

熱画像による鉄道高架橋コンクリートの剥離診断手法の開発

長田文博¹・山田裕一²・虫明成生³・赤松幸生⁴

¹正会員 工修 西日本旅客鉄道株式会社 技術部 (〒530-8341 大阪府北区芝田2丁目4番24号)

²正会員 工修 西日本旅客鉄道株式会社 技術部 (〒530-8341 大阪府北区芝田2丁目4番24号)

³正会員 国際航業株式会社 技術センター (〒102-0075 東京都千代田区六番町2)

⁴工博 国際航業株式会社 技術センター (〒102-0075 東京都千代田区六番町2)

構造物の内部に剥離による空隙が存在する場合、日中において剥離部の表面温度は健全部に比べて高温になる。この構造物表面の温度分布を熱画像でとらえることで剥離箇所の抽出が可能となる。

一方で、熱画像による診断は温度を指標とするため、日照、気温などの環境条件に大きく影響される。また、1日の間にも観測に不適切な時間帯があり、その時間帯も環境条件により異なる。したがって、どのような条件であれば熱画像による剥離の判別が可能であるのかを検証する目的で、現地試験観測および熱収支モデルを用いた数値解析を行い、この熱画像による診断手法の適用可能条件を定量化するための研究をおこなった。

Key Words : *inspecting method, thermal image, defect, concrete viaduct, environmental condition, heat balance model*

1. はじめに

(1) 開発研究の背景と目的

近年、多発した高架橋からのコンクリート片の落下事故のように、直接的に構造物の耐荷性能や使用性能を脅かすものではないが、第三者に被害を及ぼす可能性が高い損傷が社会から注目を浴びている。特に、平成11年、山陽新幹線の高架橋などからコンクリート片の落下が相次ぐ事態が発生し、マスコミなどで大きく取り上げられたことは記憶に新しいところである。

これを契機として、例えば、山陽新幹線の健全性を維持してゆくための方策を提言することを目的として、平成11年に旧運輸省により設置された「山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会」(委員長:長瀧重義新潟大学教授)において、コンクリートの剥離などを指標とした補修工法の選定フローが示された。このフローには、剥離の目視判定が困難な場合、打音検査、赤外線法などの非破壊検査を併用するのが良いことが示されている¹⁾。

従来、鉄道高架橋コンクリートの剥離などの診断は、目視による外観検査やハンマーなどによる打音検査が中心であった。外観検査は、内部の変状が構造物表面の状況に影響する場合があることに基づき、その状況を目視で把握することにより内部変状の有無を確認する方法である。また、打音検査は、内部に変状がある場合にその

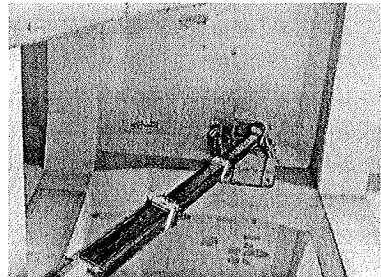


写真-1 高所作業車による打音検査の状況

表面をハンマーなどで叩いた時に発せられる音が健全部と異なることに基づき、対象構造物全面を隈なく打音して異常音を発する箇所を変状部として抽出するものである。

一方で、このような外観検査や打音検査は人間による作業、判断が必要となるため、次のような課題がある。

- ① 外観検査は表面に表れない内部変状の把握には対応できない。
- ② 打音検査では高所作業車などの足場が必要であり作業効率が悪い。(写真-1)
- ③ いずれの検査も人間の判断が介在するため、客観性、統一性に欠ける。

以上のような背景から、本研究では、従来の目視検査・打音検査に変わる新しい検査手法として、特別な設

備を必要とせず自然環境下で、非破壊・非接触で短時間に検査をおこなうことが可能である熱赤外線映像装置（以下「赤外線カメラ」）を用いた高架橋コンクリートの剥離診断手法の開発をおこなった。

(2) 過去の研究

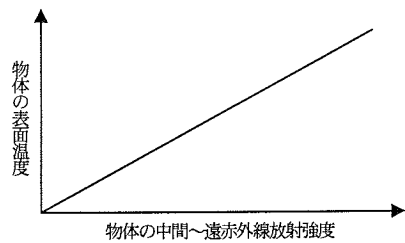
熱画像による診断法は、当初、建築物の外壁剥離診断が主な用途であったが、その後、剥離以外の建築分野や土木分野にも対象が広がってきた。土木分野においては、比較的早くからモルタル吹付けのり面の劣化診断^{2),3)}に適用されているものの、コンクリート構造物については研究開発段階といえる。コンクリート構造物の診断に関する研究としては、試験体を用いた実験的研究^{4),5)}や熱収支モデルを用いた解析的研究^{6),7)}などがある。このうち、内部鉄筋の腐食に起因する表層コンクリートの剥離が懸念されるコンクリート橋りょうについては、屋外の自然環境下での試験体を用いた実験を中心とした研究^{8),9)}があり、構造物表面温度の時系列変化をとらえることにより、内部変状の状態を把握できる可能性が示されている。また、実高架橋に対しても同様の可能性が示されている¹⁰⁾。これらの研究は、試験体を用いた実験観測と数値解析による検討が中心であり、実構造物を対象とする観測データに基づいた検討は、特定の部位に着目した特定の1日での観測で種々の気象条件下での観測はされておらず、実際の検査業務において汎用的な手法として確立されるまでには至っていないのが現状である。

したがって、今後実際に観測をおこなう場合には、熱画像と気象条件の相関を把握する必要があるという課題が残されており、より定量的な観測条件の設定をおこなう手法の確立が必要である。

この手法とは別に、構造物を人工的に加熱または冷却する方法の検討についても室内実験を中心になされているが^{11),12),13)}、現状においては大きな設備とエネルギー、手間を必要とするため、高架橋のような大規模構造物へ適用する場合については、現段階において有効的な方法が確立されていない。

(3) 本研究の特色

過去の研究から、熱画像を用いた診断手法は、高架橋コンクリートの剥離診断に対して定性的には有効であるが、屋外環境下で使用する場合には、診断精度が日射、気温などの気象条件に大きく影響されるため、具体的に適用可能な条件を定量的に把握した上で本手法を使用しなければ誤診断を引き起こし、このことが熱画像による診断手法自体の信頼性の低下を招いて実用化の妨げともなる。したがって、本手法の適用に際しては、屋外環境下における実際の高架橋を用いて出来る限り多くの条件下で蓄積したデータに基づき、気象条件などに関する定



図一 物体の表面温度と赤外線放射の関係

量的な基準を実務者に提供することが必要であると考えられる。

このような背景から、本研究では、実際に剥離を有する高架橋を対象とし、環境条件が異なる部位に対して熱画像と気象条件の時系列観測を行い、得られたデータから熱画像と気象条件の相関を分析するとともに、熱収支モデルによる数値解析を行い、この結果から適用可能条件の定量化を図った。

