、10mmおよび5mmは確認が困難であった。

下の30mmの欠陥(写真1中央)の左にも温度がコンクリート構造物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。

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。50mmおよび30mmの欠陥の一部までは確認できたが、全体的にぼやけており、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。

最後に、写真3についてであるが、これは炭素繊維シートを5層貼り付けたものである。この場合、50mm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。

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

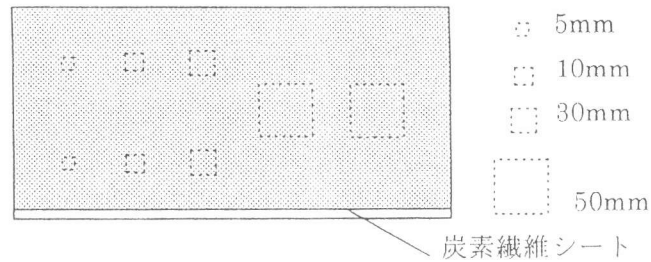


図4 撮影範囲

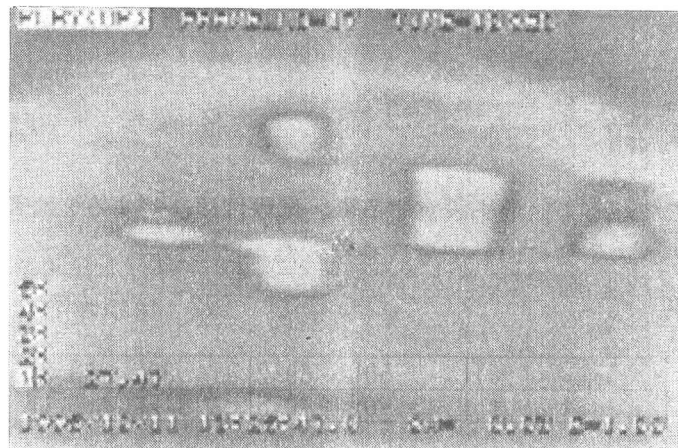


写真1 炭素繊維シート1層(原画像)

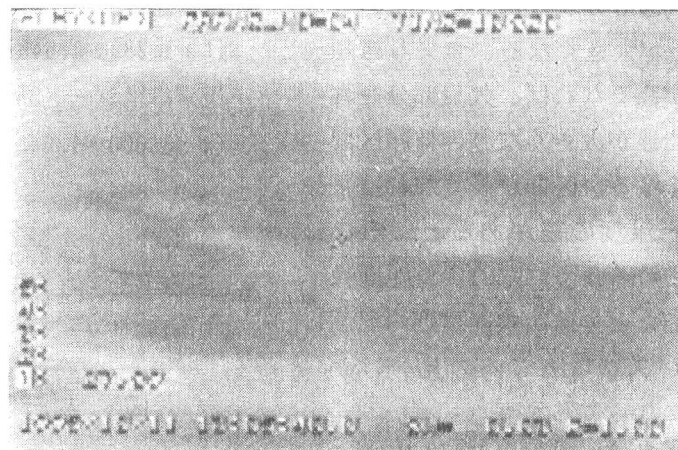


写真2 炭素繊維シート3層(原画像)

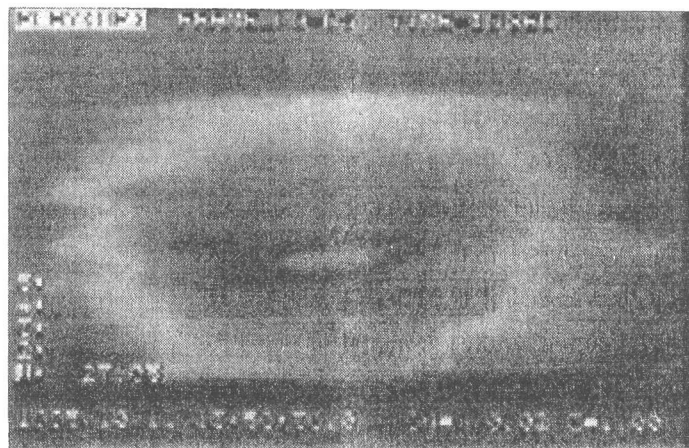


写真3 炭素繊維シート5層(原画像)

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。

$$T_{\text{threshold}} = T_{\text{mean}} - t \sigma \quad (1)$$

ここに、 $T_{\text{threshold}}$: しきい値 t : 信頼確率に関する係数
 T_{mean} : 平均値 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]。この t が変化したときの影響について考察を行った。

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	0.5	0.842	1	1.282	1.645	1.96	2.054

計測された温度のヒストグラムは、図 5 のような正規分布に従う。 t が大きくなる、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。

