

## 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

西日本高速道路エンジニアリング四国(株) ○正会員 林 詳悟  
 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 正会員 橋本 和明  
 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 正会員 明石 行雄

### 1. はじめに

赤外線サーモグラフィ法(以下、赤外線法という)は、赤外線カメラを用いて、コンクリート表面温度を撮影して特異な温度分布を欠陥と判断する。コンクリート表面には、遊離石灰等の異物が付着しており、赤外線カメラは、この異物を特異な温度分布として検出する。平成19年度に高松自動車道を対象に赤外線法の実施後に全面打音検査を行った。赤外線法で欠陥と判断した箇所を打音検査は健全と判断する箇所が多く出現した。この現象を本論では誤検出という。

本論は、コンクリート表面状態に着目し、赤外線法で誤検出する事象を紹介する。さらに、赤外線法と打音結果を照合したものを教師データとして、統計解析を試みた結果を報告する。ロジスティック回帰を使用し、その結果を利用すると誤検出数は減少するとともにリスク管理に応用できる。

### 2. コンクリート表面状態による誤検出

#### 2.1 誤検出の原因

平成20年度に高松周辺の高速道路(上部工)を対象に赤外線法を実施した。調査対象橋梁は供用年数が5年から38年である。赤外線法の調査後、全面打音検査を実施した。

赤外線法で欠陥部と判断した箇所数は1,199箇所である。検証結果を表1に示し、表内数字は度数である。赤外線法では、1,199箇所を浮き・剥離と判断した。打音検査では1,199箇所のうち健全が1,032箇所、163箇所が欠陥と評価した。この結果から赤外線法の検出精度は13.6%となる。本論での検出精度とは、打音検査で欠陥と判断した数量を赤外線法で特異な温度分布を確認した箇所数で割り戻したものをいう。コンクリート表面の状態を整理すると、検出精度が高い順に「異物付着・混入」、「錆汁」、「色ムラ・変色」、「遊離石灰」、「健全」となる。「健全」とは、目視でコンクリート表面上に異常が確認

表1 赤外線法と全面打音検査の結果

|         |    | 異物付着・混入 | 健全  | 錆汁   | 色ムラ・変色 | 遊離石灰 | 合計    |
|---------|----|---------|-----|------|--------|------|-------|
| 打音結果    | 健全 | 91      | 282 | 32   | 411    | 220  | 1,036 |
|         | 欠陥 | 46      | 18  | 10   | 67     | 22   | 163   |
| 合計      |    | 137     | 300 | 42   | 478    | 242  | 1,199 |
| 検出精度(%) |    | 33.6    | 6   | 23.8 | 14     | 9.1  | 13.6  |

できないものをいう。「色ムラ・変色」とは、型枠のはく離材の影響等で表面が黒くなっていると、水の影響によって黒くなるものをいう。

#### 2.2 誤検出した事例

##### (1) 色ムラの事例

コンクリート表面の黒い部分が欠陥と誤検出する。一般的に色が黒いと熱の吸収と放射率が高いため温度変化が発生しやすい(図1)。調査員は、目視と熱画像を見比べて、誤検出しないように識別することが必要である。

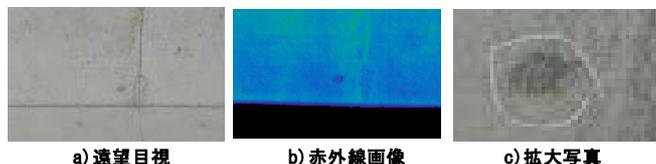


図1 健全部を誤検出した事例(色ムラ)

##### (2) 遊離石灰の事例

コンクリート表面に遊離石灰が溶出されると欠陥と誤検出する。可視画像と熱画像を照合させると形状が近似していることがわかる。調査員は、目視と熱画像を見比べて、誤検出しないように識別することが必要である。(図2)

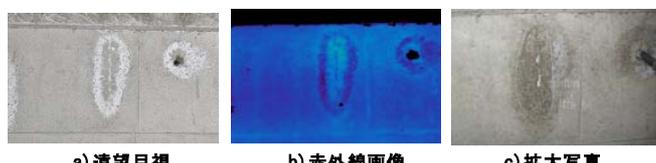


図2 健全部を誤検出した事例(遊離石灰)