2. 赤外線カメラの原理と剥離抽出の考え方

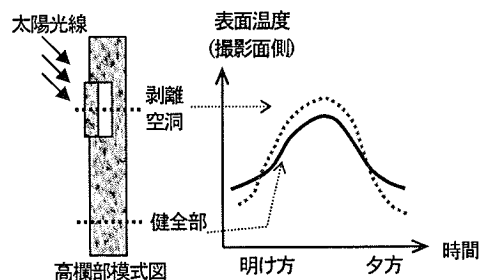
(1) 赤外線カメラによる温度計測の原理

熱画像は、物体が表面から放射する赤外線を面的に測定し、その強弱に応じて白黒あるいはカラーで対象物体の表面温度を映像化したものである。映像が対象とする赤外線は、波長3～14μm程度の間中赤外～遠赤外線にあたる。この波長帯の赤外線は温度と密接な関係を持っており、図一に示すように物体は温度が高いほどその表面から強い赤外線を放射するという関係がある¹⁴⁾。このことから赤外線放射の強度を測定することにより、物体の表面温度を把握することが可能となる。

(2) 温度計測による剥離抽出の考え方

熱画像により得られる情報は、対象物の表面温度分布で、直接的に背後の変状などをとらえることはできない。しかし、背後の変状などにより表面温度の変化状況が健全部と異なり、そのパターンをとらえることで間接的に剥離・空洞などの変状域を抽出することが可能となる。

例えば、昼間は太陽光の照射または外気温の上昇に



図二 熱画像による剥離診断の概念

より構造物の表面が暖められ、構造物の内部に向かう熱の流れが生じる¹⁵⁾。剥離などによる空洞がある場所では、この熱の流れが遮断されるため、周囲の健全な範囲に比べて剥離の表面に熱エネルギーが多く蓄積される。その結果、図-2に示すように、剥離部の表面温度が周囲の健全な箇所と比べて高温になる。

(3) 赤外線カメラによる剥離抽出の課題

熱画像による診断は温度を指標とするため、前項でも述べたように、屋外の環境下では日照、気温などの気象条件の影響を受けやすく、本手法を実用化していくためには、適用可能な気象条件を明らかにすることが最重要課題となる。また、実高架橋においては、ライニング施工（コンクリートの中性を抑制するための塗装）の有無や汚れなどの診断に影響を及ぼすと考えられる様々なノイズ条件が想定され、剥離とこれらの影響を区分していくことも必要となる。

本研究では、これらの課題を解決することを目的に、実高架橋における試験観測（実測熱画像と気象条件の相関の検討）、および熱収支モデルを用いた数値解析による検討をおこなった。なお、コンクリート表面に温度変化を生じさせる方法としては、上記のように、太陽光による加熱や気温の日較差を利用する方法他に、ヒーターなどによりコンクリート表面を人工的に加熱する方法がある。この方法の場合には、気象条件などに左右されずに測定できるが、加熱設備が必要となる。一般的に土木構造物は大型であるため、現状においては効率的な加熱方法がなく、ランプ、ヒーターなどによる輻射加熱、熱風加熱が試行錯誤的に行われている状況にある¹⁶⁾。よって、本研究においては、特別な設備を必要としない日中の気象条件を利用する方法を用いた。

3. 試験観測による検証

(1) 試験観測の対象構造物と時期

試験観測では、実高架橋を対象とし、様々な条件に対する観測を体系的に行い、どのような条件の下であれば剥離の判別が可能であるのかを体系的に検証した。試験観測は、山陽新幹線で標準的な構造のラーメン高架橋を対象とし、冬季（12月）および春季（3月）におこなった。

(2) 使用した赤外線カメラ

赤外線カメラは用途別に色々なタイプのものが製品化されている¹⁴⁾。現在用いられている一般的なカメラは、検出波長帯が3~5 μm の短波長タイプのもので、8~14 μm 程度の長波長タイプのものに大別できる。これらの

表-1 赤外線カメラの仕様

測定波長帯	8~14 μm	測定距離 [*]	30cm~ ∞
測定温度範囲	-20 $^{\circ}\text{C}$ ~300 $^{\circ}\text{C}$	瞬時視野	1.4mrad
温度分解能	0.1 $^{\circ}\text{C}$	(分解能)	(10mで1.4cm)
表示画像数	320 \times 240	視野角	25.8 $^{\circ}$ \times 19.5 $^{\circ}$
温度計測精度	\pm 4 $^{\circ}\text{C}$		

^{*}35mm標準レンズ使用時

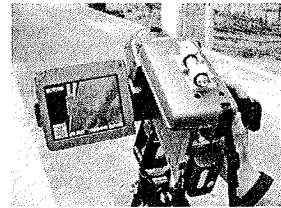


写真-2 赤外線カメラの外観

赤外線カメラを屋外の自然環境条件下で使用する場合には太陽光の反射の影響を受けるため¹⁷⁾、比較的これらの影響の小さい長波長タイプの赤外線カメラを用いた。

本研究で使用した赤外線カメラの仕様を表-1に、赤外線カメラの外観を写真-2に示す。この赤外線カメラは、市場にある数機種について同一条件下で現地観測試験を行い、検出精度、操作性を比較検討し選定したもので主な特徴は次のとおりである。

- ① 測定波長が長波長帯域（8~14 μm ）のため、太陽光の反射の影響が少ない。
- ② 約80,000画素の高解像度で観測が可能である。
- ③ 小型軽量（約2.5kg）で機動性が高い。
- ④ 2次元非冷却センサーを利用しているためシンプルで保守が不要である。

(3) 試験観測概要

a) 観測諸元

観測対象とする高架橋の選定にあたっては、気象条件のほかに構造物の状態（方向、高さ、表面状態）が診断結果に影響することが予想されたため、これらの条件が

表-2 観測対象高架橋の特徴

観測対象	線路方向	ライニング	高さ	延長
A高架橋	南東~北西	有無混在	12m	30m
B高架橋	東西	有無混在	19m	30m

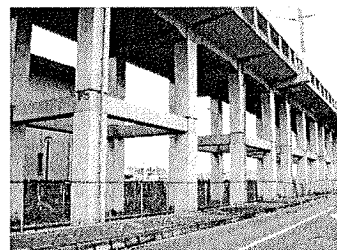


写真-3 A高架橋の外観

表-3 前提とした観測条件

項目	条件	備考
季節	冬季(12月), 春季(3月)*	-
天候	晴天, 曇天, 雨天	代表的な天候を網羅
時間	9時~17時	昼間の検査作業を想定

※ 春季(3月)については晴天時のみ観測を実施

出来るだけ標準的なものを選定した。表-2 に選定した高架橋の特徴を示す。この2つの高架橋に対して、それぞれ高欄部(南北)2, 張出部(南北)2, 床版部1の計5部位の観測をおこなった。また、剥離箇所の判別性を評価する必要があるため、事前に打音検査を行い様々な大きさの剥離が存在することを確認した。写真-3は、選定したA高架橋の外観を示したものである。

また、表-3に示すように、冬季においては晴天, 曇天, 雨天の各天候状態のもとで、春季においては晴天状態のもとで、9時から17時まで観測をおこなった。後述するが、冬季の観測結果から曇天や雨天の場合には剥離判別がほぼ不可能であることが判明したため、春季については剥離判別が可能な晴天の場合のみとした。

b) 観測手順

観測は以下の手順でおこなった。

- ① 9時~17時までの1時間ごとに定時観測を行い、時系列変化の熱画像を得る。
- ② 気温、日射などの気象条件について、熱画像観測地点近傍で連続的に観測し変化特性を把握する。
- ③ 剥離箇所の把握状況を検証するために、表層コンクリートの除去による調査をおこなう。
- ④ 熱画像パターンや観測された表面温度、温度差の時系列変化と気象条件の時系列変化を対比させて両者の関係を検討する。

