

赤外線法を用いたPC跨道橋の点検への適用に関する研究

中日本高速道路(株) 正会員 桑原 伸夫
 日本大学理工学部 梅村 靖弘
 中日本高速道路(株) 正会員 酒井 秀昭

Abstract

At the infrared method used in Central Nippon Expressway Co Ltd, the change of the outside temperature during a day has been restricted within 7 or more. Due to this fact, the infrared method has not been introduced yet in site investigation. Then, the condition that the change of the temperature during a day was restricted within 5 was created by using the homiothermal room. As a result, it was clarified that the gap part can be extracted at the point up to 20mm in the depth of the gap. In addition, this study reports the comparison of the accuracy between investigation with non-destructive testing in the case of the investigation of prestressed concrete overbridge

Key words : Preventive maintenance, infrared thermography, exfoliation

1. はじめに

現在、中日本高速道路(株)(以下「NEXCO中日本」という)の管理するコンクリート構造物は、高齢化が進行しており、一部の橋梁においては、中性化及び塩害の影響により、コンクリートのひび割れ発生や鋼材の腐食など構造物の劣化グレードが加速期以降に進行¹⁾している状況が確認されている。

さらに、近年ではコンクリート片のはく落も発生している。

その状況下、予防保全を考えた点検の導入が重要課題となっている。現在、高速道路の橋梁点検は、表-1に示す内容で実施されており、検査路から手の届く箇所及び一部で高所作業車等の近接目視及び打音点検が行われ、それ以外は遠望目視により判断しているのが実状である。また、建設時の初期欠陥に起因した鉄筋腐食に伴うひび割れや、かぶりコンクリートの浮きによる空隙の発生は、時間の経過に伴って進行するので、劣化が顕在化する前の早期に発見することが必要である。

2. 研究の目的と検証方法

2.1 研究の目的

赤外線サーモグラフィは、健全部と空隙部の温度差で空隙部を抽出するものである。従って、外気温の日較差条件が測定精度に大きく影響する。現在、中日本高速道路(株)の基準においては、赤外線法の測定条件である外気温日較差7以上の制約条件により、現地点検の中での稼働日数に大きく

表 1 点検内容(高速道路)

項目	高速
位置付け	保全点検要領(H18.4) ²⁾
点検頻度	5年に1回
点検方法	近接目視・打音
点検内容	上部工、下部工、支承等について、部位毎のひび割れ、はく離(浮き)、鉄筋の露出・腐食など損傷別に分類。 A.A. (A.1, A.2, A.3=A), B, C, O.K, Eの8(6)段階で評価を行う。
点検実施体制	・点検は関連会社が実施。 ・損傷評価については、監督員による判定会議を実施。

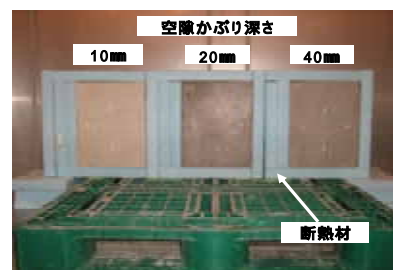


写真 1 模擬空隙試験体

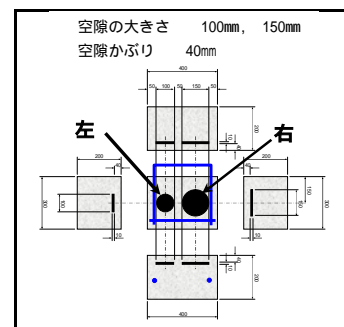


図 1 模擬空隙試験体

影響するため、赤外線サーモグラフィを用いた点検が本格導入に至っていない。しかし、建築関係のタイル外壁等の点検³⁾では、日較差条件5 以上を適用範囲として実施されている。

そこで、本研究では今後の橋梁点検においての環境条件を明らかにすることを目的に、模擬空隙試験体により検証し、さらに、NEXCO中日本の管理する高速道路跨道橋の緊急点検の中で浮き部の抽出精度を検証した。

2.2 検証内容

主な検証内容について下記に記載する。

(1) 恒温室を用いた模擬空隙試験体の熱画像実験

恒温室を利用して、H2~H19(18年間)の昼10時~14時にピークを迎える年の温度平均を採用し、日較差5 程度における1日の外気温変化を再現し、写真-1及び図-1に示す空隙かぶり10mm、20mm及び40mmの模擬空隙試験体(3体)を用いて、熱画像の健全部及び空隙部の温度差より空隙部の抽出状況を確認した。

