

論文 RC 構造物の鉄筋腐食性状評価における熱画像処理方法の検討に関する研究

中央大学理工学部土木工学科 学生会員 ○今井 嵩弓

中央大学理工学部土木工学科 学生会員 矢寄 早織

中央大学理工学部都市環境学科 正会員 大下 英吉

西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 正会員 林 詳悟

1. はじめに

著者らはコンクリート内部に存在する剥離，空洞，鉄筋の腐食といった各種劣化現象を非破壊かつ非接触によって定性的かつ定量的評価を可能とする非破壊検査システムの構築に着手している^{1)~3)}。システムの概要は，鉄筋コンクリート構造物内部の鉄筋を電磁誘導法によって強制的に加熱させ，コンクリート表面の温度性状を赤外線サーモグラフィで測定した熱画像を処理し，その温度の値や分布性状からコンクリート内部における上述した各種劣化現象を評価するというものである。この際，熱源となる鉄筋を如何に均一に加熱するかが，本手法による測定精度に通じることとなる。

電磁誘導の特性上，コイル形状によっては加熱むらが生じるため，既往の研究においてはまず，加熱むらを生じさせず加熱効率も最適となるコイル形状を決定した。そして，一方向に配筋された鉄筋コンクリート構造物において，鉄筋の温度制御に対する有効性が確認された。しかしながら，電磁誘導加熱による加熱効率はかぶりと鉄筋量に大きく依存するため，主筋と配力筋あるいはせん断補強筋の結束箇所では結束線の影響も加わり非常に高温となる問題があった。さらに，鉄筋同士で格子が形成されると，渦電流に加えて格子を1周する電流が生じ（以下，ループ電流と称す），一様な鉄筋温度の制御が困難となった。それにより，鉄筋上で発生した加熱むらがコンクリート表面に伝播することで，格子部直上における表面温度性状に影響を及ぼし，鉄筋の腐食性状評価の妨げとなるという問題が生じた¹⁾。

本研究では，上述した鉄筋の結束箇所における鉄筋に発生する加熱むらによる影響を解消し，鉄筋腐食性状をより鮮明に可視化することのできる熱画像処理方法を適用するとともに，その有用性について検討する。

2. 本システムにおける画像処理方法⁴⁾

従来の本システムにおける熱画像は，画像処理を行っていない元データの状態で解析を行っていたが，電磁誘導の特性によって発生する鉄筋の加熱むらの影響により，鉄筋格子等の構造物において鉄筋の腐食性状評価の精度に問題があった。

林等⁴⁾は，赤外線サーモグラフィを用いたコンクリート表面の浮き・剥落部の高精度な検出を行う手法として，熱画像に対する画像フィルタ処理に関する研究を実施し熱画像に面的な画像フィルタ処理を行うことの有用性を示している。本研究においては，鉄筋の加熱むらによる影響を除去することを目的として，林等の手法を鉄筋軸方向に対し線的な画像フィルタ処理を行う。

本章では，本システムを用いて撮影した熱画像に対し画像フィルタ処理を行うことで加熱むらによる影響を軽減するための画像フィルタ処理方法のアルゴリズムについて論じる。

2.1 熱画像上の加熱むらの除去

鉄筋の加熱むらがコンクリート表面の熱画像に及ぼす影響を除去するために，温度分布の移動平均を求めて，対象ピクセルの温度を引算することとした（以下，強調指標）。この指標を用いると，コンクリート表面に及ぼす鉄筋の加熱むらの影響を軽減することが可能となる。強調指標を画像上で行と式(1)で表現できる。

$$g(i, j) = \sum_{j=n}^{N-n} \sum_{i=n}^{M-n} [f(i, j) - \mu(i, j)] \quad (1)$$

ここで，

入力画像： $f(i, j)$

出力画像： $g(i, j)$

$$\mu(i, j) = \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{l=-n}^n \sum_{k=-n}^n f(i+k, j+l)$$

n = 撮影距離によって変更する。

住所：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27，TEL：03-3817-1892，FAX：03-3817-1803

キーワード：非破壊検査，電磁誘導，鉄筋腐食，鉄筋格子，画像処理

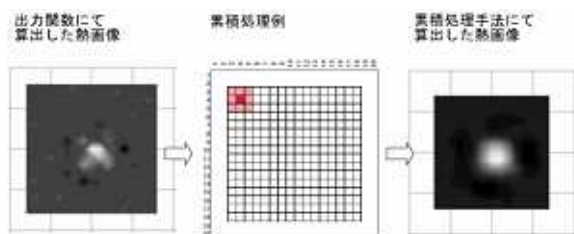


図 - 1 ピクセル間の補間手法（累積処理の利用）

2.2 検出素子間のばらつき軽減方法

(1) 出力関数を用いた温度変化部の強調

赤外線サーモグラフィカメラの検出素子間の測定誤差や測定対象物のばらつきがある場合、温度変化を捉えにくくなる。すなわち、ばらつきが大きくなると温度変化の抽出が困難となるため、出力関数を用いてばらつきを除去することとした。なお、この関数にはロジスティック関数が適している。

