

論文 赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート損傷の検出精度向上

林 詳悟*1・橋本 和明*2・明石 行雄*3

要旨：赤外線サーモグラフィ法は特異な温度変化部を浮き・剥離と判断する。検出精度を高めて、コンクリートの剥離や損傷予測が可能となれば、コンクリート片が落下した場合のリスクや、構造物の損傷程度から、点検や補修の優先順位をつけて効率的に管理することが出来る。本論文は、損傷部の見逃しや誤検出など、従来の赤外線サーモグラフィ法の問題点を明らかにするとともに、その対応方法として、熱画像から損傷領域を強調させる画像フィルター処理方法と、処理画像の特徴量を基に、温度変化部の損傷度の指標としての損傷予測確率を推計する統計解析手法の検討を行う。この技術を用いることにより、検出精度の向上と、客観的な損傷予測指標を得ることが可能になる。

キーワード：赤外線サーモグラフィ法, 非破壊検査, コンクリート表面, 画像フィルター処理, 画像認識,

1.はじめに

生体・医用業界では、マンモグラフィ(乳房X線画像), 胸部X線画像, などの病変領域の検出において, 医師の画像診断を支援するシステムが提案されている。具体的には, 画像処理により, 病変領域を強調させて, 病変部位の良悪性の鑑別指標(予測確率など)の提示や, 病変領域の見逃し防止を支援している。ただし, 最終の診断は必ず医師が行うものであり, 自動診断ではない¹⁾。

赤外線サーモグラフィ法(以下, 赤外線法という)においても調査員が, 浮き・剥離部の領域を見逃したり, 誤検出したりする。見逃す原因は, 赤外線法の技術的な問題とヒューマンエラーの2種類存在している²⁾³⁾。

本研究は, 生体・医用業界の画像診断システムを参考に, 熱画像を対象にした画像診断システムの検討を行う。具体的な内容は, 浮き・剥離領域の熱画像を強調させる画像フィルター処理を行う。浮き・剥離領域をリアルタイムに強調させることで, 調査員の見逃し防止に寄与させる。さらに, 誤検出を防止するために, 強調処理された浮き・剥離領域の特徴量から鑑別指標(予測確率)を算出し調査員に提示する。算出方法は, 上記特徴量と打音点検による損傷状態が既知なデータ(以下, 教師データ)を基に統計処理を行い判別式と予測確率を算出し, 調査員に提示するものである。統計処理に使用したソフトは IBM の Modeler であり, 解析方法はロジスティック回帰とニューラルネットワークとした。教師データは 2000 件の打音結果と熱画像を使用した。

本論文は, 調査員が見逃す原因となる赤外線法の技術的な問題点を紹介するとともに, 点検・補修の優先度の判断を目的として, 熱画像を対象としたコンクリート剥

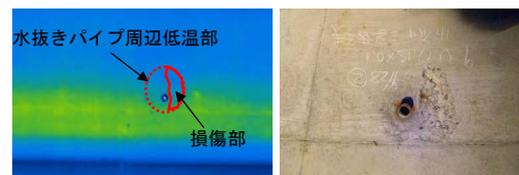
落・損傷予測確率を算出する画像診断技術と, その活用方法の提案を行うものである。

2.赤外線調査の技術的問題点

2.1 橋梁構造物の温度ムラ

(1)周囲の温度変化による影響

写真-1は, 橋梁張出し部に施工された水抜きパイプ周辺に発生した損傷部を撮像した事例である。この事例は, 周囲の温度変化に気を取られ, 熱画像上の低温部をすべて水抜きパイプによる影響と誤認識する恐れがある。そのため, 水抜きパイプ周辺に潜んでいる損傷部を見落とす危険性が高い。



a) 熱画像

b) 打音結果後

写真-1 張出部の熱画像と打音結果後の写真

(2)構造物の温度勾配による影響

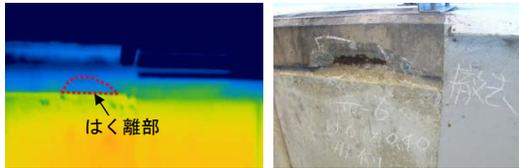
コンクリート構造物は部材厚が均一でないため, 太陽光等の影響で部材の厚い部分と薄い部分で温度勾配が発生する¹⁾。構造物自体が持つ温度勾配の中に存在する損傷部の見極めは, 調査経験者であっても非常に困難である。写真-2に橋梁の温度ムラが原因で見逃した例を示す。コンクリート橋梁の床版張り出し部にVカットをした水切り部(雨水が桁部に浸透しないように横方向に