### 3. 経験則を基に誤検出防止

#### 3.1 ロジスティック回帰分析の概要

ある現象の発生する確率 $P$ をその現象の生起を説明するために観測された変数群  $x=(x_1, x_2, \dots, x_j)$  で説明する場合、 $x$  という状態のもとで現象が発生するという条件付き確率  $P(x)$  は、式(1)に示す関数  $F$  でモデル化される。

$$P(x)=(\text{発生}|x_1, x_2, \dots, x_j)=F(x_1, x_2, \dots, x_j) \quad (1)$$

$j$  個の変数の影響を式(2)に示す合成関数と考え、関数  $F$  に  $Z$  のロジスティック関数を用いると式(3)になる。式(2)、式(3)のモデルをもとにある事象の発生確率  $P(x)$  を算出するためのロジスティック回帰モデルは式(4)となる。

キーワード：赤外線サーモグラフィ法、誤検出、リスク管理、ロジスティック回帰分析

〒760-0072 高松市花園町三丁目1番1号

TEL 082-834-1121 FAX 082-834-1193

$$Z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_j x_j \quad (2)$$

( $\beta$  : 推定値、 $x$  : 説明変数)

$$F(Z) = \frac{\exp(Z)}{1 + \exp(Z)} = \frac{1}{1 + \exp(-Z)} \quad (3)$$

$$P(x) = (\text{発生} | x_1, x_2, \dots, x_j) = \frac{1}{1 + \exp(-Z)} \quad (4)$$

式(4)から得られるロジスティック関数は、0 から 1 の範囲内で S 字形となり、導き出される発生確率  $P(x)$  は、0 と 1 の間 (0%~100%) の値をとる。ここでは、赤外線法で検出した特異な温度分布が欠陥部である確率を発生確率  $P(x)$  とし、説明変数  $x$  は、供用年数とコンクリート表面の状態とする。鉄筋腐食で、浮き・はく離が出現するには 5 年から 10 年の歳月が必要となるため、供用年数を追加した。

供用年数とコンクリート表面状態が、打音結果の健全と欠陥の関係から合成関数  $Z$  における推定値  $\beta$  を最尤法により同定する。解析は、IBM SPSS Statistics20 を使用した。

### 3.2 使用データの概要と解析結果

分析に使用するデータは、表 1 で示した 1,199 箇所とする (163 箇所が欠陥)。独立変数は、誤検出の要因となる①コンクリート表面状態 (カテゴリ変数) と②ひび割れの有無 (カテゴリ変数)、③供用年数 (量的変数) とした。②ひび割れの有無とは、望遠鏡等でコンクリート表面を観察し、ひび割れが確認できるものとした。0.5 mm 未満のひび割れは、遠望目視で確認できないため、ひび割れ無とした (表 2)。

表 2 ロジスティック回帰に使用する変数

|    | 供用年数  | 異物付着・混入 | 健全    | 錆汁    | 色ムラ・変色 | ひび無   |
|----|-------|---------|-------|-------|--------|-------|
| 度数 | 1199  | 137     | 300   | 42    | 478    | 1011  |
| 変数 | $x_1$ | $x_2$   | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$  | $x_6$ |

### 3.3 ロジスティック回帰分析結果

解析結果を表 3 に示す。表中に示した Wald 統計は、(推定値 ÷ 標準誤差)<sup>2</sup> で計算される。誤検出に影響を与える説明変数は、Wald 統計値が大きいひび割れの有無と異物付着・混入、そして供用年数となる。統計処理結果から、コンクリートの表面状態で赤外線法の検出精度は左右されることがわかった。調査員は、熱画像だけでなく、目視でコンクリート表面状況を確認することが重要である。