(2) ピクセル間の補間方法

赤外線サーモグラフィカメラの画素数が少ないとピクセル間を補間することが必要となる。このため、ある範囲の累積値を1画素情報に置き換える手法を採用した(図-1)。この手法は温度分布情報から、図中の網掛けの3×3画素部分の温度差を累積し、この範囲の中心画素である画素番号(4,4)の温度情報として温度分布図を再作成したものである。この処理を行うと、熱画像におけるコンクリート表面の温度性状のばらつきを軽減することが可能となる。

3. 画像処理の適用によるコンクリート表面温度性状の可視化

前章では熱画像に対して適用する画像フィルター処理のアルゴリズムについて論じた。本章では、既往の研究において得られた熱画像に対して、前章で論じた画像フィルター処理を適用するとともに、その有用性について検討する。

3.1 鉄筋が全面腐食した試験体

本節では、全面に渡って鉄筋が腐食したRC部材に本システムを適用して得られた熱画像に対して、画像処理を行うことで、より鮮明な鉄筋腐食性状の可視化が可能であるかを検討する。

(1) 実験概要

実験概要を図-2に示す。かぶりを30mmとした試験体を対象として本システムを適用し、コンクリート

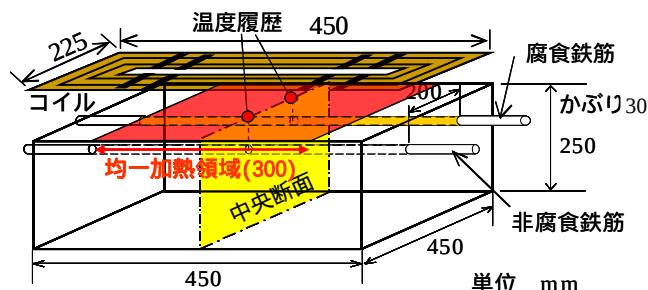
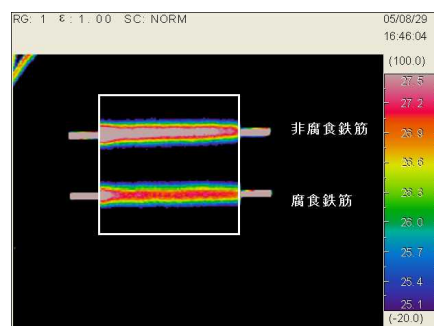
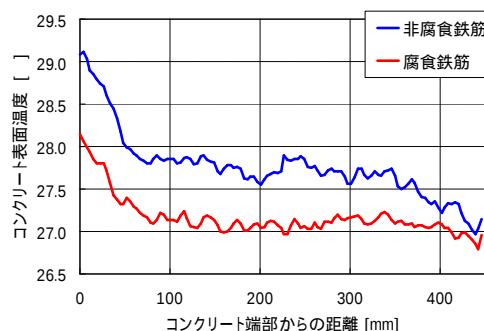


図 - 2 試験体の形状寸法



(a) コンクリート表面の熱画像



(b) 鉄筋直上のコンクリート表面温度分布

図 - 3 コンクリート表面の温度性状

(加熱停止 180 秒後)

表面の温度性状を確認した。鉄筋はD16(SD295)であり、かぶり30mmの位置に200mmの間隔で2本配筋し、一方は軸方向全長に渡って比較的均一な腐食を生じた腐食鉄筋で、もう一方は非腐食鉄筋である。

鉄筋の腐食方法に関しては、電食によって腐食させると腐食ひび割れが発生し、ひび割れの持つ断熱効果によって、コンクリート表面温度性状に影響を及ぼす。そのため、鉄筋を大気中に暴露することによって腐食させ、所定の位置に設置した後にコンクリートを打設することにより作成し、腐食ひび割れの無い状態で腐食生成物の加熱特性を確認した。

