

論文 赤外線サーモグラフィ法における検出精度向上のための検討

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、赤外線カメラの性能やコンクリート表面の状態によって検出精度が大きく異なる。筆者らは、赤外線カメラによる損傷の検出限界をコンクリート試験体にて確認し、また、遠赤外線フーリエ分光分析を実施することでコンクリート表面状態によって赤外線の放射率が異なることを確認した。さらに、実橋梁 74 万m²を対象に赤外線サーモグラフィ法の検出精度の確認を 8 年間実施してきた。本論文は、これらの経験から得られた知見を紹介するとともに、打音結果と赤外線サーモグラフィ法の結果を数値化し、統計処理を行うことで、赤外線サーモグラフィ法の検出精度を整理した。

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, 温度分布, 欠陥検出, 遠赤外線フーリエ分光分析, 統計処理, 決定木分析

1. はじめに

コンクリート構造物は、供用年数の経過に伴い、中性化の進行や塩化物イオンの浸透が進むことによって、鉄筋が腐食・膨張し、かぶり部のコンクリート片が落下する。道路管理者は、この落下事故を未然に防ぐため、全面打音検査を実施する(写真-1)。しかし、打音検査は構造物に近接することが必要で、交通規制や高所作業車の手配等が必要となり、時間と費用を要する。

赤外線サーモグラフィ法(以下、赤外線法という)は、内部欠陥に伴い発生するコンクリート表面上の特異な温度分布を検出し欠陥と判断する。この特異な温度分布は、被写体内部に熱流が発生すると、内部欠陥の空気層がその熱流を遮断することで出現する¹⁾。赤外線法は温度分布を撮影することにより遠望非接触にて内部欠陥の有無の推定が可能であり、効率的な維持管理に有効な調査手法である(写真-1)。

しかし、赤外線法は効率的ではあるが、打音検査と比較して検出精度が悪い。さらに、赤外線カメラの種類が多いため、調査員はカメラの選定が難しいと言われる場合が多い²⁾。

筆者らは、平成 14 年度から現在に至るまでコンクリート橋を診断対象とした赤外線法を実施し、打音検査で赤外線法の検出精度を確認してきた(診断実績 74 万m², 2678 径間)。使用した赤外線カメラは 4 種類である(表-1)。赤外線カメラは検知素子(以下、検出器という)の種類によって、検知波長帯と NETD が異なる(25°C 時の最小検知温度差)。

本論文は、筆者らが経験した赤外線法の技術的な問題点を紹介するとともに、赤外線法の検出限界を明確にし、コンクリート表面の粗面・滑面の違いで赤外線の放射率

が異なることなど、赤外線法が誤検出する要因について、事例を含めて紹介する。さらに、赤外線法で特異な温度分布箇所とコンクリート表面状態の関係を統計分析し、赤外線法は、コンクリート表面の状態によって、検出精度が異なることを報告する。

表-1 使用した赤外線カメラの性能一覧

	カメラA	カメラB	カメラC	カメラD
表示画素数	640×512	640×512	320×480	640×480
検知素子	InSb	InSb	QWIP	μボロメータ
検知波長帯	3~5 μm	3~5 μm	8~9 μm	8~13 μm
NETD(25°C)	25mK以下	25mK以下	25mK以下	60mK以下
フレームレート	100~380Hz	125Hz	60Hz	30Hz
重量	3.8Kg	4.5Kg	3.2Kg	1.7Kg



(a) 全面打音検査 (b) 赤外線法(夜間)

写真-1 点検状況の比較

2. 赤外線カメラによる検出限界と誤検出

2.1 赤外線カメラによる検出限界

(1) 試験体の作製と撮影条件

赤外線カメラの検出精度を確認するために 50 cm 立方体のコンクリート試験体を作製した。試験体には、表面から 2 cm, 3 cm, 4 cm, 6 cm 奥に 10 cm×10 cm (t=1 cm) の空洞部を設けた(図-2)。

*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)