(4) 試験観測結果

a) 剥離判別性の評価

観測で得られた各熱画像の剥離判別性の評価をおこなった。写真-4は、12月に観測した張出床版部の熱画像を天候別(晴天時と曇天時)に時系列で示したものである。

目視では、撮影範囲の右上に大きなパッチ状の補修跡が、さらに中央やや左側に小さなパッチ状の補修跡が見受けられる以外には、特に目立った補修跡、亀裂・ジャンカなどの異常部分、および表面の汚れは確認できない。これに対して、熱画像上では、晴天時の11時~15時頃に画像右上の大きな補修跡の中に逆L字形に白く見える高温部の存在が確認できる。さらに、小さな補修跡のやや左側にも多くの高温部領域が判別できる。ただし、15時頃の熱画像では判別性がやや低下している。これらの高温部は、打音検査の結果いずれも剥離が認められた部

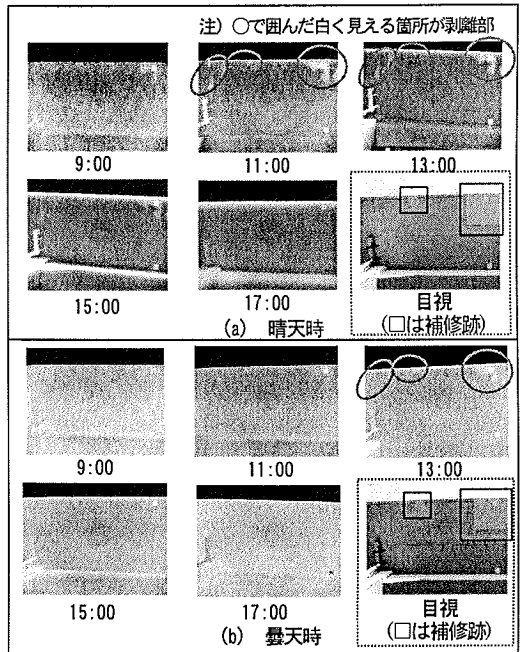


写真-4 観測熱画像の時系列変化 (冬季12月)

表-4 剥離判別性の評価例

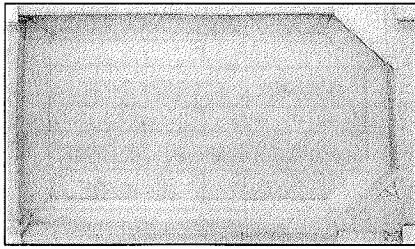
		冬季(12月), 晴天								
		9	10	11	12	13	14	15	16	17
高欄北		■								
張出北		■								■
床版		■								■
張出南		■								■
高欄南									■	■

		冬季(12月), 曇天								
		9	10	11	12	13	14	15	16	17
高欄北		■	■	■	■	■	■	■	■	■
張出北		■	■	■	■	■	■	■	■	■
床版		■	■	■	■	■	■	■	■	■
張出南		■	■	■	■	■	■	■	■	■
高欄南		■	■	■	■	■	■	■	■	■

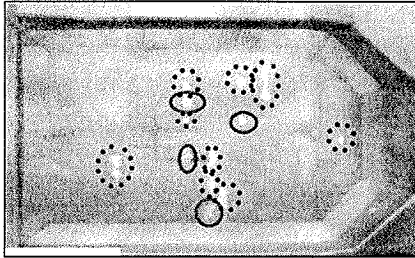
		冬季(12月), 雨天								
		9	10	11	12	13	14	15	16	17
高欄北		■	■	■	■	■	■	■	■	■
張出北		■	■	■	■	■	■	■	■	■
床版		■	■	■	■	■	■	■	■	■
張出南		■	■	■	■	■	■	■	■	■
高欄南		■	■	■	■	■	■	■	■	■

		春季(3月), 晴天								
		9	10	11	12	13	14	15	16	17
高欄北									■	■
張出北									■	■
床版		■	■	■	■	■	■	■	■	■
張出南		■	■	■	■	■	■	■	■	■
高欄南									■	■

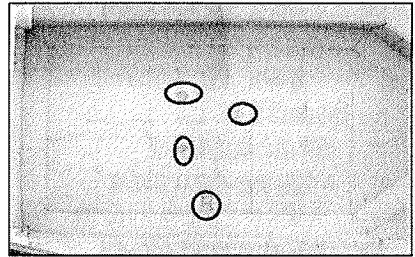
□ : 判別性○ ■ : 判別性△ ■ : 判別性×



(a) 目視 (たたき落とし調査前)



(b) 赤外線画像 (たたき落とし調査前)



(c) 目視 (たたき落とし調査後)

写真-5 床版部観測事例 (12月の晴天時, 13:00)

分である。曇天時の熱画像では、晴天時に確認されたような高温部はほとんど確認できない。雨天時(熱画像省略)も同様であったことから、本手法は、晴天時で使用可能であり、曇天時と雨天時には使用できないと考える。同様に、観測後におこなった全面たたき落しの結果と比較して、各部位毎に観測された熱画像が各剥離を正しく判別していたかどうかを時間帯別に3ランク(○:明確に判別, △:不明瞭, ×:判別不能)に分類し、季節、天候の条件ごとに体系的に整理をして総合的に評価した。表-4に代表例を示す。各部位の中で、日射を直接受けにくい床版部は熱画像による剥離抽出が最も困難と考えられたが、試験観測結果から、床版部についても晴天時には適用可能であることが分かった。

樹脂ライニング施工箇所においても適用性の評価をおこなった。写真-5に床版部の観測事例を示す。この床版部は、樹脂によるライニングが施工されており全体的に白っぽく見えるものの、目視では剥離や補修跡は確認できない(写真-5(a))。しかし、熱画像では白く見える高温部が多数存在することがわかる。その後、検証のために実施したたたき落とし調査の結果、4箇所の剥離(写真-5(c)の実線内)が確認され、熱画像が剥離部分

を確実にとらえていることがわかる(写真-5(b)の実線内)。

なお、この床版部の熱画像では剥離以外の高温部も多数確認できるが、近接目視及びたたき落とし調査の結果から、以前に剥離してその後樹脂モルタルにより断面復旧された補修跡であることが確認された(写真-5(b)の破線内)。以上により、断面復旧跡を異常部としてとらえることがあるものの、ライニング処理されている高架橋においてもライニング未施工の箇所と変わらず判別が可能であることがわかった。

以上、検証結果から冬季において以下のようなことが判明した。

- ① 熱画像から剥離を判別するためには、曇りの場合でも一部判別可能な場合があるものの、基本的には晴れていることが条件である。
- ② 雨天の場合、判別は不可能である。
- ③ 10時~14時頃が適用時間帯である。
- ④ 晴天の場合、直接日射が当たる高欄南側の判別性が高く、張出南側および北側と床版で大きな差はない。また、高欄北側はやや判別性が劣る。
- ⑤ ライニング施工の有無および高架橋の高さは観測結果に大きな影響を与えない。

b) 剥離部と健全部の時系列温度差の検証

部位別時間帯別の剥離判別性の結果(表-4参照)と現地観測で得られた剥離部と健全部の時系列的な温度計測結果をもとに、本試験で用いた赤外線カメラで剥離を判別するために最低限必要な剥離部と健全部の絶対温度差(以下「限界しきい値」)を定量的に求めた。