(2) 跨道橋を対象にした熱画像検証

写真-2に示すNEXCO中日本の管理する高速道路の跨道橋を対象に、H20年6月からH20年10月の間で赤外線サーモグラフィを用いて、はく離・浮き箇所のスクリーニングを実施し、一部の跨道橋においては、打音点検を実施して浮き部の抽出精度を確認した。



写真 2 跨道橋撮影状況(車線規制内)

表 2 赤外線サーモグラフィの性能

仕様項目	内容
測定温度範囲	-20 ~100
最小温度分解能	0.03 (S/N改善時)
検出素子	2次元非冷却マイクロボロメータ
画素数	320(H)×240(V) 76,800画素
測定波長	8~14 μm
空間分解能	1.4mrad 35mm(標準レンズ使用時)

3. 赤外線サーモグラフィによる検証

3.1 赤外線サーモグラフィの性能

本検証においては、NEXCO中日本の赤外線法による点検マニュアル⁴⁾の性能基準である、「(1)温度分解能が0.03 以下、(2)測定波長帯が長波長である」を満足する性能を有する表-2および写真-3に示す赤外線サーモグラフィを使用した。



写真 3 赤外線サーモグラフィ (A製品:76,000万画素)

3.2 外気温日較差の現況

上記項目で記載したとおり外気温日較差は、熱画像による空隙部の抽出に大きく影響する。

そこで、横浜市の過去10年間の各月別の日較差日数割合(5 以上・7 以上)をまとめたものを、表-3に示す。調査結果より、5 及び7 以上の日較差日数の割合は、3月が最も多く、6月が最も少ないことが確認された。6月の日較差が小さい理由としては、梅雨時期で晴天日が少ないことがあげられる。

表 3 各月別平均日較差割合 (横浜市: H10~H19)

日較差	1月	2月	3月	4月	5月	6月
5 以上	83.2%	79.0%	87.4%	80.3%	82.6%	66.1%
7 以上	56.8%	59.0%	70.0%	63.5%	58.7%	42.3%
平均気温	6.0	6.8	9.7	14.7	18.7	22.0
日較差	7月	8月	9月	10月	11月	12月
5 以上	78.4%	82.6%	70.0%	68.7%	73.5%	81.3%
7 以上	78.4%	82.6%	70.0%	68.7%	73.5%	81.3%
平均気温	25.5	26.9	24.0	18.5	13.4	8.5

年間平均気温:16.3

本実験においては、各月の平均気温より、今回の恒温室を用いた模擬空隙試験体の熱画像実験では、赤外線サーモグラフィでの調査時における外気温の高低の影響を把握するため、年間の平均気温が標準的である11月(13.4)(日較差5.2)と平均気温が最も高い8月(26.9)(日較差5.7)に設定して実験を実施した。

3.3 恒温室を用いた模擬空隙試験体の熱画像実験結果

既往文献の中で空隙部を認識するための温度差は日射が当たらない面については、0.5 程度が目安⁵⁾といわれている。

そこで、0.5 の数値に着目し、恒温室を用いた赤外線サーモグラフィによる実験を実施した結果、0.5 ~1.0 の範囲において、健全部と空隙部の熱画像の違いにより空隙部が明確に抽出された。また、表 - 4 に記載のとおり当該範囲を明確に空隙部の抽出が可能な抽出判定温度差区分(B)とし、かつ、空隙部の抽出が確認された 0.4 ~0.5 範囲を抽出可能な抽出判定温度差区分(C1)と定義し、抽出判定温度差による熱画像空隙抽出状況を整理した。

11月(日較差 5.2)の外気温変化及び空隙かぶり 10mmの試験体で上記の恒温室実験による抽出状況に基づき整理したものを表 - 5 及び図 - 2 に示す。今回の実験結果より日較差 5 程度においても約7時間程度、空隙部の抽出が可能であることが確認された。また、空隙かぶり 20mmの試験体においても約5時間程度、空隙部の抽出をすることが可能であったが、空隙かぶり 40mmにおいては、すべての時間帯で抽出判定することが難しいことが明らかになった。

