

論文 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

橋本 和明*1・明石 行雄*2・川西 弘一*3

要旨：赤外線サーモグラフィ法は表面温度を測定して特異な温度分布を内部欠陥と判定する。診断対象の部材厚が薄いと、撮影面の裏側から日射熱等の影響を受け、内部欠陥深さの検出限界や検出時間帯が異なる。本論文は、コンクリート部材厚が比較的薄い箱桁橋、鋼橋のコンクリート床版に着目し、橋種別におけるコンクリート部材内部の熱流の推移と特異な温度分布の関係を整理し、赤外線サーモグラフィ法を現地で実施する場合の適した調査時間帯等の留意点を紹介するものである。

キーワード：赤外線サーモグラフィ法、非破壊検査、温度分布、欠陥検出

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、内部欠陥の表面上に特異な温度分布が出現すると欠陥と判断する。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。すなわち、被写体内部に熱流が発生しないと特異な温度分布は表面上に出現しない。よって、赤外線法は熱流の発生が診断を実施する上で重要なカテゴリーとなる。既往のパッシブ法による研究では、熱流が撮影面側からの熱収支によって発生するが、内部欠陥深さは、撮影面から 4cm 奥が検出限界とされている^{1),2),3)}。そして、鋼橋のコンクリート床版は、桁の影響により、気温が大きく変動しないため、熱流が発生しないとし、赤外線法で、あまり診断されていない⁴⁾。

また、供用年数が経過すると舗装下への浸透水により床版上面の鉄筋が腐食し、床版コンクリートの剥離が発生することがある。この損傷を舗装面から赤外線法で捉えようとする手法が試されているが、検出精度の向上と交通規制の問題を解決する必要がある⁵⁾。

筆者らは、平成 14 年度から現在に至るまで RC 橋を診断対象とした赤外線法を実施し、打音検査でその赤外線法の検出精度を確認してきた(診断実績 20 万 m²)。RC 橋については、これまで撮影面と外部との熱収支を利用する手法により多くの欠陥検出のための成果が得られている。ただし、筆者らの経験では、壁高欄部の内部欠陥を検出することが一番困難であった。昼間の診断時は日射熱が移動し、日射面が東面から西面に変化すると、熱エネルギーの移動方向が短時間で逆転するため、特異な表面温度分布は周辺より高温になったり、低温になったりする。

本論文は、これらの技術的な問題点を解決するために、

部材厚が比較的薄いコンクリート部材で構成される鋼橋のコンクリート床版、コンクリート箱桁の熱的環境を計測し、橋種毎に赤外線法を採用する際の留意点(診断に適した時間帯)を紹介するものである。

2. 橋種別における熱的環境

2.1 鋼橋の熱的環境

(1) 調査方法と目的

調査橋梁を高知自動車道の鋼橋とし、測定機器の配置を図-1に示す。測定期間は平成 20 年 7 月とし、測定間隔を 20 分とした。舗装面が受ける日射量と、その熱がコンクリート床版を通過して、床版下面の空気をどのような温度状況にしているか調査した。

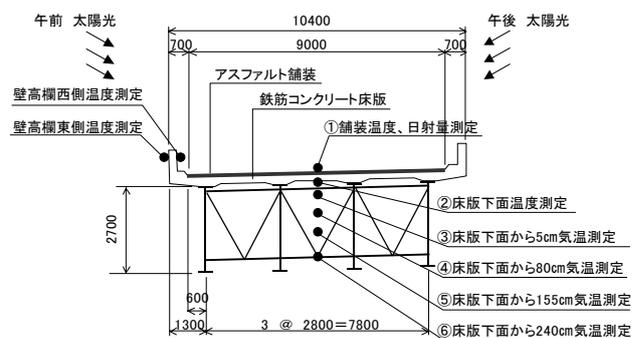


図-1 測定機器の配置状況 (高知自動車道)

(2) 桁内温度と外気温

日射量と外気温、桁内気温の測定結果を図-2に示す。床版下から 5cm の桁内気温は、高架下日陰部の外気温と傾向は同じであるが、7 月 24 日を例にとると外気温が上昇する時間帯は、外気温と同じ上昇傾向にあるが、外気

*1 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 調査設計部調査設計課課長 (正会員)

*2 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 技術管理部 部長 (正会員)