図-3に限界しきい値検討の流れを示す。また、判別性別の温度差統計値を表-5に示す。なお、剥離部と健

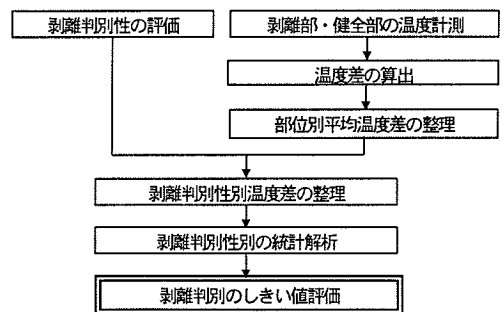


図-3 剥離判別の限界しきい値検討の流れ

表-5 剥離部と健全部の温度差統計値 (単位:℃)

	平均値	中央値	標準偏差(σ)	平均値- σ
判別性○	1.13	1.01	0.64	0.49
判別性△	0.44	0.41	0.16	0.27
判別性×	0.02	0.00	0.06	0.00

全部の温度差はその絶対値を用いた。

この表より、判別性○の場合の剥離部と健全部の温度差の平均値(1.13℃)と平均値-σ(0.49℃)の範囲に含まれる温度差データの割合を求めたところ 93.2%であった。このことから、判別性○の場合の剥離抽出可能な温度差の限界しきい値を平均値-σ(0.49℃)と考え、さらに剥離抽出の确实性・安全性を考慮し、これよりもやや高めの0.5℃程度を実用的な限界しきい値として採用した。一方、判別性△の場合の温度差についても平均値(0.44℃)と平均値-σ(0.27℃)の範囲に含まれる温度差データの割合が 85.7%であることから、判別性△の場合の実用的な限界しきい値は 0.3℃程度と考えた。判別性×の場合は剥離部と健全部の判別ができないため温度差は 0℃である。以上をまとめると、各判別性の限界しきい値は以下ようになる。

判別性○：剥離部と健全部の温度差が 0.5℃

判別性△：剥離部と健全部の温度差が 0.3℃

判別性×：剥離部と健全部の温度差が 0.0℃

この限界しきい値は、次章で述べる熱収支モデルによる数値解析結果から判別性を判断する際の基準値とした。

4. 熱収支モデルによる数値解析

(1) 数値解析の目的

現地試験観測結果を理論的に裏付け、適用可能条件の一般化をおこなうため、熱収支モデルによる解析をおこなった。

ここでは、試験観測をおこなった冬季について剥離を有する高架橋コンクリート表面の熱収支を解析し、温度変化を推定する熱収支モデル¹⁰⁾を用いて季節、天候などの観測条件を変えながら剥離部と健全部の表面温度差を推定した。次に、この結果を現地観測で得られた限界しきい値(3章の(4)のb)で説明)と照合することで剥離判別性の評価を行い、最後に適用可能条件の見極めをおこなった。

(2) 熱収支モデルの概要

物体は表面温度に対応した赤外線を放射していることから、表面温度の差により赤外線カメラにて剥離を判別

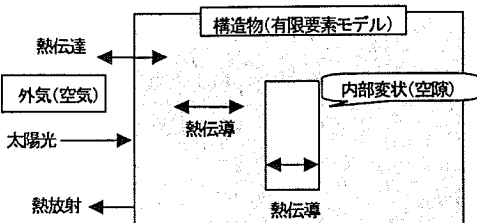


図-4 熱収支モデルの基本構成

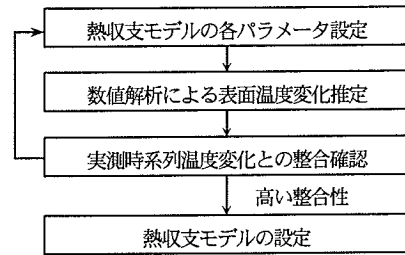


図-5 熱収支モデル設定の流れ

することができる。このため、熱移動の基本三形態(熱伝達・熱放射・熱伝導)を熱収支モデルとして構築することによりコンクリート構造物表面と構造物内部での熱収支を逐次処理により解き、剥離部と健全部における表面温度の時間変化を求めている。

図-4に、熱収支モデルの基本構成を示す。図-5には熱収支モデルの設定の流れを示す。また、熱移動の各形態における基本解析式は以下のとおりである。

① 熱伝達：表面と外気との間で成される熱収支

$$q = h(T_1 - T_2)$$

h：熱伝達係数

T₁：境界部の構造物温度

T₂：外気温または変状部温度

② 熱放射：大気放射と表面熱放射の間の収支

$$E = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4)$$

ε：構造物表面の長波放射率

σ：ステファンボルツマン係数(5.67×10⁻¹¹)

T_s：構造物表面温度

T_a：外気温

③ 熱伝導：内部を伝わる熱による収支

$$\partial T / \partial t = \lambda / C_p \rho (\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2)$$

T：構造物の温度

t：時間

λ：熱伝導率

C_p：比熱

表-6 熱収支モデルによる各パラメータの変化特性

大項目	中項目	小項目	変化特性
表面熱収支	気象条件	日射量	季節・天候・蔽蔽材などで変化する
		気温・風速	季節・天候などにより変化する
	長波放射(輻射)率	日射吸収率	材料・色調などにより変化する
		熱伝達係数	材料・風などにより変化する
物性値(物性値)	熱伝導率	比熱・密度	材料・物体状況により変化する
構造(形状)	剥離諸元	厚さ(空隙厚)	剥離部温度の時系列変化特性に影響
		大きさ(面積)	
		深さ(空隙位置)	
	対象構造物の構造	形状	全体としての熱収支量に影響
立地条件	方位・方向	主として日射による熱収支に関係	