この試験体を高松自動車道の日射の影響を受けない橋梁下の完全な日陰部に設置し、日較差が10℃以上の気象条件の夜間に撮影した(23時)。

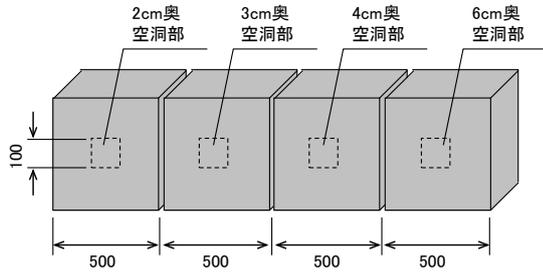


図-2 試験体と欠陥部の配置

(2) 使用した赤外線カメラと熱画像

試験体の撮影に使用した赤外線カメラは表-1内のカメラB, C, Dとした。撮影方法は3台並べて試験体を同時撮影した(写真-2)。



写真-2 使用カメラと撮影状況

最小検知温度が0.06℃以下のカメラDで撮影すると欠陥部を検出できない(図-3)。図-4に示した熱画像はカメラBの熱画像である。カメラCの熱画像と概ね同じであったため、本論では掲載を割愛する。

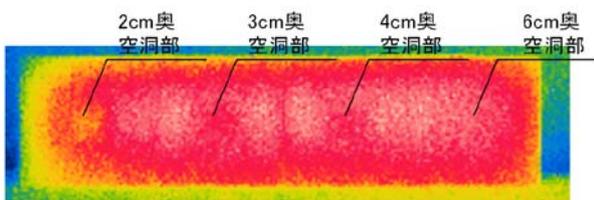


図-3 カメラDの熱画像
(日較差10℃, 23時撮影)

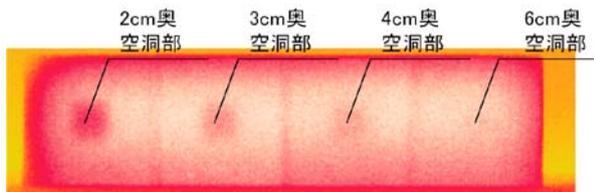


図-4 カメラB, Cの熱画像
(日較差10℃, 23時撮影)

(3) 赤外線カメラの検出限界

最小検知温度が0.025℃以下のカメラB, Cは4cm

までの欠陥部を検出することができるが、6cm奥の欠陥部は検出できない。カメラDの熱画像にはノイズが目立つが、カメラB, Cの熱画像にはノイズが少ない。カメラが持つノイズの影響によって欠陥部が確認できるものと、できないものに分けられる。橋梁上部工における鉄筋のかぶり厚は4cm程度であるが、一般に下部工は4cmより深い。鉄筋が腐食し、かぶり部分のコンクリートが剥落する事象を検出する場合、最小検知温度0.025℃の赤外線カメラを使用しても下部工は調査できないことがわかる。よって、赤外線法の適用範囲は橋梁の上部工となり、使用するカメラは、ノイズが少ないA, B, Cとなる。図-2に示した2cm, 3cm, 4cm奥の空洞部表面は健全部との温度差が、0.18℃, 0.13℃, 0.08℃であった。この結果は、高谷らが実験した結果と同等の結果となっているため、本実験結果は妥当と判断する³⁾。

2.2 赤外線カメラによる誤検出

(1) 検出波長帯の違いによる熱画像

検出器は、赤外線を捕らえて温度に変換するが、検出器の種類によって赤外線の検出波長帯が異なる。実橋を撮影すると検出器の違いによって、検出温度が異なる箇所が出現する。

実際に撮影した場所を図-5に示す。撮影場所は壁高欄部で、事前に打音検査を実施して健全部であることを確認している。撮影方法は斜め下から上空に向かって撮影する。壁高欄部は真横から撮影することができないため、撮影角は45度程度になる。比較に使用したカメラはカメラB(InSb)とカメラC(QWIP)とした。

図-6から赤外線カメラの種類によって健全部を欠陥部と誤検出する事例が確認できる。周囲より低温に捉えて誤検出している箇所は、コンクリート表面が滑面状態となっていた。他の箇所は粗面の状態である。