*3 西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 調査設計部調査設計課

温が下降する時間帯は 22 時まで下がらない。その傾向は日射量の累積量が大きいほど強い。そして、桁内床版から離れると外気温に近づく。また、日射量の累積値が多いと、桁内のコンクリート床版に近い気温の日較差は変動が少なくなり、気温で床版内部に熱流を発生させることは難しいと判断できる。

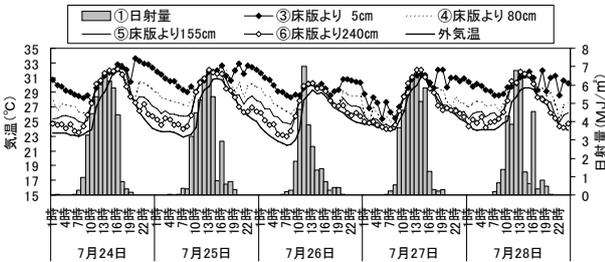


図-2 桁内温度と外気温の関係

(3) 舗装表面温度とコンクリート床版の温度

舗装と床版下面コンクリート温度の関係を図-3 に示す。日射量、舗装表面温度のピークは 12 時前後となるが、床版下面温度のピークは 18~20 時となる。舗装表面温度と日射量の履歴から、日射量は舗装温度に直接影響を与えている。日射量が多い時間帯は、舗装表面温度が床版下面コンクリート温度より大きい。逆に日射のない時間帯になると床版下面コンクリート温度の方が舗装表面温度よりも大きくなる。この結果から、日射を受ける時間帯と受けない時間帯によって熱流の方向が異なることがわかる。

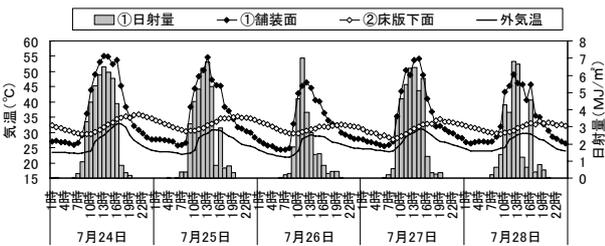


図-3 桁内温度と外気温の関係

(3) 壁高欄部の温度

南北に位置する橋梁では、壁高欄は日射熱が午前中に照射される東側面と午後には照射される西側面によって表面の温度履歴が大きく異なる (図-4)。壁高欄もコンクリート床版と同様、熱流の方向は逆転することが確認されるが、その時間帯 (周期) が短い。7時から12時までの熱流は東側から西側に向かうが、12時から22時までは西側から東側に向かう。このように、壁高欄は熱エネルギーの移動方向が短時間の間で逆転するため、壁高欄部にある内部欠陥の表面温度は健全部より高温になったり、低温になったりする。

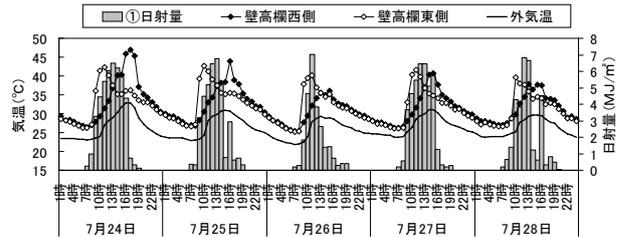


図-4 壁高欄における表裏の違いによる温度

(4) 測定結果の整理

高知自動車道の鋼橋における測定結果を整理すると以下ようになる。

- 日射熱による床版内部の欠陥の検出では熱流の方向が舗装面から撮影面となるため、欠陥部は周囲より低温として検出される。
- 日射を受けない時間帯の熱流の方向は複雑になる。床版内部が一番高い温度となるため、舗装面と撮影面から熱が放出される。このため、時間帯によって検出できる欠陥の深さに違いが出てくる。
- 7月24日 (図-4) を例にとると、南北に位置する橋梁は、東側壁高欄の赤外線診断時間帯は10時~12時、西側壁高欄の赤外線診断時間帯は18時~翌6時が適切である。
- 床版下面からの診断は熱流が発生している18時~翌1時が適切であるが、診断橋梁の熱的環境によって変動する可能性が残る。