表-7 熱収支モデルのパラメータとその設定経緯

大項目	小項目	設定値	設定の経緯
コンクリート	密度	2400kg/m ³	文献 ^{19), 20)}
	比熱	900J/kg・K	同上
	熱伝導率	1.2W/m・K	同上
剥離内 空気	密度	1.3kg/m ³	文献 ²¹⁾
	比熱	1000J/kg・K	同上
	熱伝導率	0.1W/m・K (垂直方向) 0.022W/m・K (水平方向)	同上
剥離	深さ	20mm 又は 30mm (図-5参照)	設計上の被り厚を上限として、観測結果との比較により設定
	厚さ	5mm (図-5参照)	近接目視の結果、剥離部に数mmの影が見られることから、計算上は5mmとして設定
気象 条件	熱伝達率	平均風速値より算出	$h=7.8+4.5U$ (h :熱伝達率 U :平均風速 m/s) ²⁰⁾ 平均風速は基本的に最近隣アメダスデータを用いたが、現地計測結果と極端に異なる場合は現地計測データを使用
	日射量	現地実測の水平面日射量を補正	(高欄部)直達成分と散乱成分に分離し、時刻別の太陽高度・方位と高架橋方位のなす角から直達成分を補正して、散乱成分を加えて入射日射量とした (床版部)地表面からの反射成分が想定されることから、地表面となる砂・コンクリートの平均的な反射率 0.25 を水平面日射量に乗じた ²¹⁾
	気温	現地実測値およびアメダスデータ	現地計測値を使用し、欠測時には最近隣アメダスデータを使用した
その他	長波放射率	1.0	文献 ²⁰⁾ および実験値(文献 ²²⁾)
	日射吸収率	0.5(A 高架橋高欄部) 0.6(上記以外)	文献 ²⁰⁾ によると明るい色のコンクリートで0.6程度であるが、調整計算の結果0.5(A 高架橋高欄部あるいは0.6(A 高架橋高欄部以外)を用いた
	計算開始時間	7時	最低気温となる時間現地計測時には7時前後に最低気温を記録した)
	構造物初期温度	最低気温値(床版以外) 最低気温値+2℃(床版)	実験に基づき最低気温を構造物の初期温度とした ²²⁾ 実測値との比較により設定
	計算間隔	5分	

ρ : 密度
 x, y : 空間座標

(3) モデルパラメータの適正化

a) 熱収支に関連するパラメータ

熱収支モデルには、熱収支に関連する各種パラメータが組み込まれており、これは構造物の状態や置かれている環境条件により変化する。表-6には、各パラメータの変化特性を示す。実際の高架橋における温度変化推定を正確におこなうには、これらのパラメータをなるべく実際の高架橋に整合させることが必要となる。しかし、屋外環境下における実際の高架橋でのパラメータは、高

架橋におけるコンクリートの不均質性、多様性、あるいは気象条件の再現性の問題などから、画一的に同定することが困難である。

本研究では、観測データが得られた冬季(12月)の熱画像および気象観測による複数ケースのデータを用い、モデルによる推定温度と熱画像による実測温度が平均的に整合するよう、統計的アプローチによりパラメータの適正化をおこなった。具体的には、熱収支モデルによる推定結果と実測温度値の比較、パラメータ調整、適正化を繰り返し、各ケースに平均的に整合する(大きな誤差を生じるケースが無い)パラメータを求めたこととした。これにより、実際の高架橋に平均的に整合し、大幅な推

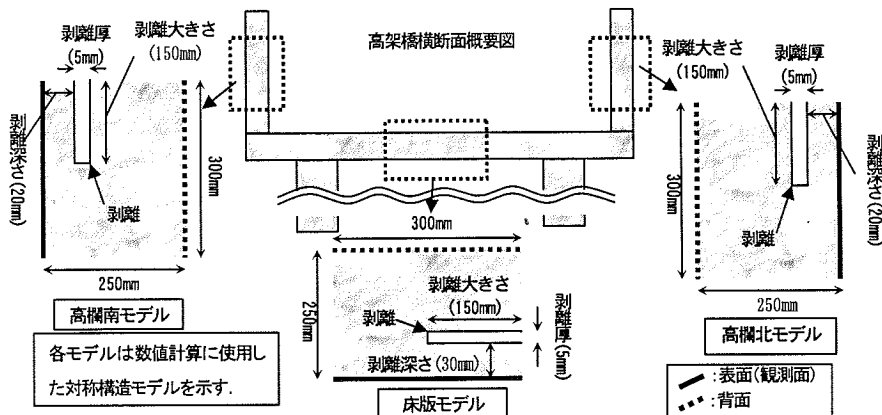


図-6 数値計算上の熱収支モデルの設定

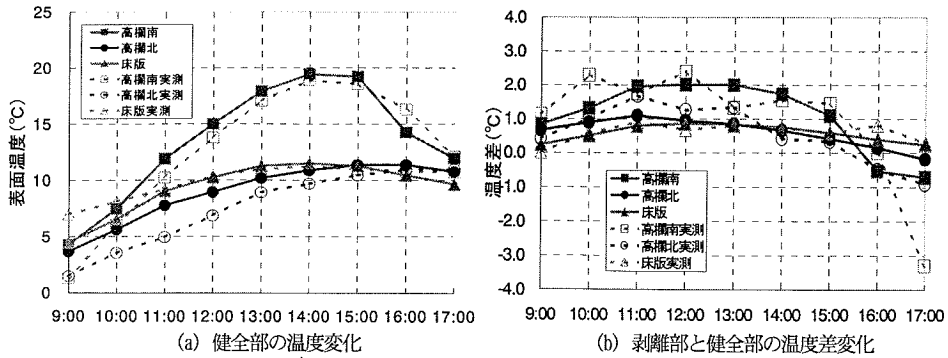


図-7.1 モデル推定温度と実測温度の比較 (A 高架橋：12月16日、晴れ)

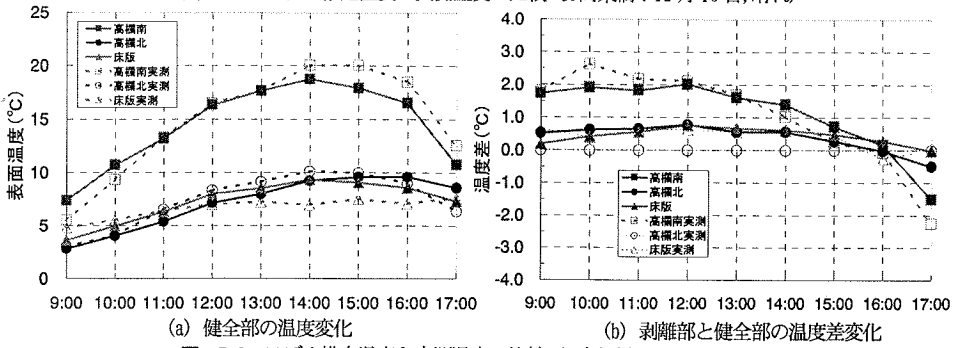


図-7.2 モデル推定温度と実測温度の比較 (B 高架橋：12月23日、晴れ)

定誤差の無い熱収支モデルが構築され、剥離診断への適用可能条件の一般化検討に適用可能と考えた。

b) パラメータ設定結果

前述の考え方に基づき、多数ケースの熱収支モデルによる表面温度推定を通して、パラメータの適正化を図った。最初に理論値や設計条件から得られるパラメータを与えて表面温度を推定し、推定結果と実測値の違いから適正なパラメータを検討し、そのパラメータによる推定をおこなう作業を繰り返してパラメータを求めた。最終的に得られたパラメータとその経緯を表-7に示す。また、各部位の構造(剥離の深さ、厚さ含む)および熱収支は、図-6に示すモデルにより表わすものとした。

なお、熱収支モデルによる表面温度推定にあたっては、計算時間短縮のため、剥離を含む対称な構造モデルの半分のみ(図-6で示す各部位の構造)を計算した。ここで、深さ・厚さの決定は、設計値に加え、中性化などにより劣化の進行した実構造物のはつりの落とし結果で得られた深さに基づいている。その範囲内で、モデルによって剥離深さ・厚さを変化させ、最終的に実構造物温度計測結果と整合性が高くなるような諸元(深さ・厚さ)を導出した。