表 3 分析結果 (偏回帰係数)

|        | $\beta_0$ | $\beta_1$ | $\beta_2$ | $\beta_3$ | $\beta_4$ | $\beta_5$ | $\beta_6$ |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 推定値    | -4.151    | 0.279     | 3.008     | 4.023     | -0.343    | 2.467     | -8.937    |
| 標準誤差   | 0.589     | 0.036     | 0.731     | 0.91      | 0.625     | 0.575     | 0.875     |
| Wald統計 | 49.589    | 58.344    | 16.939    | 19.552    | 0.302     | 18.406    | 104.429   |
| 有意確率   | 0.000     | 0.000     | 0.000     | 0.000     | 0.582     | 0.000     | 0.000     |

表 3 の推定値を式(4)に代入して、欠陥の発生確率を算出する。図 3 に式(4)で求めた発生確率を横軸とし、縦軸に欠陥検出率と的中率を示す。ここで、

欠陥検出率とは、欠陥数 167 箇所を赤外線法で検出できる割合をいう。的中率は、赤外線で検出した箇所が欠陥である確率をいう。図 1 から、発生確率が 50%以上を欠陥と判断すると 90%の的中率の精度を保有するが、打音検査での欠陥 163 箇所のうち、25 箇所を見逃すことになる

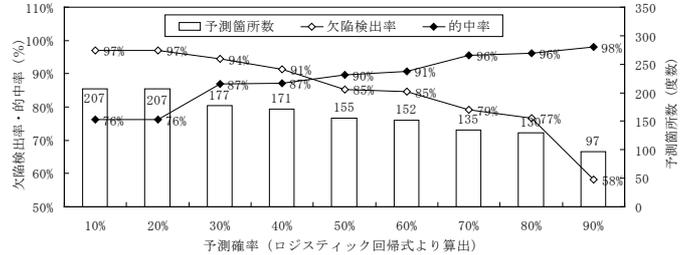


図 3 欠陥検出率・的中率と予測確率の関係  
 欠陥検出率 (%) = 任意の予測確率以上の特異な温度分布中の欠陥箇所数 / 全欠陥箇所数  
 的中率 (%) = 任意の予測確率以上における、欠陥箇所数 / 特異な温度分布の箇所数

### 3.4 効率的な維持管理手法の提案

コンクリート表面状態から発生確率を算出し、縦軸にコンクリート片の推定重量を横軸にロジスティック回帰から求めた発生確率とした散布図を作成すると図 4 になる。図 4 の各パネルは、橋梁下の交通に対する影響の大きさを判断する指標となり、図上の矢印は落下リスクの大きさを判断する一つの指標案である。

このように、発生確率を数値化することにより、応急処置の優先順位を算出することが可能となる。リスクの高い箇所から優先的に補修を行うことは、適切なリスク管理に有効であると考える。

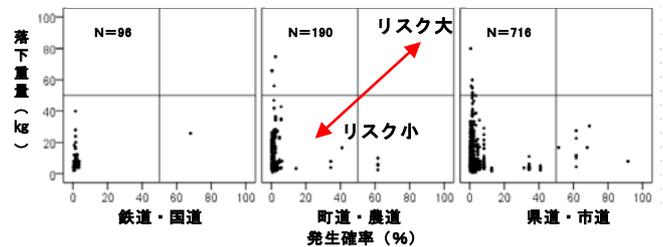


図 4 赤外線法で検出した欠陥のリスクマップ (交差道路別)  
 四国支社管内の赤外線調査結果 (約 20 万 m<sup>2</sup> で欠陥 1,002 箇所)

### 4. まとめ

本論のまとめを以下に示す。

- 1) 赤外線法はコンクリート表面の状態で誤検出する。
- 2) 橋梁のコンクリート表面には遊離石灰等が付着しているため、特異な温度変化部として出現する。
- 3) コンクリート表面状態を確認することは重要であり、特異な温度分布があり、かつコンクリート表面にひび割れを伴う場合は欠陥であることが多い。
- 4) 供用年数の増加に伴い、コンクリート表面状態にかかわらず、欠陥である確率が高くなる。
- 5) コンクリート表面状態を変数にしてロジスティック回帰分析で求めた発生確率は、誤検出を防ぐための指標になる。
- 6) 応急処置を行う優先順位を決定するための指標として発生確率を利用できるため、適切なリスク管理を行うことが可能となる。