(1) 熱画像フィルター処理の適用

図-3(a)および(b)に試験体の加熱停止180秒後のコンクリート表面の熱画像と鉄筋直上におけるコンクリート表面温度分布を示す。同図(a)における白枠は試験

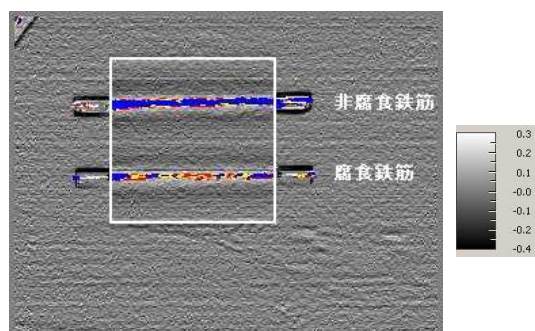


図 - 4 画像処理後のコンクリート表面の熱画像
(K30-C0.66 試験体 加熱停止 180 秒後)

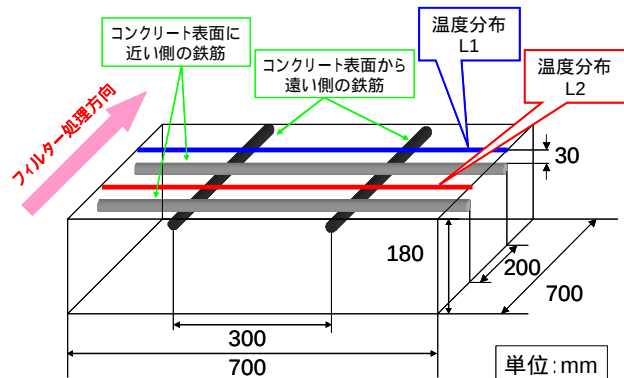
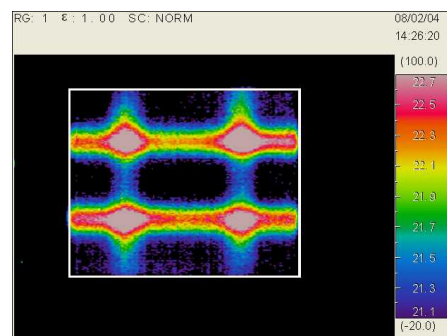


図 - 5 試験体の形状寸法

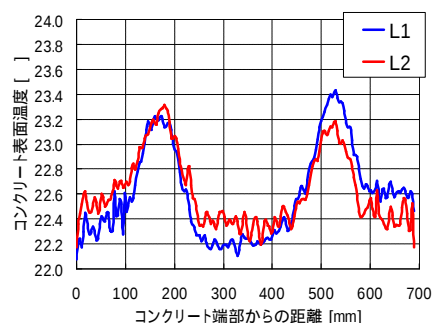
体上面であり，その領域外の高温部分は，露出させた鉄筋である。

腐食鉄筋および非腐食鉄筋直上のコンクリート表面温度を相対的に比較すると，腐食鉄筋直上では温度が低くなっている。これは，腐食性生物の要する断熱材的效果によるもので，その影響によりコンクリート表面の温度上昇量が低くなることがわかっている。一方，鉄筋 1 本の温度性状に着目すると，いずれの鉄筋も左側において高温，右側において低温となる分布を示しており，コイルによる加熱むらが生じている。このような温度性状も測定精度に影響を及ぼす要因である。

次に，図 - 3(a)に示した熱画像に対して，2 章に示した画像処理手法を鉄筋軸直交方向に適用した結果を示す。図 - 4 は図 - 3(a)の熱画像に画像処理を適用した画像である。なお，判定画像では健全な状態にある鉄筋を青で表示し，鉄筋の腐食率の進行度合いに伴って，黄と赤で表示している。図 - 3(a)の処理前の熱画像と図 - 4 の処理後の熱画像を比較すると，鉄筋の腐食領域がより鮮明に可視化され，非腐食鉄筋と腐食鉄筋の差異がより明確になっていることがわかる。さらに，図 - 3(a) において確認された加熱むらの影響がほぼ除去されていることがわかる。このことから，熱画像に画像



(a) コンクリート表面の熱画像



(b) 鉄筋直上のコンクリート表面温度分布

図 - 6 格子部上の表面温度が最高となる時点での温度性状

処理を適用することは有用性があると言える。

3.2 鉄筋が格子状に配筋された試験体

前節では，画像処理によって鉄筋腐食の有無を明確にすることが可能であることが示された。しかし，実際の構造物においては，格子状に鉄筋が配筋され，鉄筋同士が結束している箇所が存在する。既往の結果から，他の領域と比べ，結束箇所では温度上昇量が非常に高く，腐食性状評価に影響を及ぼすことが確認されている。したがって，本章では鉄筋格子において格子部直上が高温になった熱画像に対し画像処理を行い，画像処理を行うことの有用性について検討する。

(1) 実験概要

図 - 5 に試験体の形状寸法を示す。格子鉄筋の格子部の影響を検討するために，鉄筋は全て D16(SD295)の健全鉄筋を使用し，コンクリート表面に近い側の鉄筋のかぶりが 30mm，格子間隔が 200 × 300mm である。