(4) 実測データとの検証

表-7で設定されたパラメータを用いてモデルによる表面温度の推定を行い、実構造物を撮影した熱画像から

表-8 表面温度の推定値と実測値の差(絶対値)

高架橋	健全部温度 (°C)			剥離・健全部の温度差 (°C)		
	高欄南	床版	高欄北	高欄南	床版	高欄北
A 高架橋	1.29	0.74	1.46	0.69	0.13	0.39
B 高架橋	1.18	0.87	1.09	0.35	0.16	—*
平均	1.24	0.91	1.16	0.52	0.14	0.39

* B高架橋の高欄北は、剥離箇所が確認できなかったため未計測

抽出した温度との比較により推定精度を検証した。表-8および図-7.1, 7.2は、晴天時におけるその比較結果を示したものである。

健全部温度の変化パターンをみると、A 高架橋では(図-7.1(a))午前中若干高めに推定されているケースもあるが、その他の時間帯はほぼ一致している。B 高架橋では(図-7.2(a))、高欄南は午後はやや低めに推定され、床版はやや高めに推定されているものの、実測温度と推定温度の差をみると各部位とも1°C前後で納まっている。また、剥離部、健全部の温度差をみると(図-7.1(b)および図-7.2(b))、夕方に実測値と推定値に温度差を生じる部位があるが、変化パターンは良く整合していることがわかる。また、剥離・健全部の温度差の平均(表-8)をみると、最も差が大きい高欄南でもほぼ0.5°C以下、床版では約0.1°Cとよく一致していることがわかる。

実際に剥離診断への適用可能条件の検討に用いるのは、剥離部と健全部の温度差であり、特に対象面積の比率からすると、床版(張出含む)が大半を占めており重要性

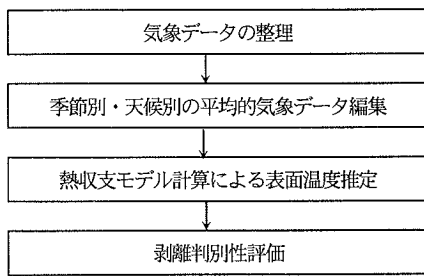


図-8 季節別の判別性評価の流れ

が高い。また、本研究で用いた赤外線カメラの温度計測精度 ($\pm 4^{\circ}\text{C}$) を考慮すると、健全部の表面温度および剥離部と健全部の温度差の再現性が高いモデルが構築されたことから、今回の目的に対して熱収支モデルのパラメータは適切に設定できたと判断される。

(5) 剥離判別性の評価

a) 他季節の推定

ここでは、前項まででパラメータの適正化がなされた熱収支モデルを用い、他季節（春，夏，秋）の天候別（晴，曇，雨）の平均的な気象条件を与えて、他季節における剥離部・健全部の温度変化特性を、熱収支モデルによる推定により検討することとした。図-8に推定の流れを示す。

気象データの整理では、熱収支モデル計算の際に必要な気温・風速・日射量（全天日射量）が観測されている気象官署データ（大阪管区気象台）を用い、季節

別・天候別に気象データを整理した。季節別・天候別の平均的気象データ編集では、整理された気象データから、季節別・天候別の平均的気象データを算出した。

熱収支モデル計算による表面温度推定では、前項までで適正化されたパラメータと、季節別・天候別に算出した平均的気象データを用い、剥離部と健全部の時系列表面温度を算出し、両者の温度差変化を推定した。なお、日射量補正に必要な高架橋方位（線路方向）は、山陽新幹線全体への適用性を考慮して東西方向とした。

剥離判別性評価では、推定された温度差変化から、各時間帯における剥離判別性を評価した。

b) 他季節の推定結果と剥離判別性評価

熱収支モデルの計算結果を図-9.1, 図-9.2に示す。各季節における晴天時の健全部の温度変化をみると、季節により温度変化パターンが異なり、とくに夏季は温度変化が少ないことがわかる。また、春季について天候別温度変化をみると、曇，雨の日は晴に比べて温度変化が少ないことがわかる。これは、冬季の熱画像観測で確認されている傾向と一致しており、各季節においても曇，雨の日は熱画像による診断が困難になることが予想される。

一方、各季節における晴天時の剥離部と健全部の温度差をみると、季節により変化パターンが異なり、とくに日射の影響が大きい高欄南において顕著な差があることがわかる。とくに夏季においては、高欄北，床版も含めて、他の季節に比べて温度差が小さく、熱画像による剥離識別がやや困難であることが予想される。また、春季の天候別温度変化をみると、晴に比べて曇，雨の日は温度差が小さく、とくに雨の

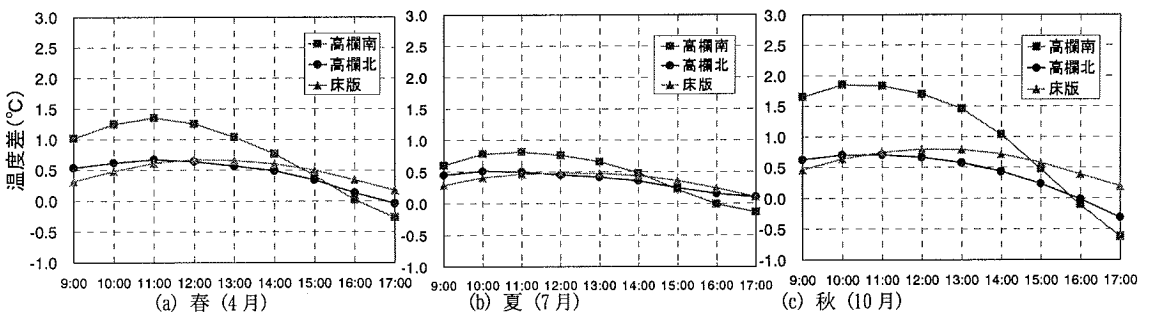


図-9.1 各季節における晴天時の剥離部，健全部温度差変化の推定

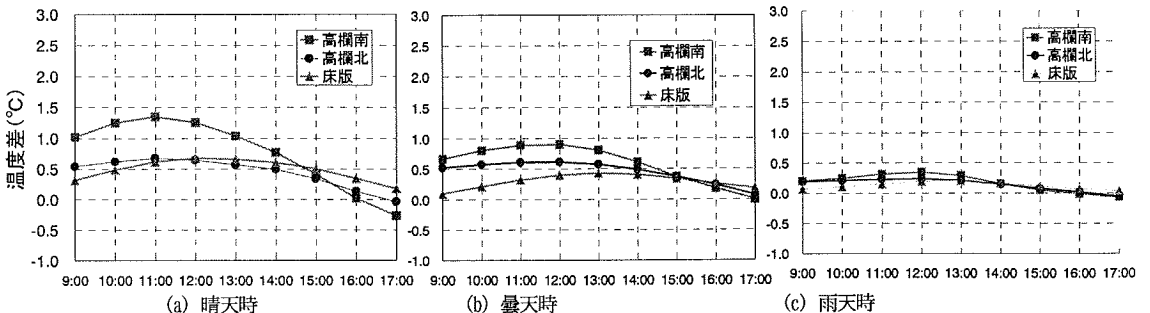


図-9.2 春季（4月）における天候別の剥離部，健全部温度差変化の推定

表-9 熱収支モデルから得られた判別性
(a) 春季

時刻	9	10	11	12	13	14	15	16	17
高欄北									
床版									
高欄南									

(b) 夏季

時刻	9	10	11	12	13	14	15	16	17
高欄北									
床版									
高欄南									

(c) 秋季

時刻	9	10	11	12	13	14	15	16	17
高欄北									
床版									
高欄南									

(d) 冬季

時刻	9	10	11	12	13	14	15	16	17
高欄北									
床版									
高欄南									

□ : 判別性○ ▨ : 判別性△ ■ : 判別性×

日は剥離識別が困難となることが予想される。

表-9 は、図-9.1 に示した剥離部と健全部の温度差から季節別の剥離判別性を表にまとめたものである。なお、この表は適用可能性の高い晴天時の結果である。また、比較のため、冬季の判別性をあわせて示した。