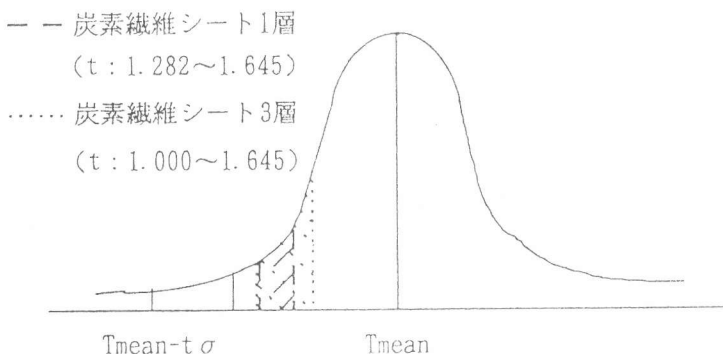


図5 欠陥部のヒストグラムおよびしきい値

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 層の場合は、おおよそ 1.0 から 1.645 のときが欠陥の確認が容易であった（図 5）。ヒストグラム基準面の取り方にもよるが、 t はあまり大きすぎてはいけないようである。

炭素繊維シート 1 層および 3 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 4 および 5 に示す。

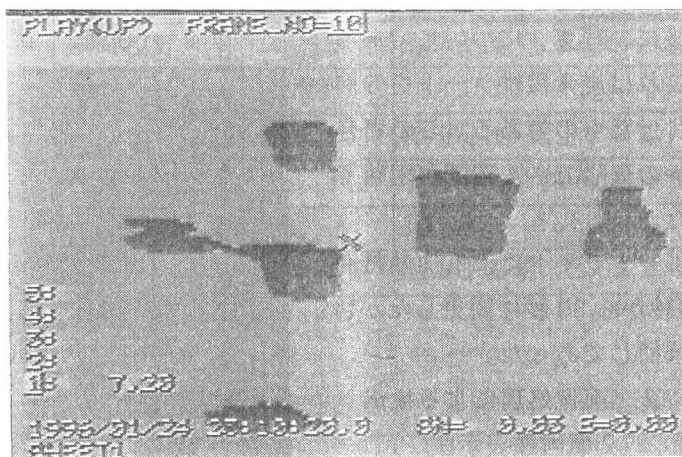


写真 4 炭素繊維シート 1 層（2 値画像表示）

写真4はしきい値写真1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欠陥部分と正常部分に区分けでき、確認が容易になった。少なくとも、30mm以上の欠陥は容易に判別できる。なお、このときのtは1.645を用いた。

写真5についても写真2と比べ全体的なぼやけがはっきりし、50mmの欠陥は、より判定しやすくなった。なお、このときのtは1.282を用いた。



写真5 炭素繊維シート3層 (2値画像表示)

ただ、ここでもエポキシ樹脂の影響か、50mmの欠陥の左に正常部分より温度が高い部分が見られた。このように高温部分を単純に欠陥部分と判断すると誤った判定をすることになるので、さらにこの手法を改良する必要があると考えられる。

(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。

$$T_p = T_l + p(i,j) \times SN \quad (2)$$

ここに、 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の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。

$$T_p' = A \times \log_{10} (P(i,j)/P'(i,j)) + \text{ABS} (A \times \log_{10} (P(i,j)/P'(i,j))) \quad (3)$$

ここに、 T_p' : 見かけの画素温度 (°C) A : 変数
 $P'(i,j)$: 基準点のデジタルデータ 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6)。ここでは、炭素繊維シート1層および3層に関して、

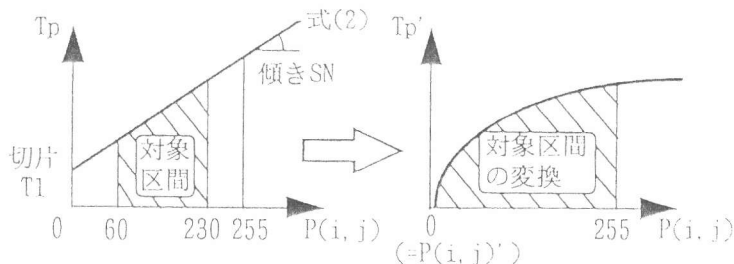


図6 式(3)を用いた対象区間の変換

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行った。

これらの処理を施した後の熱赤外線画像を写真6および7に示す。写真6および7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4および5と区間変換処理法を用いた写真6および7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、後者は正常部と欠陥部分の判定はもちろん欠陥部分の温度変化を捉えることが可能であり、より優れた手法と言える。

5. まとめ

本報告で得られた結果を以下にまとめると。

- (1) 炭素繊維シートを貼り付けたコンクリート構造壁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、かつ欠陥位置のおおよその推定ができた。炭素繊維シート1層では30mm以上、3層では、50mm以上の欠陥について検知できた。
- (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。

[謝辞]

本研究の実験は三菱化学(株)の総合研究所内において行ったものであり、谷木謙介氏、藤田崇氏をはじめ関係者各位に感謝の意を表します。また、解析などに関し、ご助言を頂いてた東京大学加藤佳孝助手、山口明伸氏に感謝の意を表します。

[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6 炭素繊維シート1層(区間変換処理画像)



写真7 炭素繊維シート3層(区間変換処理画像)