表 4 温度差による熱画像空隙抽出状況

抽出判定温度差の区分	抽出判定温度差		画像抽出状況
	A	1 以上	健全部と損傷部の熱画像の色の違いにより損傷部を極めて明確に抽出できる。
B	0.5 ~ 1	健全部と損傷部の熱画像の色の違いにより損傷部を明確に抽出できる。	
C1	0.4 ~ 0.5	B 判定には劣るが、健全部と損傷部の熱画像の色の違いにより損傷部を抽出できる。	
C2	0.4 以下	健全部と損傷部の熱画像の色の違いにより損傷部と断定することが難しい。	

抽出判定温度差の定義
開始時(日の出)の健全部と損傷部の温度差を基準値(ゼロ)とし、開始時(日の出)と各時間の健全部と損傷部の温度差を差し引いたもの。

表 5 熱画像検証(11月・空隙かぶり 10mm)

時間	6時		14時	
赤外線サーモグラフィ画像 (11月・空隙かぶり10mm)				
外気温(°C)	15.9		20.5	
健全部温度(°C)	14.68		16.58	
空隙部温度(°C) 左/右	14.69	14.63	17.32	17.39
- 温度差(°C) 左/右	0.01	-0.05	0.74	0.81
(6時-各時間)補正温度差(°C) 左/右	0.00	0.00	0.73	0.86
抽出範囲	C2		B	

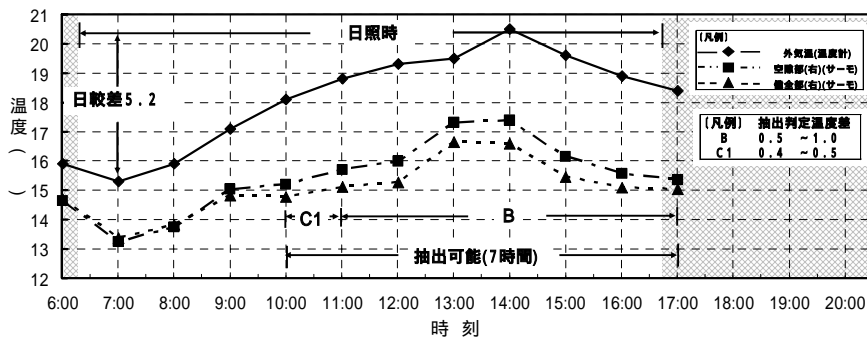


図 2 1日の温度変化(11月・空隙かぶり 10mm)

次に、8月(日較差 5.7)の外気温変化及び空隙かぶり 10mmの試験体で、上記の恒温室実験による抽出状況に基づき整理したものを図 - 3 に示す。今回の実験結果より、日較差 5 程度においても約6時間程度、空隙部の抽出が可能であることが確認された。また、空隙かぶり 20mmの試験体においても約5時間程度、空隙部の抽出をすることが可能となったが、空隙かぶり 40mmにおいては、すべての時間帯で抽出判定することが難しいことが明らかとなった。

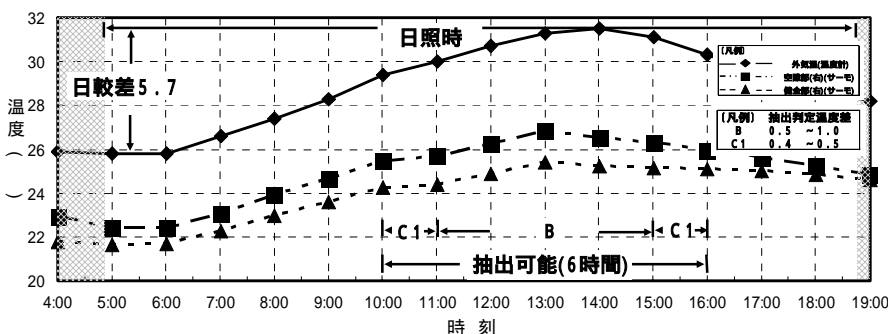


図 3 1日の温度変化(8月・空隙かぶり 10mm)

3.4 跨道橋を対象にした熱画像検証

3.4.1 撮影条件

現在、NEXCO中日本の管理する東名高速(東京IC～三ヶ日IC(251.3 km))を横過する跨道橋において、平成21年3月末時点の繊維シートによるはく落対策状況は、表-6に示すとおり約18%に留まっており、約8割において繊維シート対策が実施されていない。そこで、H20年6月よりNEXCO中日本の管理する高速道路のはく落未対策の跨道橋点検時に赤外線法を用いて、はく離及び浮き箇所のスクリーニングを実施した。撮影条件は表-7に示すとおりであり、対象面角度は、図-4のとおり定義した。また、本検証においては恒温室の実験と同様の表-2及び写真-3に示す赤外線サーモグラフィを使用した。