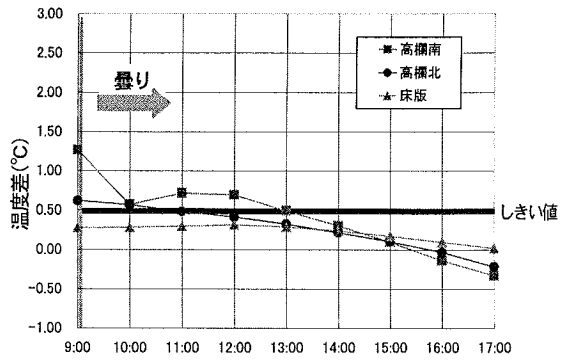
以上の解析結果から、冬季以外の季節における本手法の適用性について以下のように結論づけた。

- ① 夏季においては、晴天時でも高欄南側以外への適用は困難である。
- ② 秋季においては、晴天時の 10 時～14 時頃が適用可能である。
- ③ 春季については、床版部の判別性がやや低下するものの、観測結果とほぼ同様であった(表-4)。

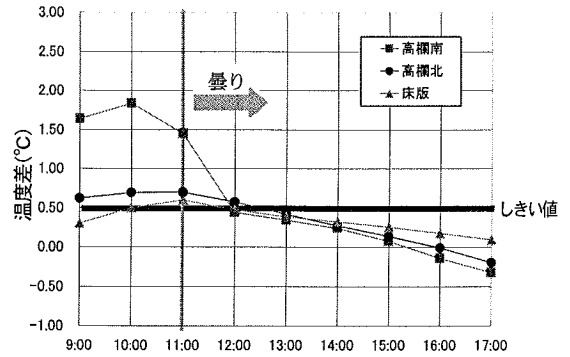
5. 現場運用のための適用可能条件の設定

3 章の現地観測による検証および 4 章の熱収支モデルによる数値解析結果から、JR 西日本管内の太平洋側でほぼ東西に設置された鉄道高架橋および同様の環境条件、気象条件での構造物の剥離検出が可能な条件(適用可能条件)は、以下になることが判明した。なお、この条件は、適用性の低い床版および高欄北側を含めて全ての部位に共通した条件である。

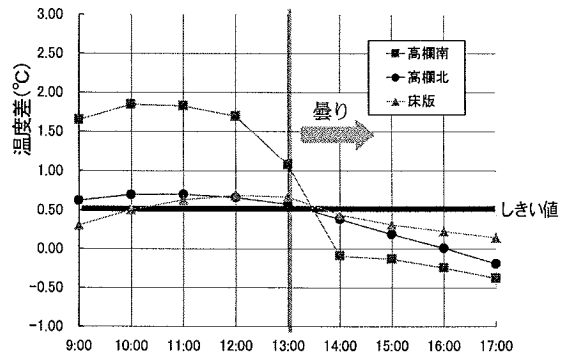
- ① 夏季を除く季節



(a) 9時に曇った場合



(b) 11時に曇った場合



(c) 13時に曇った場合

図-10 天候急変時の剥離部と健全部の温度差変化

- ② 天候は晴れ

- ③ 時間帯はおおむね 10 時から 14 時まで

試験結果から、晴天が条件の一つであることが判明した。しかし、「晴天」という表現は抽象的で、人によっては曇に近い状態から雲一つ無い快晴まで捉え方が異なるため、このままでは、検査精度の確保や検査結果のばらつきの解消が困難である。そこで、2 章でも述べたように、この剥離を検知するために必要な剥離部と健全部の温度差が日射や気温の日較差で生じることから、この 2 つのパラメータについて気象データを分析して定量化を図った。

(1) 日射

日射については、天候が晴天から曇天に急変した場合の剥離判別性を評価することで検討した。ただし、典型的な天候急変時における観測データが得られなかったため、前章で述べた熱収支モデルを用いた数値解析により検討した。

ここでは、季節別平均気象データを用い、快晴から途中で天候が急変（曇りとなる）した場合の剥離判別性の変化を把握した。天候急変の時間は、9時、11時、13時とし、この時間より前は晴天時の平均気象データ、後は曇天時の平均気象データを適用し、数値解析により各時間帯の剥離部と健全部の温度差を推定した。なお、日射量、気温以外のパラメータは表-7に示すものを用いた。

このうち、秋季における結果を図-10に示す。何れの時間帯でも、天候急変後に剥離部と健全部の温度差が急速に減少し、1時間で温度差が相当少なくなることがわかる。また、何れの部位においても、天候急変後30分から1時間程度で剥離部と健全部の温度差が0.5℃（剥離判別性が○となる場合の温度差しきい値）を下回っており、冬季、春季においても同様の結果であった。

以上の結果、30分から1時間以上継続して日射がない場合には剥離検知に必要な温度差が得られないため安全側に考えて、日射については1時間あたり30分以上日射があることとした。

(2) 気温の日較差

観測可能な気温の日較差については、6時の気温を1日の最低気温とし、これに対する気温較差を1時間毎に求め基準値とした。表-10にこの基準値を示す。この値は、過去の気象データにもとづいて晴天時における平均的気温較差から求めた。

最終的に、JR西日本管内の太平洋側でほぼ東西に設置された鉄道高架橋および同様の環境条件、気象条件での構造物の剥離検出が可能な条件（適用可能条件）として、この検査システムの運用基準（全ての部位に共通）を以下のように設定した。

- ① 季節は夏季（6～8月）以外。
- ② 天候は晴れ（日照時間が30分/時間以上）。
- ③ 時間帯は10時から14時まで。
- ④ 観測時において6時に対する気温較差が表-10

表-10 6時に対する気温較差の基準値

	10時台	11時台	12時台	13時台
春季 (3月～5月)	4.9	6.5	7.5	8.3
秋季 (9月～11月)	5.3	6.6	7.7	8.5
冬季 (12月～2月)	6.4	8.1	9.1	9.2

(単位：℃)

に示す基準値以上。

現場では、1時間あたりの日照時間と6時に対する1時間毎の気温較差が表-10の基準値を上回っていることを確認しながら運用するシステムとした。検査者は、このシステムを活用して常に一定の条件で検査をおこなうことにより、検査精度の確保および検査結果のばらつきを解消を図ることができると考える。