2.2 箱桁橋の熱的環境

(1) 調査方法と目的

調査橋梁を松山自動車道の箱桁橋とし、測定機器の配置を図-5 に示す。

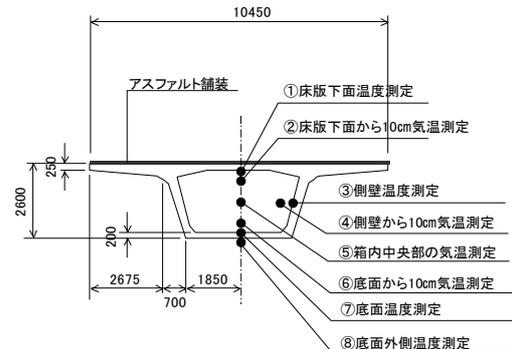


図-5 測定機器の配置状況 (松山自動車道)

測定期間は平成 20 年 9 月とし、測定間隔を 20 分毎とした。箱桁橋は鋼橋と異なり、箱内部に密閉された空気が存在している。この箱内空気の状態を把握することを目的とした。なお、日射量については調査対象橋梁の周辺で測定した。

(2) 箱内温度と外気温

日射量と外気温、箱内気温の測定結果を図-6に示す。箱内の気温は、外気温が一番高い時間帯（13時頃）に低くなり、22時まで上昇し、測定位置によって温度に違いが確認されるが、基本的に外気温より高い状態で推移している。そして、箱内気温は上面から下面に向かって低い状態になっているが、日射量が少ない9月15日の場合は、箱内の測定位置（上下）に関係なく、下がりつづける状態にある。以上の事象から、箱内気温は日射熱の影響を強く受けていることがわかる。箱内気温は日射終了後14時間、外気温が最低になって4時間後に最低となる。

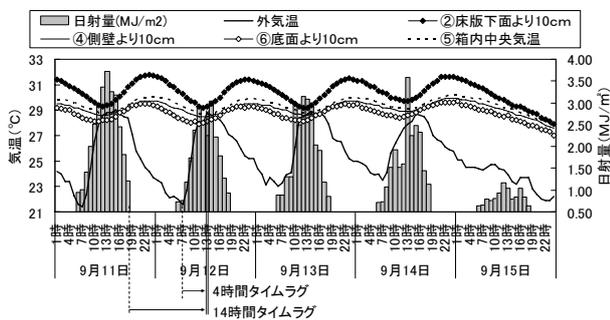


図-6 箱内温度と外気温の関係

(3) コンクリート部材の温度

温度変化が著しいコンクリート部位は、上床版であり、同時刻で外気温と比較すると8℃以上の温度差が確認できる（図-7）。また、下床版の部材は箱内側と箱外側の温度差が5℃以上であることが確認できる。この事象から、箱桁橋のコンクリート部材の上床版は日射エネルギーを直接受けており、下床版と側壁は箱内気温の影響を受ける。ただし、箱内気温は上床版の影響を受けており、間接的に日射熱の影響を受けることが確認できる。

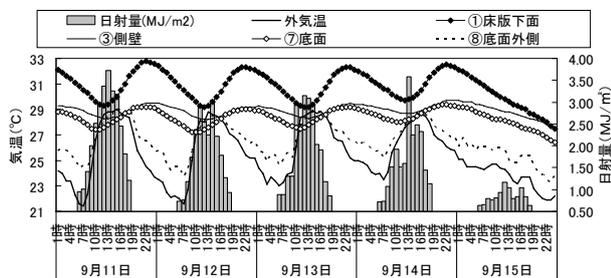


図-7 コンクリート部材温度と外気温の関係

(4) 日射熱と箱内気温の関係

箱内気温は、日射熱と外気温の関連性を整理するため、時系列分析を行う。SPSSを使用し、ARIMAモデルを採用する^{6),7)}。時系列分析結果を表-1に示す。この結果か

ら箱内気温は日射量と外気温の影響を受けていると判断できる（1%有意）。箱内気温の谷部は日射の終了、外気温の谷部との間に、それぞれ14時間、4時間遅れのタイムラグ発生している。日射量と外気温でタイムラグに違いがあるが、これは、日射熱が床版上面から伝達され箱桁内空気の温度を上昇させ、箱桁の四方のコンクリート壁を通過して熱が発散していくために時間がかかるためである。

表-1 時系列分析 (ARIMAモデル)