*1 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 土木事業本部技術部技術課主査 (正会員)

*2 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 土木事業本部技術部技術課課長 (正会員)

*3 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 土木事業本部長 (正会員)

溝を入れる構造)は、雨水を流す構造となっているため、水切り部直下の鉄筋が腐食・膨張する。この水切り部は張出し部の端部に施工される。調査員が赤外線法で水切り部の中にある浮き・剥離領域を診断する場合、温度ムラが常に発生するため、見逃す可能性が高い。



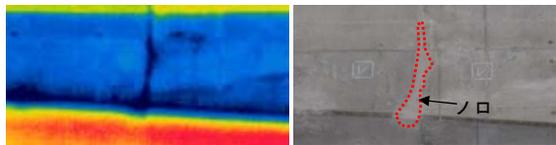
a) 熱画像 b) 打音結果後
写真－ 2 水切り部の熱画像と打音結果後の写真

2.2 誤検出の発生事例

橋梁表面には、雨水の浸透等による遊離石灰の付着や、施工時の異物付着が存在する。赤外線法は、コンクリート表面状態で、健全部を欠陥と誤検出する。平成 20 年度に調査した結果から誤検出した事例を紹介する。

(1)健全で表面状態がノロ (t=2~5mm) 付着の熱画像

施工時に型枠目地などに付着したノロは、厚さが 2~5mm であるため、赤外線法では、型枠目地に沿った細長い温度変化として明瞭に検出される。(写真－ 3)



a) 熱画像 b) 近接写真
写真－ 3 健全部を誤検出したノロ

(2)かぶり部に異物混入の熱画像

赤外線法では、コンクリート表面に付着した異物を浮き・剥離部と誤検出する。異物の熱伝導率が健全部のコンクリートと異なると特異な温度変化として検出する。写真－ 4 は、コンクリートかぶり部分に木片が混入している熱画像と近接写真である。



a) 熱画像 b) 近接写真
写真－ 4 健全部を誤検出した異物混入箇所

3.熱画像における画像フィルター処理技術

赤外線カメラで撮像した熱画像を対象に、画像フィルター処理を行うことで、浮き・剥離領域のみを自動的に

抽出させる技術の検討を行う。

3.1 熱画像の画像フィルター処理方法

(1)画像フィルター処理

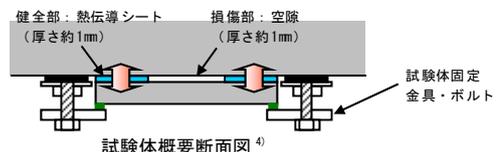
式(1)に示すとおり、コンクリート構造物自体が持つ温度勾配を除去するために温度分布の移動平均を求めて、対象 pixel の温度を引算する。入力画像を $f(i, j)$ とし、出力画像を $g(i, j)$ とする。式(1)中の、 $u(i, j)$ を式(2)に示す。式(2)では、 n の設定を 300mm とした。 n を 300mm 以上にすると、小さな温度ムラを強調し、誤検出の確率が高くなる。本論は、式(1)で求めた値を強調指標という。この指標を用いるとコンクリート構造物が温度勾配を持っても損傷を検出することが可能となる。また、構造物の温度勾配に影響を受けない。ここで、熱画像の 1pixel が、10 mm×10mm 以下になるように、撮影距離を勘案しながら、望遠レンズ等を使用して撮像することが必要である。