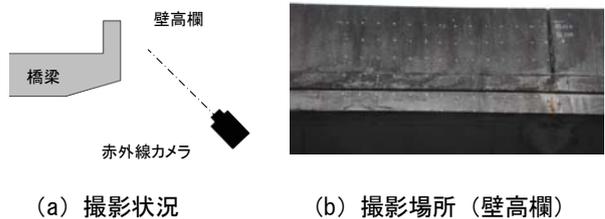


図-5 赤外線カメラでの撮影場所

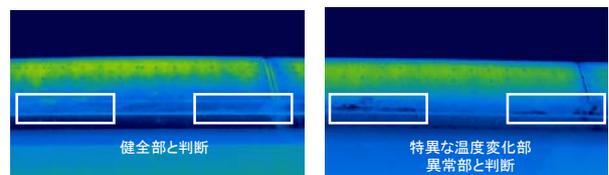


図-6 検出器別の熱画像

(2) 屋外における赤外線線の伝達経路

赤外線カメラは対象物からの放射だけでなく、被写体周辺の影響を常に受けている。赤外線カメラは被写体から放射される赤外線だけでなく周辺の赤外線も捉えて温度に変換する(図-7)。このため、対向面から放射される赤外線の影響を受けるが、対向面の温度が一樣であるため、温度ムラはないと言われている。ただし、被写体の分光放射率が一樣、かつ十分に高いことが前提である。

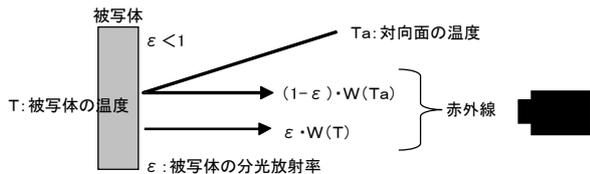


図-7 赤外線放射エネルギー伝達経路

(3) コンクリート表面粗さの違いと消石灰の放射率

遠赤外線フーリエ分光分析器を用いてコンクリート表面状態の違いによる放射率を計測した。計測対象は、「コンクリート表面が滑面」、「コンクリート表面が粗面」、「消石灰塗布したもの」の三種類とする。「粗面」はコンクリートを切断した面を採用した。計測時の室温は25℃程度とした。計測結果を図-8に示す。この結果から、「消石灰塗布」、「粗面」、「滑面」ともに放射率が異なる。特に、波長域が8μm以上になると滑面は粗面と消石灰塗布と比較して放射率が小さくなる。検出器は捉える赤外線波長域が異なるため、放射率を検出器別の対象波長域の平均放射率を求める(図-9)。カメラA、BのInSbが捉える3つの材質の放射率は、ほぼ同じである。一方、カメラCのQWIPとカメラDのμ-ボロメーターは滑面の放射率だけが小さい結果となった。

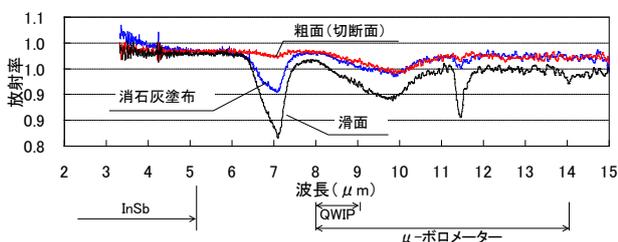


図-8 波長と放射率の関係

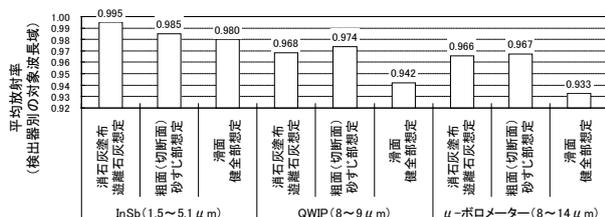


図-9 検出器別の放射率(消石灰, 粗面, 滑面)

以上の結果から、3つの材質の放射率がほぼ同等であるカメラA、Bがコンクリート撮影に適したカメラとなる。この試験結果は、図-6の現象を説明できる。図-6のコンクリート表面は滑面と粗面が混在しているため、対向面(ここでは天空)の温度を捉えたことで発生した現象である。しかし、赤外線波長域が2~5μmであると、太陽光の反射の影響を強く受ける。このため、カメラA、Bを使用する場合は夜間に限られる。