項目	推定値	標準誤差	有意確率
箱内気温：中央 (°C)	26.698	0.315	0.000
外気温：4時間前 (°C)	0.097	0.012	0.000
日射量：14時間前 (MJ/m ²)	0.295	0.027	0.000

予測値：箱内温度(°C) = 26.698 + 0.097 × 外気温：4時間前(°C) + 0.295 × 日射量：14時間前(MJ/m²) (1)

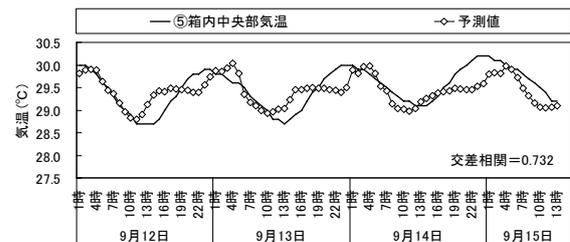


図-8 箱内温度の予測精度

(5) 測定結果の整理

松山自動車道の箱桁橋における測定結果を以下に示す。

- 箱桁橋は鋼橋より複雑な熱流が発生している。
- 箱内気温は日射熱の強さと外気温の影響を複雑に受けていることが確認できる。
- 本実験結果では、日射熱が舗装に照射されると、上床版を33℃以上に暖めることになり、間接的に桁内の気温を上昇させている。そのため、日射終了後14時間程度で箱内気温は最低となる。
- 下床版は部材の上下端における温度差が5℃以上あることから、外気温に関係なく下向きの熱流が発生している。この現象は日射熱の影響で箱内気温が暖められ、その暖められた空気が下床版を暖めることで生じるものである。
- 箱桁橋は部位別に診断時間帯が異なることから、全ての部位で熱流が発生している時間帯（19時～翌7時）で診断することが必要である。

2.3 RC 橋の熱的環境

(1) 調査方法と目的

診断橋梁を高松自動車道のRC橋とし測定機器の配置を図-9に示す。測定期間は平成20年10月とし、測定間隔を20分とした。RC橋における日射熱と外気温の影響を確認するために、床版下面の充実部コンクリート表面温度と外気温、日射量を測定する。

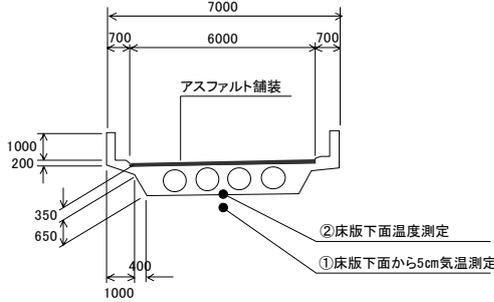


図-9 測定機器の配置状況 (高松自動車道)

(2) 床版温度と外気温

日射量と外気温、床版の充実部コンクリート温度の測定結果を図-10に示す。この結果から、外気温が上昇するとコンクリート床版の温度が上昇するが、外気温までは上昇しない。そして、外気温が下降するとコンクリート床版も下降するが外気温までは下らない。そして、10月14日の曇りで日較差が5℃以下の場合には外気温とコンクリート床版の温度がほぼ同じになる。また、外気温と床版下面から5cm下の気温とほぼ同じ計測結果であったことから、RC橋については、外気温の変動によってコンクリート内部に熱流が発生している。よって、鋼橋のコンクリート床版や箱桁橋とは熱流の発生状況が全く異なることがわかる。この事象は、日射熱がボイド部を暖めているものの、部材厚が厚いため、外気温の変動が熱流発生に大きく寄与していることを示している。

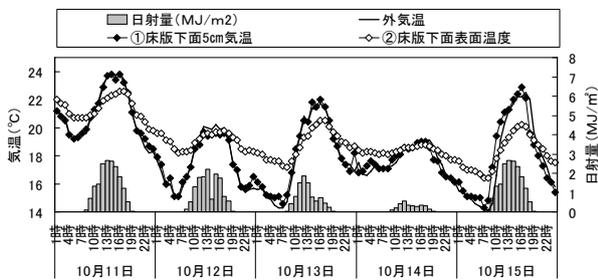


図-10 床版温度と外気温の関係

(3) 測定結果の整理

高松自動車道のRC橋における測定結果を整理すると以下ようになる。

- RC橋はコンクリート部材が厚いため、日射熱の影響をあまり受けない。
- 赤外線法の撮影面側のみの熱収支によって熱流が発生しており、既往の研究結果と同じ傾向である。
- 赤外線法の診断時間帯は、昼間と夜間の両方可能であるが、熱流の発生源は外気温のみであるため、検出可能な温度差が小さいことが考えられる。このため、図-10中の10月14日のように日較差が小さい熱的環境時は診断できない。