$$g(i, j) = f(i, j) - u(i, j) \quad (1)$$

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

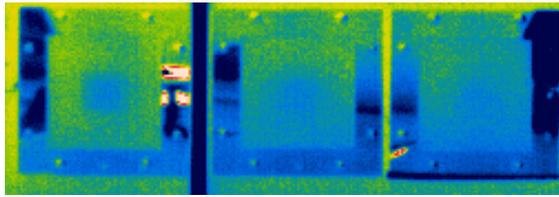
(2)赤外線カメラ別の画像フィルター処理

筆者らは、模擬的に浮き・剥離部を想定した試験体を提案している⁴⁾(写真－ 5)。この貼付け型試験体は、左から $t=10$ mm, $t=20$ mm, $t=30$ mm であり、ひび割れ深さが表面から 10 mm, 20 mm, 30 mm の浮きを想定したものである。写真－ 6 に示した熱画像を対象に画像フィルター処理を行う。画像処理は式(1)を使用して画像化した(写真－ 7)。写真－ 7 中の、3 値化させた赤、黄、青の閾値は、式(1)で求めた強調指標の値を基に、0.11 以上を赤、0.11 未満 0.08 以上の区間を黄色、0.08 未満~0.04 以上を青とした。この閾値を利用すると、10 mm 奥のひび割れが赤、20 mm 奥のひび割れ黄、30 mm 奥のひび割れが青となる。



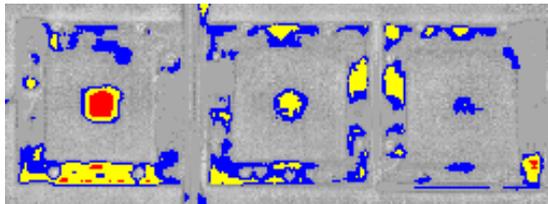
a) $t=10$ mm b) $t=20$ mm c) $t=30$ mm

写真－ 5 貼付け型試験体



a) t=10mm b) t=20 mm c) t=30mm

写真－ 6 貼付け型試験体の熱画像

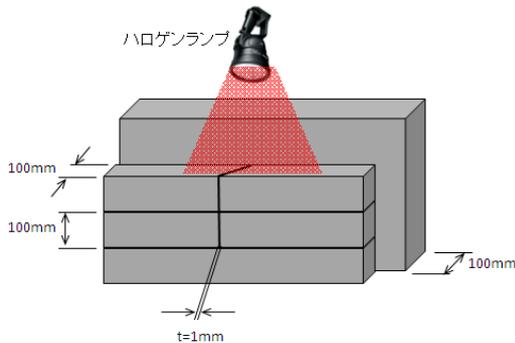


a) t=10mm b) t=20 mm c) t=30mm

写真－ 7 貼付け型試験体の画像処理結果

(3)画像処理の有効性確認

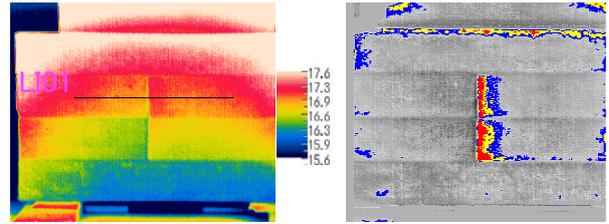
式(1)の有効性を確認するために実験を行った。実験概要を図－ 1 に示す。100mm×100mmの断面のコンクリート柱 3本を積み重ねて、上 2本のコンクリート柱は角度 45度で切断して t=1mm ずらして配置した。そして、その上方からハロゲンランプで 30 分間照射することで、コンクリート柱に温度ムラを発生させた。



図－ 1 実験概要 (100mm 角柱に温度ムラを発生)

ハロゲンランプで撮影面を温めた後、赤外線カメラ (InSb) で撮像した。熱画像より、上部が下部より温度が 4℃高い (写真－ 8 a))。また、ひび割れの個所が若干、温度が低い状態にある。

しかし、コンクリート柱に温度ムラが発生しているため、浮いている領域を熱画像から、判別することができない。熱画像を基に式(1)を用いて画像処理を実施した。強調指標の棄却域を 0.11 以上を赤、0.11 未満 0.08 以上の区間を黄色、0.08 未満～0.04 以上を青とした。画像処理結果を写真－ 8 b) に示す。



a) 熱画像

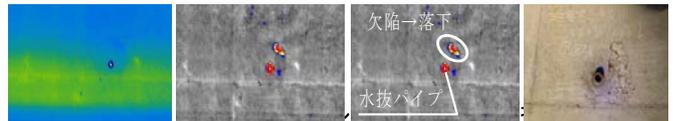
b) 画像処理

写真－ 8 実験結果

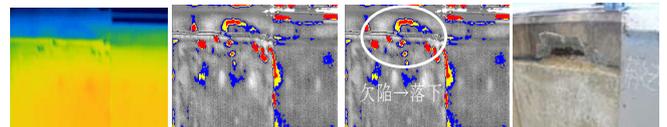
画像処理を実施すると、浮きの領域が明確に検出できる。赤色で示した領域が表面から深さ 10mm 未満のひびが介在しているところである。黄色と青色の領域が、それぞれ、20mm と 30mm のひびが介在している領域となる。このように、コンクリート柱の温度ムラを除去することができると、浮き領域が検出できる。