表 6 はく落対策状況

対象範囲	未対策	対策済	全数
東名高速	194橋	42橋	236橋
東京IC～三ヶ日IC	82.2%	17.8%	100%

表 7 撮影条件

項目	内容
跨道橋高さ	11.7m以下
撮影条件	距離11.7m以下 対象面角度30°以上 検出浮き部の大きさ、縦5cm及び横5cm以上
環境条件	気温日較差5°以上で雨天でないこと
判定条件	A:健全部と空隙部の温度差が1°以上の対象物 B:健全部と空隙部の温度差が0.5～1°以上の対象物 C:その他(0.5°以下であるが、視認上変状の疑いがある箇所)

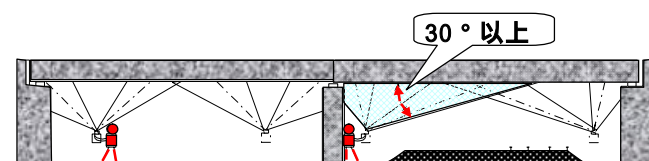


図 4 撮影条件(角度条件概念図)

なお、上記条件設定理由として跨道橋高さは、表-2に示す赤外線サーモグラフィ(A製品)の空間分解能⁷⁾が1.4mradより、検出浮き部5cm角の撮影可能距離は11.7mであるので、対象となる跨道橋高さ11.7m以下を対象とし、図-4に示す対象面角度30°以上は、NEXCO中日本の赤外線法による点検マニュアル⁴⁾に基づいている。

さらに、跨道橋を対象にした検証は、実験結果より空隙部を明確に抽出可能な0.5°以上(表-4に示すA・B範囲)とし、表-4に記載する点検における判定条件は、1°以上をA判定、0.5～1°をB判定、0.5°未満は視認上変状の疑いがある箇所のみC判定として抽出した。

3.4.2 判定分類方法

赤外線サーモグラフィによる点検精度及び見落とし割合を把握するため、打音検証結果を下記の3タイプに分類した。

- (1)タイプ1:赤外線法で健全部と浮き部の温度差を抽出し、かつ打音結果より浮き部有りと判定
- (2)タイプ2:赤外線法で健全部と浮き部の温度差を抽出したが、打音結果より浮き部無しと判定
- (3)タイプ3:赤外線法で健全部と浮き部の温度差抽出はないが、打音結果より浮き部有りと判定

3.4.3 撮影判定結果

表-7に示すとおり赤外線サーモグラフィのA～C判定で抽出した箇所で、特に緊急性のある箇所のみ37箇所打音点検し、検証した結果を表-8に示す。

赤外線法浮き部抽出(タイプ1)の撮影条件適合箇所では、約46%の赤外線法との抽出精度を確認した。図-5に示すように赤外線法の熱画像で、浮き部を黒色で抽出し、打音点検した結果、浮き部を確認した。なお、図-5の可視画像は打音後の状態を撮影したものである。

赤外線法浮き部誤抽出(タイプ2)の撮影条件適合箇所では、約38%で誤抽出部を確認した。これは、図-6に示すようにライニングの色ムラを誤って浮き部と抽出したことが要因として挙げられる。また、赤外線法浮き部誤抽出箇所の理由を整理した結果、すべて被写体の色・材質による理由であることを確認した。

表 8 撮影判定結果(タイプ別)

タイプ別	浮き部の有無		撮影条件適合箇所
	赤外線法	打音点検	
タイプ1	有	有	45.9%(17)
タイプ2	有	無	37.8%(14)
タイプ3	無	有	16.2%(6)
合計			100%(37)

()内の数値は、赤外線法による判定数

赤外線法浮き部見逃し(タイプ3)の撮影条件適合箇所では、約16%の赤外線法浮き部見逃しを確認し、図-7に示すように隅角部で健全部と空隙部の温度差が収束し温度差が抽出されなかったこと、及び図-8に示すように赤外線法で黒色で抽出していたが、調査結果の解析時における人的ミスによる見落としが赤外線法の判定漏れの要因として挙げられる。また、赤外線法浮き部見逃し理由を整理した結果、温度収束と人的見逃し理由が全体の各々50%であることを確認した。