3. コンクリート部材厚 30cm 未満の熱流

3.1 日射の影響

(1) 日射熱の間接効果の概念

部材厚が30cm未満であると日射熱が直接・間接的に影響を与える概念を図-11に示す。熱流の方向によって、内部欠陥部表面の温度分布は周辺温度より低温になったり高温になったりする。欠陥部は日射熱が診断対象面に直接照射されると周辺より高温として検出される。そして、日射熱が撮影面の裏側から照射される間接効果時は低温で検出される。しかし、間接効果時の検出時間帯は、日射熱が撮影面まで到達するまで時間を要する(部材厚30cmであると概ね10時間必要)。この間接効果時の検出可能深さは直接効果時の診断深さより深い欠陥部も検出可能となる。内部欠陥内に熱流を遮断する空気層が、介在していれば舗装下の浮き・剥離を床版下面より検出可能となる。また箱桁橋は日射熱によって、様々な熱流が発生することになり、赤外線法を実施するにあたって、内部欠陥の表面上に特異な温度分布が検出される時間帯を把握することが非常に難しい。

橋種	直接効果	間接効果
全橋種	内部欠陥 調査対象面 温度上昇	内部欠陥 調査対象面 温度下降
鋼橋	内部欠陥 調査対象面 調査対象面に太陽光は照射されないため、直接効果はない。	太陽光 温度下降
箱桁橋	内部欠陥 調査対象面 調査対象面に太陽光は照射されないため、直接効果はない。	太陽光 箱内気温 温度下降

図-11 日射熱がコンクリート部材に与える効果

(2) 間接効果時の熱画像例

鋼橋のコンクリート床版を赤外線映像装置にて撮影した熱画像例を図-12に示す。撮影に使用した赤外線映像装置は温度分解能が0.08℃以下で検出波長帯が長波長域の機能を有するものである。この熱画像の撮影時間は19時であり、日射熱の影響で周辺温度より低温で検出されている。この箇所は診断対象面から20cm奥で鉄筋の腐食による剥離が確認された箇所であり、6時から16時の間は特異な温度分布として検出されない。

このように、日射熱が撮影面の裏側から照射され、日射熱が診断対象面まで到達されると特異な温度分布として検出可能となる。しかし、検出時間帯は夕方となり、診断時間帯が限られる。

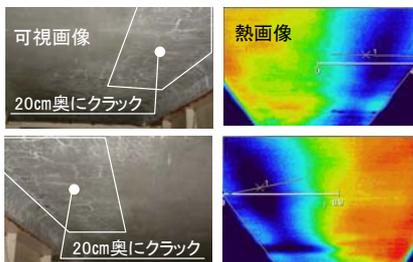


図-12 鋼橋のコンクリート床版の熱画像
(撮影時間 19時)

3.2 箱桁橋における熱流と検出時間帯

(1) 非定常熱伝導解析のモデル

箱桁橋のモデルを図-13に、解析に使用する熱的条件と物性値を図-14と表-2に示す。なお、ここでの内部欠陥の大きさは10cm、クラック幅1mmとし、欠陥深さを2cmと4cmとする。内部欠陥の物性値は筆者らが室内実験等で求めたものを引用した。また、クラック幅が1mm未満であると熱流を遮断しなくなる事象(第4種の境界条件)が発生する。このため、表-2内に示す仮想物体を設定することで対応した⁸⁾。