(4)橋梁構造物を対象とした画像処理

写真－ 1 と写真－ 2 の画像処理結果を写真－ 9 と写真－ 10 に示す。張出し部と水切り部の熱画像を解析したものである。この結果から、張出し部にある欠陥は、水抜パイプと欠陥部のみ赤色で表示される。写真－ 10 の水切り部は、赤の領域が散在しているが、壁高欄部の反射と補修跡と欠陥部となっている。写真－ 9 の張出し部は、周辺のコンクリート温度勾配を除くことができたので、欠陥部の検出が容易となる。しかし、水切り部については、コンクリート表面に遊離石灰や補修跡が散在しているため、欠陥部だけが強調されない。しかし、欠陥部は検出されているので、見逃す危険性は低減される。ただし、画像処理だけでは前項で説明したコンクリート表面状態が原因で誤検出している事象の対応はできない。



写真－ 9 張出し部の画像処理結果



a) 熱画像

b) 画像フィルター処理

c) 拡大写真

写真－ 10 水切り部の画像処理結果

3.2 誤検事例と形状特徴の計測

(1)打音結果と熱画像の関係

打音結果と解析画像を整理すると赤の位置、赤・黄・青の割合についての特徴が見られる。図－ 2 から図－ 7 に画像処理と打音結果の関係を示す。

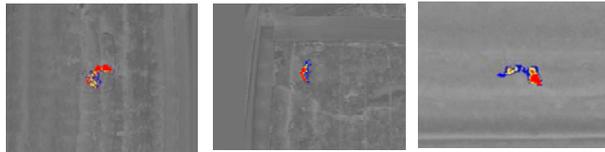


図- 2 コンクリート片撤去の画像処理例

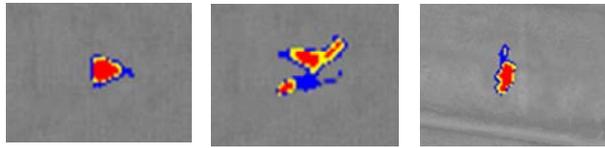


図- 3 異音のみの画像処理例

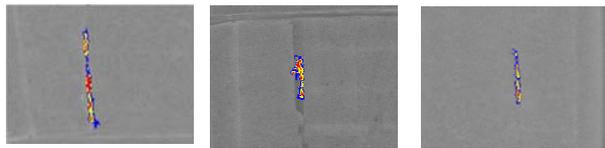


図- 4 コンクリートノロの画像処理例



図- 5 異物附着・混入の画像処理例



図- 6 色ムラの画像処理例

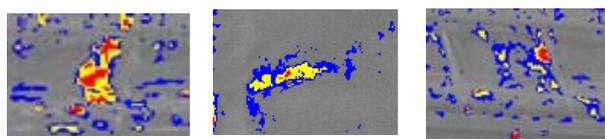


図- 7 反射の画像処理例

打音結果が異音のみ（浮き）の場合（図- 3）、赤の位置が黄、青の中心に近く、形状は円形に近い傾向になる。コンクリート片撤去（剥落）（図- 2）の場合、赤の位置は、黄、青の中心から離れた位置にあり、クラック先端箇所に着が偏った分布となっており、傾向に違いが見られる。

誤検出の場合、の施工時の型枠目地跡に発生するコンクリートノロ（ $t=2\sim 5\text{mm}$ ）（図- 4）は、明瞭に検出するが、全体の領域が細長い。異物附着（図- 5）は、急激な温度変化として現れるため、赤の占有率が高い。また、色ムラ（図- 6）は、赤、黄、青の形状が複雑で、可視画像の色ムラと形状が相似する傾向にある。