本検証結果より、赤外線法による点検手法は、外気温日較差条件を5程度に変更した。その際、日射無で、かつ撮影条件適合時には、表-9に示すとおり赤外線法浮き部誤抽出(タイプ2)を、約38%抽出した。なお、この原因は、表面のライニング等の被写体の色・材質(色ムラ)を赤外線調査で浮き部と判定した理由によるものである。したがって、今後の点検時に上記事項を考慮して、点検することにより誤抽出をすべて排除すれば、点検精度は約84%に上がる。

さらに、赤外線法浮き部見逃し(タイプ3)は、温度収束の理由で約8%、人的見逃しの理由で約8%となり、併せて約16%抽出された。したがって、今後の点検後の解析時に熱画像の黒色表示の見落としを改善し、人的見逃し理由のみすべて排除することにより、点検精度は約92%に向上する。

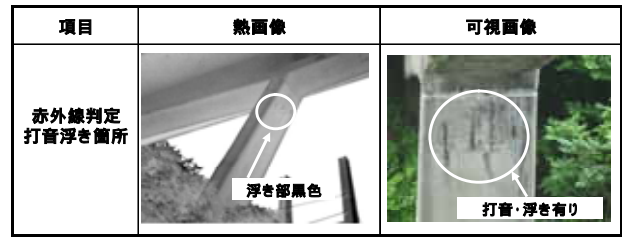


図 5 赤外線法浮き部抽出事例(タイプ1)

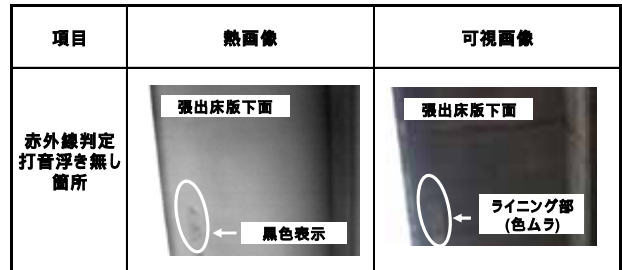


図 6 赤外線法浮き部誤抽出事例(タイプ2)

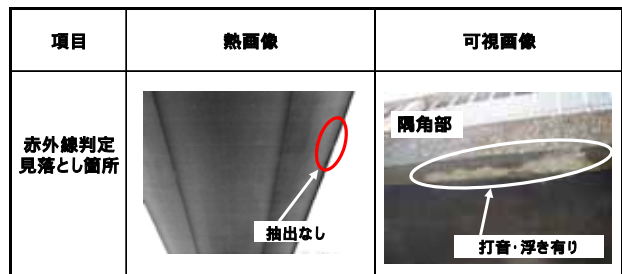


図 7 赤外線法浮き部温度収束による見逃し事例(タイプ3)

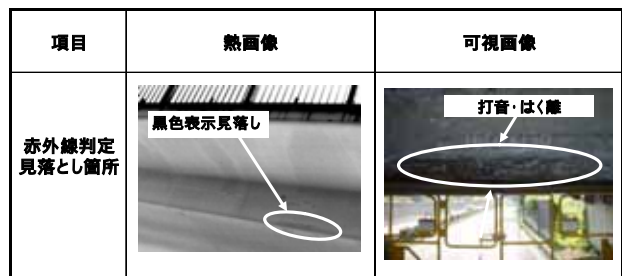


図 8 赤外線法浮き部の人的ミスによる見逃し事例(タイプ3)

表 9 撮影判定結果(タイプ別)

タイプ別	張出床版下面	地覆下面	地覆側面	主版側面	主版下面	その他	合計
タイプ1	8.1%(3)	0.0%(0)	2.7%(1)	13.5%(5)	18.9%(7)	2.7%(1)	45.9%(17)
タイプ2	13.5%(5)	2.7%(1)	0.0%(0)	2.7%(1)	16.2%(6)	2.7%(1)	37.8%(14)
タイプ3	2.7%(1)	2.7%(1)	2.7%(1)	2.7%(1)	5.4%(2)	0.0%(0)	16.2%(6)
合計	24.3%(9)	5.4%(2)	5.4%(2)	18.9%(7)	40.5%(15)	5.4%(2)	100.0%(37)