(2) 熱画像フィルター処理の応用

鉄筋の格子部直上のコンクリート表面温度が最高となる時点での熱画像と温度分布をそれぞれ，図 - 6(a)および(b)に示す。同図から，格子部直上のコンクリート表面において，温度が非常に高くなり，鉄筋中心部と格子部直上の表面温度差は最大で約 1.2 である。

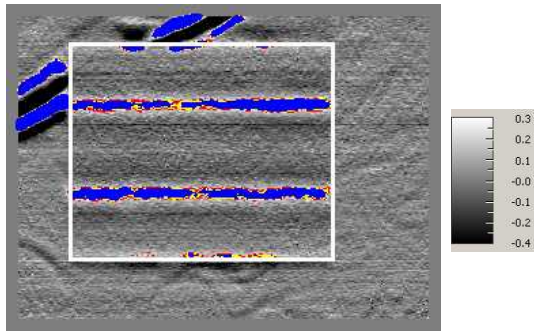


図 - 7 フィルター処理後の経過時間差分画像

これは、鉄筋格子部における鉄筋量が多く、結束線の影響も加わって電磁誘導の特性から鉄筋の温度上昇量が大きくなるためである。さらに、鉄筋に発生する渦電流が格子を1周するループ電流が発生するため、接触抵抗の影響により発熱することがわかっている。

本節では撮影した熱画像に画像フィルター処理を適用し、特に鉄筋格子部における高温部分の影響を軽減可能かどうかに着目した検討を行った。熱画像に適用する画像フィルター処理の流れとして、前節までの処理のみでは、結束箇所の影響が除去されないため、元画像から経過時間差分画像を作成してから、その差分画像に対し画像フィルター処理を行った。

経過時間差分画像の作成方法に際しては、図 - 6(a)の画像を同図の10分後の画像から差し引くことにより、一定時間経過後の温度低下量が出力された熱画像を作成した。それにより画像上の全体的な温度差を小さくすることで、格子部とその他の領域における温度差も小さくなる。それを利用し鉄筋上の加熱むらを軽減させる。

図 - 7に示した画像は、図 - 6(a)の格子部のコンクリート表面温度が最大となる時点の熱画像により、温度最高点から10分後の画像を除算し、前述の画像フィルター処理を行った熱画像である。なお、図中の白枠は試験体上面に対応している。

コンクリート表面に近い側の鉄筋に着目してフィルター処理を適用したことにより、コンクリート表面から遠い側の鉄筋の影響が無くなっている。また、鉄筋がほぼ一様に健全であると判定されていることから、鉄筋の腐食性状評価を行うことができる可能性があると考えられる。

以上のことから、かぶり側の鉄筋軸直交方向に画像フィルター処理を適用することで、鉄筋格子の格子部

において高温となる部分の影響を軽減することは可能であると考えられる。このことはすなわち、鉄筋格子における鉄筋腐食性状評価において本画像処理技術が有用であることを示している。

4. まとめ

本研究では、本システムを用いて計測した熱画像に対し、画像フィルター処理を行うことで、鉄筋腐食の有無をより明確に可視化し、その適用性を評価した。以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) コンクリート中にかぶりが30mmで全面に渡って腐食した鉄筋を配筋した場合、画像フィルター処理を行うことで、鉄筋の加熱むらを軽減することが可能である。
- (2) コンクリート中に健全鉄筋を格子状に配筋した場合、コンクリート表面温度が最大になる時点からの経過時間差分画像を作成し、その画像に対して画像フィルター処理を行うことで、鉄筋格子部の高温となる箇所を取り除くことが可能である。

参考文献

- 1) 梅原 稔之, 大下 英吉: 電磁誘導加熱を用いた各種非破壊検査における鉄筋加熱むら解消法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1143-1148, 2008
- 2) 堀江 宏明, 尾崎 勝成, 谷口 修, 大下 英吉: 熱画像処理に基づいたコンクリート内部の鉄筋網の鉄筋腐食性状評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.685-690, 2007
- 3) 大下 英吉, 堀江 宏明, 長坂 慎吾, 谷口 修, 吉川信二郎: 電磁誘導加熱によるコンクリート表面温度性状に基づいたRC構造物の鉄筋腐食性状に関する非破壊検査手法, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.1, pp.76-92, 2009
- 4) 林 詳悟, 橋本 和明, 明石 行雄: 赤外線サーモグラフィ法における熱画像診断支援システムの提案, 土木学会年次学術講演会講演概要集論 第6部, Vol.65No.7/VI-159, pp.317-318, 2010