図- 7は、被写体の対象に交差する舗装（アスファルト）の温度が被写体温度と比較して 10°C 以上低いために発生した事例である。赤外線カメラは、撮影面の対向面に温度が大きく異なる物質が存在すると、その物質から放射される赤外線を受けて、撮影面の温度として画像化させる。この図- 7のように反射を捉える場合は、青色の領域が点在するため、温度変化部の良悪性を判断することができない。

これらの解析画像の形状特徴を分類すると、大きく5つの異常区分に分けられる（表- 1）。

表- 1 打音結果と画像処理結果の関係

打音結果	画像処理の特徴	備考
コンクリート片が剥落	赤領域が全体領域の重心から外れる	
異音のみ	赤領域が全体領域の中心の位置にある	
異物附着	赤の占有率が高く形状が四角である。	誤検出
ノロ ($t=2\sim 5\text{mm}$)	赤の占有率が高く形状が四角で周辺が複雑	誤検出
色ムラ	形状が複雑	誤検出
反射	黄の占有率が高い	誤検出

誤検出=熱画像に特異な温度分布があるが打音点検では損傷なし

(2)解析画像の形状特徴

3値化させた赤、黄、青の閾値は、式(1)で求めた強調指標の値を基に、0.11以上を赤、0.11未満0.08以上の区間を黄色、0.08未満 \sim 0.04以上を青としている。判別式の算出には、3値化させた領域を浮き・剥離部とし、赤、黄、青のそれぞれの領域の位置関係が重要になる（表- 1）。

赤領域が青領域の重心周辺にある場合は、異音のみで剥落にまで至らない浮きの可能性がある。一方、赤領域が青領域の重心から離れると剥落の可能性がある。このため、図- 8に示した各重心間の距離と、各領域（赤、黄、青）を囲んだ矩形面積を特徴量として算出する。

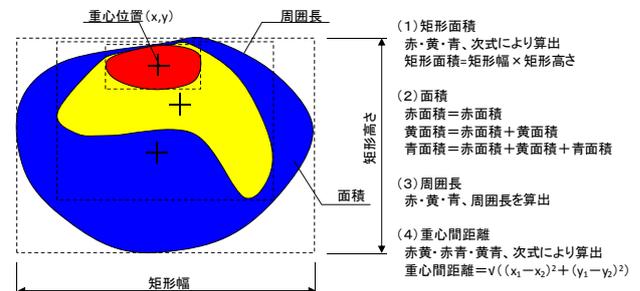


図- 8 画像処理の特徴量算出概念図

赤、黄、青領域の形状も重要である。誤検出している熱画像では、領域周辺が滑らかで、円形に近いと浮きの可能性がある。このため、赤、黄、青領域の形状に関する特徴量を検討する。図- 9に赤領域を抽出したものを

示す。ここで、周囲長と面積は画素の数で表わされる。周囲長=L、面積=Sとし、占有率、複雑度、円形度の式を(3)(4)(5)に示す。

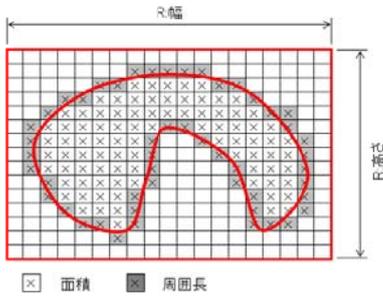


図-9 赤領域の形状特徴

$$\text{占有率}(O) = \frac{S}{R(\text{高さ}) \times R(\text{幅})} \quad (3)$$

$$\text{複雑度}(C) = \frac{L}{S} \quad (4)$$

$$\text{円形度}(C_L) = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (5)$$

本論では、解析画像の形状特徴を、図-8に示した各重心間の距離、各領域(赤、黄、青)を囲んだ矩形面積、そして式(3)、式(4)、式(5)を利用して算出したものとする。

3.3 鑑別指標(予測確率)の作成

(1) 画像認識のプロセス

鑑別指標(予測確率)を求める場合、画像認識を行うことが必要となる。画像認識は入力画像に対してなんらかの判断を与える処理である。画像認識のプロセスを図-10に示す。