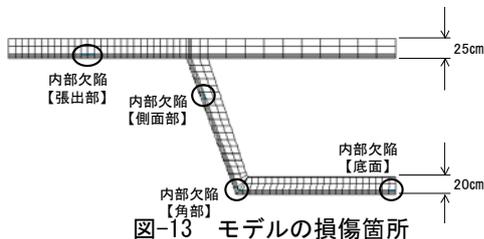


図-13 モデルの損傷箇所

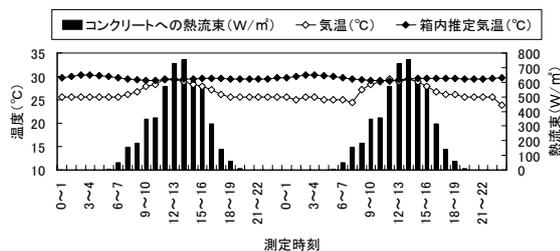


図-14 解析に使用する境界条件

表-2 解析に用いた材料定数

材料	密度 kg/m ³	比熱 J / (kg · K)	熱伝達率 W / (m ² · K)
コンクリート	2200	900	1.2
内部欠陥部 (仮想物体)	2200	900	0.2

(2) 解析結果 (検出可能な時間帯)

内部欠陥の位置別に健全部と内部欠陥部表面の温度差を診断時間毎に示す(図-15, 図-16)。張出部に内部欠陥が存在すると14時から翌3時まで冷たく検出され、その温度差は深さ4cmであっても1℃を超える。一方、側面と底面に存在する内部欠陥は、温度差が小さい。特に、深さ4cmの場合は0.2℃を下回る結果となり、検出可能な赤外線映像装置が限定される。ただし、温度差0.1℃が検出可能な赤外線映像装置を利用するのであれば、箱桁橋であっても、診断は可能である。ただし、撮影時間帯は夕方の18時から翌3時までと限定される。

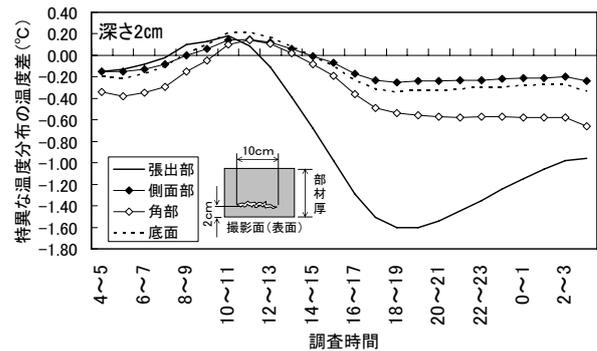


図-15 特異な温度分布の温度差
シミュレーション結果 (内部欠陥深さ 2cm)

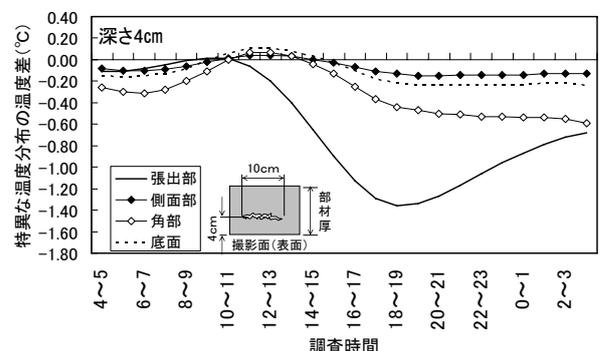


図-16 特異な温度分布の温度差
シミュレーション結果 (内部欠陥深さ 4cm)

3.3 鋼橋のコンクリート床版における検出時間帯

(1) 非定常熱伝導解析のモデル

筆者らは舗装下の浮き・剥離を鋼橋の下面から、赤外線法により検出した実績があるため、鋼橋における検出

限界を熱伝導解析にて確認する（図-17）。解析に使用する熱的条件と物性値は図-14 と表-2 とした。

(2) 解析結果の評価（検出可能な時間帯）

内部欠陥深さが2cmと18cmを想定しシミュレーションを実施した。午前中は外気温の影響を受けるため、内部欠陥深さ2cmは検出できるが、深さ18cmは検出できない。夕方の16時になると日射熱がコンクリート床版の下面まで達するため、深さ18cmと2cmともに周辺部より低温で検出される。このように、赤外線法は測定面に対する熱流の向きによって、検出できる内部欠陥深さ、時間帯が異なる。