()内の数値は、赤外線法による判定数

しかし、赤外線法浮き部誤抽出(タイプ2)(図-9参照)において、表-9に示すとおり張出床版下面(約14%)、主版下面(約16%)で、併せて約30%の誤抽出をした。また、赤外線法浮き部見逃し(タイプ3)において、主版下面(約5%)で打音点検結果より浮き部を見逃した。上記結果より、張出床版下面及び主版下面に多くの割合で誤抽出、見逃しを確認したので、今後の跨道橋で実施される打音点検結果を反映し、判定結果を構造部位別に比較し、赤外線法の点検の問題点を整理しておく必要がある。

構造部位別	張出床版下面		主版下面	
画像別	熱画像	可視画像	熱画像	可視画像
赤外線判定 打音浮き無し 箇所	<p>黒色表示・浮き抽出</p> <p>張出床版</p>	<p>ライニング部(色ムラ) 錆汁の影響</p> <p>張出床版</p>	<p>黒色表示・浮き抽出</p> <p>主版下面 張出床版</p>	<p>コンクリート材質の 色ムラ</p> <p>主版下面 張出床版</p>

図 9 構造部位別浮き部誤抽出事例(タイプ2)

4 結論

恒温室を用いた外気温日較差 5 程度の際における 1 日の赤外線熱画像温度変化を再現した結果、及び N E X C O 中日本の管理する高速道路の跨道橋を対象に赤外線法で検証した結果より、下記事項が明らかになった。

(1) 外気温日較差 5 程度において、11 月(日較差 5.2)及び8月(日較差 5.7)における過去 10 年間の横浜市の温度変化を再現した実験結果より、空隙抽出可能となる健全部と空隙部の抽出判定温度差である 0.4 以上が、11 月で約 7 時間、8 月で約 6 時間生じ、100 mm 及び 150 mm の両方の空隙大きさで、空隙かぶり 20 mm まで測定可能であることが確認され、かつ、外気温の高さに影響なく、空隙抽出可能であることが明らかになった。

また、H19 年横浜市気象データ(雨天時は除く)より、日較差条件を 5 以上(5 以上 : 204 日、7 以上 : 151 日)にすれば 1.4 倍程度、7 以上の日較差条件の場合より測定可能日数が多くなり、日較差による調査環境条件の制約が小さく、赤外線法の適用が容易になる。

(2) 跨道橋を対象とした熱画像検証結果より、撮影条件に適合した赤外線法浮き部誤抽出(タイプ2)は約 38%、赤外線法浮き部見逃し(タイプ3)は、温度収束の理由で約 8%、人的見逃しの理由で約 8% となり、併せて約 16% 抽出したが、表面のライニング等の被写体の色・材質(色ムラ)に対する点検時における確認及び人的見逃しを改善することにより、約 92% まで点検精度は向上すると思料される。

したがって、橋梁部における赤外線法調査時において、上記事項を改善することにより、赤外線サーモグラフィで約 9 割以上の精度で浮き・はく離を抽出でき、打音点検前のスクリーニングに適用可能であると推察される。なお、赤外線法浮き部誤抽出(タイプ2)にあたっては、道路管理を行う上では安全側に働く事象であり、直接的に影響の生じる可能性がある赤外線法浮き部見逃し(タイプ3)を改善していくことが特に重要である。

最後に、赤外線サーモグラフィ調査にご協力いただいた中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株)の佐藤昌博氏、菅原隆義氏に心より感謝いたします。

[参考文献]

- 1) (社)土木学会 コンクリート標準示方書 [維持管理編] ,pp81-120,平成 19 年 12 月
- 2) 中日本高速道路(株)保全点検要領 p22, p30,平成 18 年 4 月
- 3) (社) 建築・設備維持保全推進協会 B E L C A タイル外壁及びモルタル塗り外壁定期的診断マニュアル p19,平成 9 年 6 月
- 4) 日本道路公団 赤外線カメラによるコンクリート構造物詳細点検マニュアル(案) p6,平成 15 年 10 月
- 5) 魚本健人監修 コンクリート構造物の検査・診断 - 非破壊検査ガイドブック - ,理工図書, pp157-158,平成 15 年 8 月
- 6) (財)土木研究センター 赤外線サーモグラフィによる変状調査マニュアル, p21,平成 17 年 3 月
- 7) (社)日本非破壊検査協会 赤外線サーモグラフィによる非破壊試験の標準用語 N D I S , pp3-5,平成 21 年 1 月改正