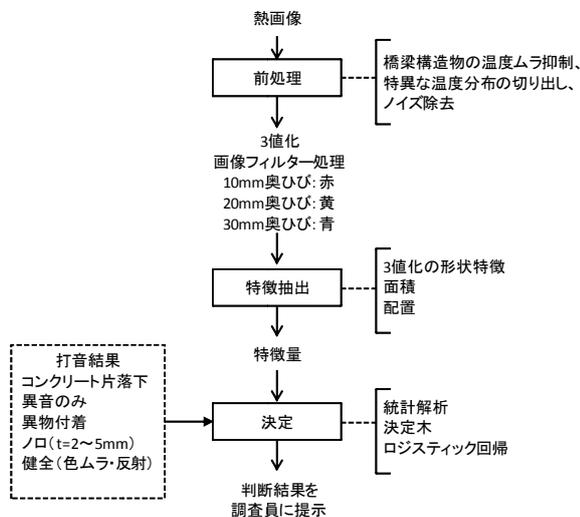


図-10 画像認識のプロセス

(2) 統計解析(決定木分析)

打音結果を教師データとし、前項で求めた解析画像の形状特徴量と3値化させた領域と配置を基に統計解析を実施した。統計解析に使用したモデルは、決定木分析、ニューラルネットワーク、ロジスティック回帰分析で、データ数は6,292件である(平成20年~22年の結果)。解析に使用したプログラムは、IBMのModelerとした。各モデルの精度は、決定木分析=98%、ニューラルネットワーク=90%、ロジスティック回帰=72%となった。決定木分析のモデルが有効であるため、確認のために平成23年度の打音検査×赤外線法のデータを基にモデルの有効性を確認する(データ数は2353件)。表-2にモデルの精度を示す。精度は89%で、鑑別指標(予測確率)として採用できる。

表-2 決定木分析モデルの精度(一致行列)

予測結果 \ 打音結果	剥落	異音	ノロ	健全	異物	合計
剥落	111	2	0	32	2	147
異音	2	116	2	12	0	132
ノロ	1	0	34	6	0	41
健全	64	71	17	1,732	42	1,926
異物	3	0	0	11	93	107
合計	181	189	53	1,793	137	2,353

4. 解析画面での鑑別指標(予測確率)の表示

決定木分析で得られた判別式をソフトに組み込むことで、「コンクリート撤去」のような危険な損傷の予測確率をリアルタイムにソフト上に表示することが可能となる(図-11)。

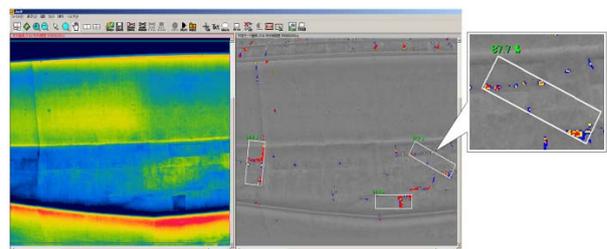


図-11 赤外線カメラのモニター例

図-7のように、反射を捉えている熱画像の判別を行う場合についても、決定木分析で求めた判別式を利用する。図-11では、損傷箇所を一定の範囲内においてグループ化し、「コンクリート剥落」の予測確率を表示させている。予測確率の表示に必要な損傷数のグループ化は、