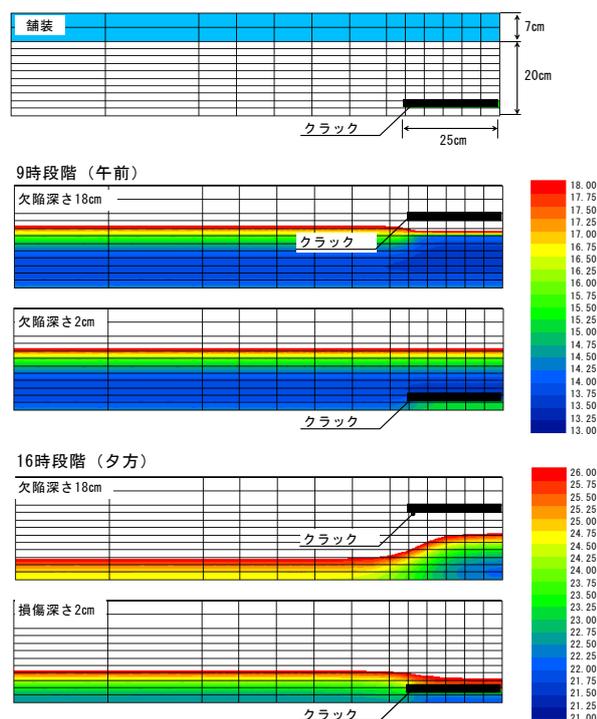


図-17 モデルとシミュレーション結果
(内部欠陥深さ2cmと18cm)

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 橋種によって熱的環境が大きく異なる。コンクリート部材厚が薄い箱桁橋と鋼橋のコンクリート床版は日射熱の影響を強く受ける。
- (2) 部材厚が薄いと診断対象面の裏側からの日射熱の照射によって、検出される特異な温度分布は周辺温度より低温で検出される。しかし、日射熱の影響は箱桁橋などでは約10時間程度のタイムラグを持っている場合がある。
- (3) 壁高欄部の診断は、日射熱による熱流の方向を常に注意することが必要である。昼間時には、内部欠陥の表面温度が健全部と比較して高温になったり、低温になったりする。このため、夜間に診断すること

が精度良く検出できる可能性が高い。

- (4) 箱桁橋は日射熱が箱内空気を間接的に暖める。その箱内空気がコンクリート部材に熱流を発生させることで診断が可能となる。ある一定以上の日射熱を受ける箱桁橋は、外気温の急激な変動がなくても診断ができる。
- (5) 本実験結果から判断すると箱桁橋と鋼橋のコンクリート床版の診断に適した時間帯は夕方から夜間に限られる。
- (6) 熱伝導解析結果から、箱桁橋の診断には、温度差0.1℃を検出できる赤外線映像装置が必要である。
- (7) 本実験結果から鋼橋のコンクリート床版と箱桁橋の張出部は、日射熱の影響を強く受けるため、舗装下の浮き・剥離を橋梁下面からの赤外線法で検出できる。ただし、内部欠陥内に、ある一定の空気層が介在し、日射熱を遮断していることが前提となる。
- (8) 橋梁の部材構成、部材厚、日射熱を受ける環境により赤外線法による内部欠陥の検出できる時間帯が変わってくる。これらの性質を十分理解したうえで、内部欠陥の深さ、位置等を考えて必要な環境のもとで診断する必要がある。

参考文献

- 1) 渡辺哲己・黒川善幸・森博嗣・谷川恭雄：サーモグラフィ法によるコンクリート内部欠陥の推定に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No. 1，pp. 589-594，1993
- 2) 中村士朗・阪上隆英・原田修輔・久保司朗：赤外線サーモグラフィを用いたコンクリートの剥離欠陥の3次元形状評価に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，第19巻第3号，pp. 51-60，2008年9月
- 3) 佐治嘉一・小野定・浅野慎一：赤外線サーモグラフィによるコンクリート構造物表層部の変状調査—赤外線カメラを導入した橋梁点検—，土木施工44巻2号，pp.1-8，2003.2
- 4) 鷺見高典・鈴木信二・木村清敏・天野勲：鋼鉄桁橋のコンクリート床版を対象にした赤外線サーモグラフィの適用について，土木学会第61回年次学術講演会，pp. 85-86，平成18年9月
- 5) 徳増育夫・田中満・永渕克己：コンクリート床版上の舗装における現場での防水性の評価手法，舗装38-7，pp.9-14，2003
- 6) SPSS, Trends 16.0, User 's Guide
- 7) SPSS Base 16.0, User 's Guide
- 8) 庄司正弘：伝熱工学，東京大学出版会