2.3 実橋での赤外線法の検出精度

平成20年~21年に高松周辺の高速度道路橋(上部工)を対象に、カメラBを用いて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年であり、橋種は、RC、鋼橋、箱桁橋である。赤外線法の調査後、全面打音検査を実施した。調査時の熱的環境は日較差10℃以上確認した時点で夜間に実施した。

赤外線法で欠陥部と判断した箇所数は657箇所である。赤外線法の調査方法は、コンクリート表面から4cm奥の浮き・剥離箇所を検出するために、図-4に示した特異な温度差(0.08℃)を探索した。

検証結果を表-2に示し、表内数字は度数である。赤外線法では、657箇所の浮き・剥離と判断できる特異な温度分布を検出した。打音検査では657箇所のうち健全が520箇所、137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20.9%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温度差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、度数が多い順に「変色・色むら」、「補修跡」、「健全」、「遊離石灰」、「目地・段差」、「錆汁」、「その他」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できないものをいう。「その他」とは、目視でスケーサー跡や異物付着を確認できるものとした。

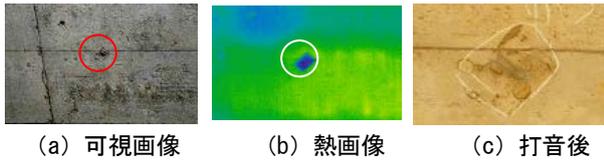
表-2 赤外線法の検証結果(クロス集計表)

		コンクリートの表面状態							合計
		変色 色むら	補修 跡	健全	遊離 石灰	目地 段差	錆	その他	
打音 結果	健全	199	101	87	63	60	5	5	520
	欠陥	56	27	18	12	9	15	0	137
検出精度		22.0%	21.1%	17.1%	16.0%	13.0%	75.0%	0.0%	20.9%
合計		255	128	105	75	69	20	5	657

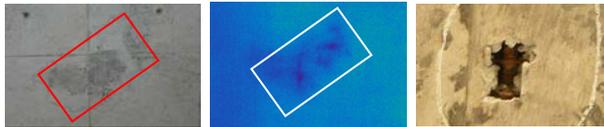
2.4 熱画像と打音結果の事例

(1) 欠陥の熱画像

コンクリート表面が、変色・色むらの状態で欠陥を確認した事例を図-10、図-11に示す。図-10はコンクリート打設時に混入したと思われる木片である。図-11は鉄筋の腐食が原因の浮きである。



(a) 可視画像 (b) 熱画像 (c) 打音後
図-10 変色・色むらの熱画像と打音後写真
(木片混入部)



(a) 可視画像 (b) 熱画像 (c) 叩き落とし後
図-11 変色・色むらの熱画像と打音後写真
(鉄筋の腐食が原因の浮き)

(2) 健全で表面状態が色むら・変色の熱画像

コンクリート表面には、異物が付着している場合がある。特に、蜘蛛の巣は目視で確認しても異物付着と確認できない場合が多い。蜘蛛の巣がコンクリート表面に付着していると部分的に茶色となり、目視で確認しても判断することが難しい。このような場合、材質がコンクリートと大きく異なるため熱画像では明瞭に検出する。

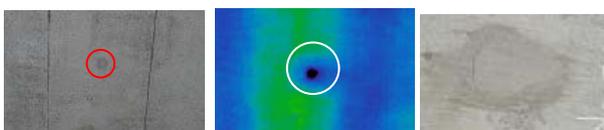
蜘蛛の巣が付着する事例は、周辺が山林に囲まれ空気の流れが悪い橋梁や鋼橋に多い。



(a) 可視画像 (b) 熱画像 (c) 拡大写真
図-13 蜘蛛の巣が付着している熱画像と拡大写真

(3) 健全で表面状態が補修跡の熱画像

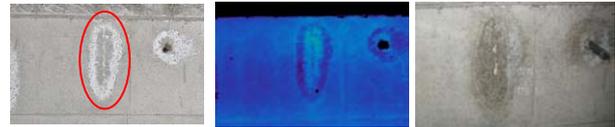
赤外線法では、断面修復等を実施した補修跡を異常部と誤検出する。補修に使用した補修材の熱伝導率が健全部のコンクリートと異なると検出する。モルタルで補修した場合は、温度差は出現しないが、近年は樹脂系の補修材を採用する事例が多いため注意が必要である。温度差が出現する場合は、目視で補修跡と判断できるが、熱伝導率の違いによるのか、欠陥に伴うものなのか判断が困難であるため、欠陥があるかどうか確認が必要となる。