図-12の手順で自動的に行われる。

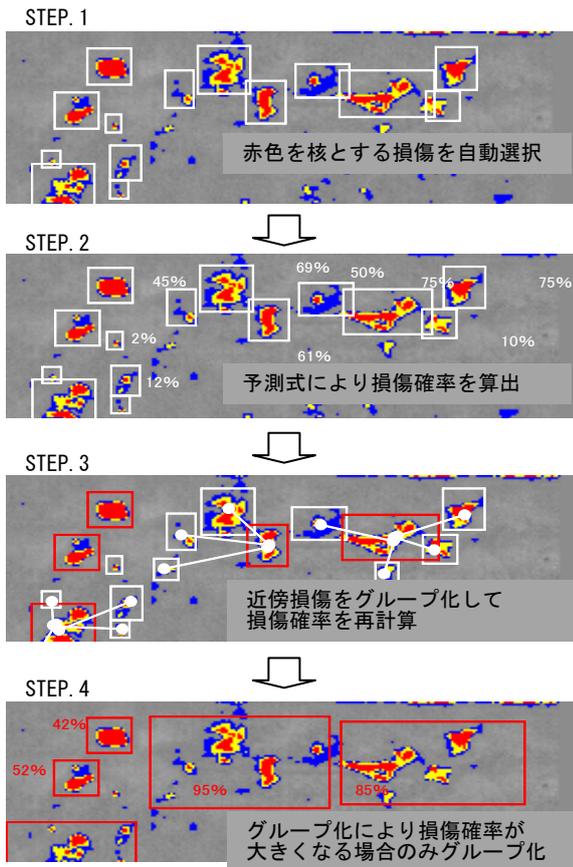


図-12 グループ化手順

5. まとめ

上記の鑑別指標（予測確率）を危険度評価の指標として用いることで、より細かく、定量的な損傷判定が可能となる。また、鑑別指標（予測確率）に基準値を設け、基準値以上の場合には補修、基準値未満の場合には、応急処置（緊急点検）というような橋梁維持管理を運用すれば、経済性、効率性の向上が見込まれる。

さらに、交差道路の重要性や、剥落コンクリート片の推定重量なども考慮すれば、より高度なリスク管理が可能になると考えられる³⁾⁵⁾。

その他、本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 赤外線調査では、橋梁付属物の周囲の温度変化による影響構造物の温度勾配による影響を受けるため熱画像のみでは、損傷を見落とす可能性が高い。
- (2) コンクリートのノロの付着や、異物混入は、浮き・剥離と異なるが損傷と誤検出される。
- (3) 赤外線カメラで撮影した熱画像に画像フィルター処理は、構造物に発生する温度勾配を除去するため、損傷部を検出しやすくなる。
- (4) 画像フィルター処理を行うことにより、損傷の厚さが定量的に判断可能となる。

- (5) 画像フィルター処理により判断した損傷深さは、コンクリート表面から斜めに進展する剥離ひび割れの深さも定量的に判断できる。
- (6) 橋梁付属物の周囲の温度変化には、画像フィルター処理は効果的である。
- (7) 水切り部の温度変化は、コンクリート表面に遊離石灰や補修跡が散在しているため、欠陥部だけが強調されないが、損傷を見逃す危険性は低減される。
- (8) 画像処理だけではコンクリートのノロの付着や、異物混入などの誤検出には対応はできない。
- (9) 赤領域が青領域の重心周辺にある場合は、異音のみで剥落にまで至らない浮きの可能性がある。
- (10) 赤領域が青領域の重心から離れると剥落の可能性があるので、各領域（赤、黄、青）位置関係を形状特徴量として用いることができる。
- (11) 形状特徴量を基に、決定木分析、ニューラルネットワーク、ロジスティック回帰などの多変量解析を行った結果、決定木分析のモデルが有効であった。
- (12) 決定木分析で得られた判別式をソフトに組み込むことで、「コンクリート撤去」のような危険な損傷の鑑別指標（予測確率）をリアルタイムにソフト上に表示することが可能となる
- (13) 鑑別指標（予測確率）を危険度評価の指標として用いることで、より細かく、定量的な損傷判定が可能となる。

参考文献

- 1) 藤田広志・原武史・周向栄・福岡大輔・村松千左子・林達郎：コンピュータ支援画像診断技術の最先端、非破壊検査、Vol.60, No.12, pp.686-693, 2011
- 2) 橋本和明・明石行雄・川西弘一：橋種別の熱的環境と部材内の熱流を考慮した赤外線サーモグラフィ法の留意点、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.31, pp.2041-2046, 2009
- 3) 橋本和明・林詳悟・明石行雄：赤外線サーモグラフィ法の技術的な問題点と画像処理技術の研究、コンクリート構造物の非破壊検査論文集、Vol.4, pp389-398, 2012
- 4) 橋本和明・明石行雄・川西弘一：橋梁を対象とした赤外線サーモグラフィ法における効率的な熱環境把握方法の提案、第65回土木学会年次学術講演会、2010.9
- 5) 林詳悟・橋本和明・明石行雄：コンクリート表面の赤外線サーモグラフィ法を実施する場合の技術的な問題点、第66回土木学会年次学術講演会、2011.9