(a) 可視画像 (b) 熱画像 (c) 拡大写真
図-14 補修跡の熱画像と拡大写真

(4) 健全で表面状態が遊離石灰の熱画像

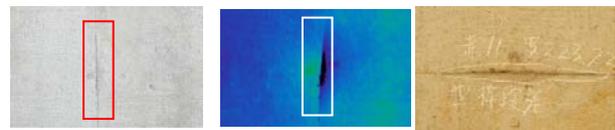
赤外線法では、コンクリート表面に遊離石灰が溶出されると欠陥と誤検出する。この原因は、遊離石灰が表面に付着することで特異な温度分布として出現する。このため可視画像と熱画像を照合させると形状が近似していることがわかる。調査員は、目視と熱画像を見比べて、誤検出しないように識別することが必要である。



(a) 可視画像 (b) 熱画像 (c) 拡大写真
図-15 エフロレッセンスの熱画像と拡大写真

(5) 健全で表面状態が目地・段差の熱画像

コンクリート表面に段差があると、温度差が出現する。コンクリート表面の段差は、コンクリート打設時に発生する初期欠陥である。調査員は、熱画像で明瞭に検出するため、コンクリート片が落下する危険性が高いと誤検出する。目視で表面に凹凸が確認できると健全と判断すると誤検出が少なくなる。



(a) 可視画像 (b) 熱画像 (c) 拡大写真
図-16 段差の熱画像と拡大写真

3. 決定木分析を用いた赤外線法の検出精度

3.1 決定木分析

赤外線法の検出精度は、コンクリート表面の状態によって大きく異なる。表-2 で示した 657 データを基に、コンクリート表面状態別の検出精度について、統計処理を行う。分析方法は決定木分析を用いる。この分析は、ある基準に従いデータを分割することで、各段階の確率を算出するものであり、コンクリート表面状態別における判別精度の高い棄却域を検討する⁴⁾。使用するソフトは SPSS Classification Trees 16.0 とする。成長手法は、各カテゴリに対して可能な限りの分割を調べる CHAID の改良版である Exhaustive CHAID とした⁵⁾。

3.2 デシジョンツリーの作成

(1) 分析に使用するカテゴリの整理

分析したい従属変数は、打音検査から判断した欠陥部と健全部とする。独立変数は、劣化因子を主体とし、以下に示す内容とする。

a) 独立変数：ひび割れの有無

鉄筋が腐食膨張するとコンクリート表面にひび割れが発生する。よって、コンクリート表面に、ひび割れの有・無を 0,1 データとする。ここでのひび割れ幅は目視で確認できる 0.5mm 以上とした。

b) 独立変数：コンクリート表面状態

赤外線法は表-2 に示すようにコンクリート表面の状態によって検出精度が異なる。コンクリート表面状態を、「変色・色むら」、「補修跡」、「健全」、「遊離石灰」、「目地・段差」、「錆汁」、「その他」とし、質的データとする。

c) 独立変数：漏水の有無

高速道路では、雪氷対策のために凍結防止材を大量に散布する。このため、舗装面からの漏水があると、その漏水箇所には高濃度の塩化物イオンが浸透している可能性がある。よって、舗装面からの漏水箇所も分析対象とする(水の影響)。水の影響の有・無を 0,1 データとして入力する。

d) 独立変数：供用年数

コンクリート構造物は、供用年数の経過に伴い、鉄筋が腐食するため、供用年数を量的データとして分析に使用する。

上記の内容を整理したものを表-3 に示す。

表-3 決定木分析に使用する独立変数の因子と水準

番号	因子	水準	理由
a	ひび割れの有無	有・無	鉄筋が錆びると表面にひび割れが発生する
b	コンクリート表面状態	①変色・色むら、②補修跡、③健全、④遊離石灰、⑤目地・段差、⑥錆汁、⑦その他	赤外線法は表面状態によって誤検出が多い
c	水の影響	有・無	漏水箇所は塩化物イオン量が高濃度
d	供用年数	数値データ	古い橋梁は損傷部が多い

(2) 分析結果

分析結果を図-17 に示す。この結果から、赤外線法の検出精度に影響を与える因子は、「ひび割れの有無」、「供用年数」、「コンクリート表面状態」、「漏水の有無」の順番である。

「供用年数」は、3つの期間に分類でき、13.1年以下と13.1年以上19.1年未満、そして19.1年以上となる。

「コンクリート表面状態」は、2つに分類される。供用年数が19.1年以上になると、錆、遊離石灰、補修跡の箇所ですべて異なる温度分布が確認できると欠陥の可能性が高い(82.1%の確率)。「供用年数」が13.1~19.1年未満になると、水の影響を受けるところに欠陥の可能性が高くなり、変色・色むら、遊離石灰の箇所が欠陥の可能性が高くなる(45.5%)。

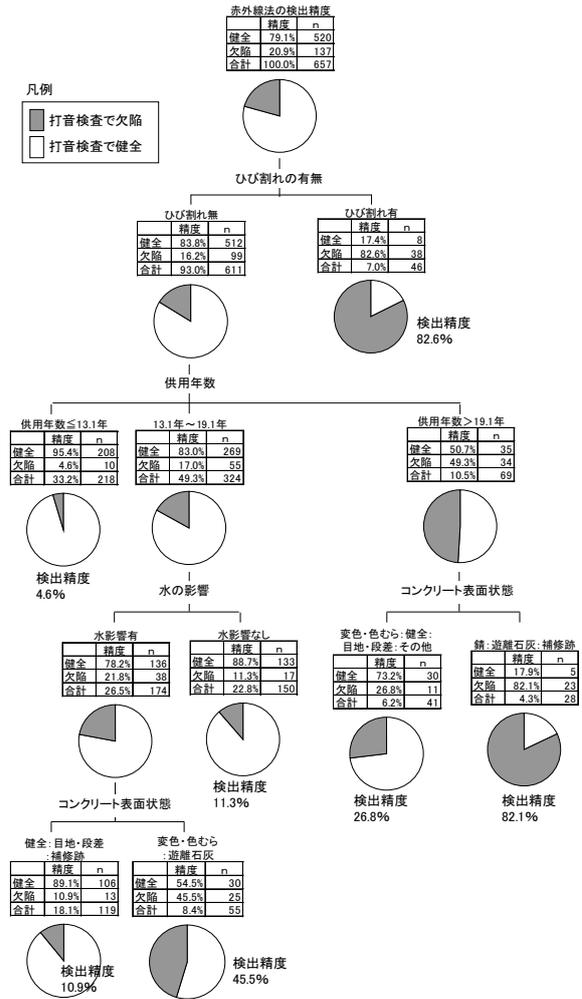


図-17 デシジョンツリー (赤外線法の検出精度)

3.3 コンクリート表面状態別の検出精度

決定木分析結果から、赤外線法の検出精度には、コンクリート表面の状態と供用年数が関係していることがわかる。

特に、コンクリート表面にひび割れが発生している箇所に特異な温度分布があると欠陥の可能性が非常に高く、欠陥の確率は82.6%とひび割れの影響が大きい。

また、調査橋梁の「供用年数」も赤外線法の検出精度に影響を与える因子となっている。19年を経過する比較的古い橋梁は、特異な温度分布が出現すると欠陥の確率は49.3%となる。さらに、コンクリート表面の状態の影響も受け、錆、遊離石灰、補修跡に特異な温度分布があると欠陥の確率はさらに上昇し82.1%となる。

「供用年数」が13年から19年までの橋梁では、「水の影響」の因子が赤外線法の検出精度に若干、影響を与えている。(21.8%) また、コンクリート表面状態の影響も受けており、変色・色むら、遊離石灰部の場所で特異な温度分布が確認できると欠陥の確率は45.5%まで上昇する。しかし、コンクリート表面が健全、目地・段

差、補修跡の箇所では特異な温度分布が検出されても欠陥の確率は10.9%と低い。

比較的新しい「供用年数」が13年未満の橋梁は、特異な温度分布が現れても、表面にひび割れがないと95.4%の確率で健全である。よって13年未満のほとんどの橋梁は、鉄筋が錆びてない（自然落下する欠陥部が少ない）と考えられる。赤外線法で、特異な温度分布として検出している箇所は、「変色・色むら」と「補修跡」で5割占めており、残りは「遊離石灰」であった。比較的新しい橋梁では、赤外線法で欠陥として検出できるものは、異物付着か空洞部（初期欠陥）が多い。

以上のように、赤外線法は、コンクリート表面の状態によって検出精度が大きく異なることが分かる。このため、調査員はコンクリート表面状態をよく観察して熱画像の鑑別を行うことが重要である。ただし、「補修跡」における判断が難しい。赤外線法では補修材の熱伝導率が異なると特異な温度分布として検出するが、打音検査では健全である可能性が高い。しかし、「供用年数」が19.1年以上になると「補修跡」が欠陥部である可能性が急激に高くなっているため、古い橋では欠陥と判断することもできる。しかしながら、補修材や補修方法が橋梁ごとに異なることも考えられるため、必ずしも他の橋梁も同一の傾向にあるとは限らない。

表-4は本検討における傾向を整理したものである。なる。調査員は、赤外線カメラで特異な温度差0.08℃を検出すると表-4に示した事項を念頭において赤外線法を実施することが重要である。

表-4 決定木分析結果からの赤外線法の検出精度

ひびの有無	供用年数	コンクリート表面状態	水の影響 有無	赤外線法 検出精度
有	—	—	—	82.6%
無	19年以上	錆、遊離石灰、補修跡	—	82.1%
無	19年以上	変色・色むら、健全、目地・段差、その他	—	26.8%
無	13～19年	—	無	11.3%
無	13～19年	変色・色むら、遊離石灰	有	45.5%
無	13～19年	健全、目地・段差、補修跡	有	10.9%
無	13年以下	—	—	4.6%

4. まとめ

本研究で得られた夜間調査における知見を以下に示す。

- (1) 赤外線法は使用する赤外線カメラの性能によって、大きく検出精度が異なる。目的および環境に適した赤外線カメラを選定することが重要である。
- (2) 浮き・剥離箇所の欠陥部は鉄筋が腐食することで出

現する。このため、赤外線法の検出限界を検討するには、鉄筋のかぶり厚が非常に重要となる。

- (3) 赤外線カメラの性能によって、検出できる欠陥深さが異なる。検出器がInSb、QWIPの赤外線カメラは日較差10℃で欠陥深さ4cmまで検出可能である。
- (4) 検出波長域が異なると、検出精度が異なる。コンクリート表面には、滑面と粗面が混在している。滑面と粗面は、赤外線波長毎の放射率が異なる。放射率が異なると誤検出する可能性があるため、放射率が1.0に近いInSbの検出器を採用するほうが望ましい。
- (5) 日較差10℃の熱的環境時には、欠陥深さ4cmの特異な温度差は0.08℃程度である。現地で0.08℃以上の特異な温度分布だけを見て異常とすると赤外線法の検出精度は20%程度と低い。
- (6) コンクリート表面には、異物や遊離石灰が付着する。また、橋梁には段差や目地が必ず存在する。赤外線法は、コンクリート表面の状態によって、特異な温度分布として誤検出する可能性があるため、総合的な判断が必要である。
- (7) 統計処理（決定木分析）を実施すると、赤外線法の検出精度は、コンクリート表面の状態や供用年数によって、大きく異なることがわかった。
- (8) 補修跡は、補修材、補修方法が特定できないが、供用年数が19年以上になると、自然落下の危険性が高くなっていた。しかし、供用年数が19年未満では、赤外線法で特異な温度分布として検出しても、健全である事例が多かった。

参考文献

- 1) 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
- 2) 橋本和明・明石行雄：検出波長域の違う赤外線カメラ撮影の留意点，第65回土木学会年次学術講演会，2010.9
- 3) 高谷哲・阿川清隆・橋本和明・山本貴士・宮川豊章：赤外線サーモグラフィを用いたはく離ひび割れの定量評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第11巻，pp.279-284，2011.10
- 4) 大滝厚，堀江有治，Dan Steinberg：Applied Tree Method by CART 応用2進木解析法，日科技連
- 5) SPSS Japan Inc. 2008，決定木分析による分類と予測