6. 結論

本研究では実コンクリート構造物の内部の剥離（欠陥）検出を赤外線画像により短時間に実用的な精度でおこなうための手法を提案し、これについて検証と考察をおこなった。

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 対象とする構造物の存在するエリアの標準的な条件の構造物を選定し、種々の条件で赤外線カメラによる当該構造物の表面温度観察をおこなった。次にこれらの観察結果にもとづき設定したパラメータを組み込んだ熱収支モデルを用いた数値解析により、種々の気象条件下での剥離部と健全部の温度差を推定した。この結果を現地観測で得られた限界しきい値と照合することで剥離判別性の評価をおこなった。この手法により、対象とする構造物の存在するエリアの環境条件・気象条件、構造物の部位、使用カメラの性能等に応じた構造物の剥離検出が可能な条件（適用可能条件）を設定することが可能である。
- 本研究で対象としたJR西日本管内の太平洋側でほぼ東西に設置された鉄道高架橋における適用可能条件は以下のとおりである。
 - ① 季節は夏季（6～8月）以外。
 - ② 天候は晴れ。
 - ③ 時間帯は10時から14時まで。
- (2) 現地において観測を行う際には気象条件が時々刻々と変化することから、現在の気象条件が剥離検出可能な条件である「晴れ」であるかどうかを判断しなければならない。この判断を定量化するために、日射と気温の日較差に着目し、数値解析および過去の気象データにもとづき、日射および気温の日較差について剥離検出が可能な条件を定量化した運用基準を設定することとした。本研究で対象とした鉄道高架橋では、1時間あたりの日照時間が30分以上あることと、6時に対する1時間ごとの気温較差が基準値以上とした。これにより、気象条件の変化に際しても、定量化した運用基準と照らし合わせて効率的に剥離検出の可否を判断し、検査をおこなうことが可能である。

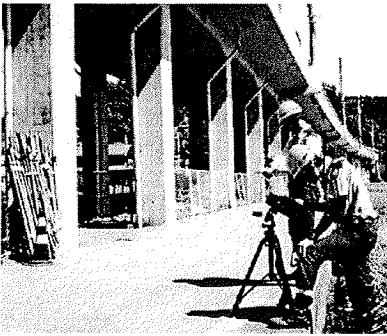


写真-6 現場での検査状況

7. おわりに

熱画像を用いた検査手法は、内部剥離の存在が構造物表面の見かけの熱容量、ひいては構造物の表面温度に影響することに着目し、構造物の表面温度分布を測定することにより剥離の有無を判定するものである。特に太陽光の日射を利用する方法は特別な設備を必要としないため、従来の目視検査や打音検査と比較しても、効率的かつ精度の高い検査が可能となる。一方、構造物の表面温度は、剥離の有無以外に日射、気温などの環境条件に大きく影響される。したがって、熱画像を用いた検査手法の適用に際しては、構造物表面がどのような条件下でどのような温度値および時系列変化を示すのかをあらかじめ把握しておくことが必要であった。

本研究では、剥離を有する実際の高架橋を対象にした現地観測データと構造物温度の時系列変化を推定する熱収支モデルを用いた数値解析結果に基づいて、実際の構造物に対する適用性を検証した。その結果、赤外線カメラによる高架橋コンクリートの剥離診断手法は、一定の季節、気象、温度条件のもとで十分活用可能であることが確認できた。

現在、JR 西日本において、本手法を用いた検査を行っており、この手法の活用により、高所や表面塗装施工箇所など目視では判別し難い箇所を含めて、コンクリートに発生している剥離を効率的に把握することが可能となった。(写真-6)

今後の課題は、適用時間や対象構造物の拡大である。現在の適用可能条件では、検査が可能な日に限られるため、気象統計上では年間約 75 日程度しか本手法を活用することができない。また、支障物などにより日射による加熱が期待できない箇所は適用できない。

これらについては、今後、適用時間や高架下活用箇所など現在検査の対象と出来ない箇所などへの適用範囲拡大の研究も進めていきたい。

謝辞：本手法の開発にあたり、現場での試験に御協力いただいた JR 西日本の神戸支社施設課及び神戸土木技術センターの皆様にご感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 長瀧重義他：山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会報告書, p. 5, 2000.
- 2) 赤松幸生, 増田一穂, 瀬戸島政博, 芦谷公稔, 一志義晴：熱映像と法面背後の空洞状況に関する検討, 日本リモートセンシング学会第 4 回学術講演会論文集, pp. 29-30, 1993.
- 3) 赤松幸生, 瀬戸島政博, 一志義晴, 境秀光：熱映像と地中レーダを併用したのり面工空洞探査の試み, 日本写真測量学会平成 6 年度秋季学術講演会発表論文集, pp. 117-120, 1994.
- 4) 高木政道, 尼崎省二：赤外線法によるコンクリート構造の表層部欠陥の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 1267-1272, 1997.
- 5) 原文人, 阪上隆英, 久保司郎, 込山貴仁, 鈴木宏信：赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート構造物の欠陥検出実験, 土木学会年次学術講演会発表論文集, V-454, 2000.
- 6) 岡本芳三, 稲垣照美, 福沢公夫, 沼尾達弥, 石橋英人：熱イメージ法による物体内部不均質空間の検出とそのモデル解析, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 60, No. 537, pp. 1758-1764, 1994.
- 7) 桃木昌子, 桃木佳子, 山田和夫：コンクリートの表面温度に及ぼす内部空隙の影響に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 655-660, 1995.
- 8) 赤松幸生, 瀬戸島政博, 安田嘉純：熱画像を用いた構造物内部の変状判別手法の検討, 日本写真測量学会平成 10 年度秋季学術講演会発表論文集, pp. 227-232, 1998.
- 9) 赤松幸生, 瀬戸島政博, 安田嘉純：熱画像と熱収支モデルによる構造物表面温度の時系列変化特性の検討, 第 2 回サーモグラフィによる非破壊評価シンポジウム講演論文集, pp. 11-17, 1998.
- 10) 赤松幸生, 瀬戸島政博, 安田嘉純：構造物内部の変状と表面温度の関係検討, 日本写真測量学会平成 9 年度秋季学術講演会発表論文集, pp. 59-62, 1997.
- 11) 柳内陸人, 魚本健人：熱赤外線計測技術によるコンクリート構造物内空隙・鉄筋の判読に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 442/V-16, pp. 91-100, 1992. 2.
- 12) 平田寿磨, 沼尾達弥, 福澤公夫, 三井雅一：赤外線映像装置によるコンクリート内部欠陥深さ検出に関する研究, 土木学会年次学術講演会発表論文集, V-196, 2002.
- 13) 鎌田敏郎, 六郷恵哲, 神谷和之, 川瀬貴行：サーモグラフィ法による鋼-コンクリート間における空隙寸法の評価, 土木学会年次学術講演会発表論文集, V-453, 2002.

- 14) 社団法人 日本機械工業連合会, 遠赤外線協会:平成 13 年度 建造物などの安全性診断のための赤外線計測試験・解析法に関する調査研究報告書, pp. 4~12, 2002. 3.
- 15) (社)日本非破壊検査協会編:コンクリート構造物の非破壊試験法, p. 75, 1994.
- 16) 鳥取誠一, 宮田信裕, 長田文博, 栗田耕一:赤外線サーモグラフィ法による鉄道コンクリート構造物の非破壊試験, 非破壊検査, 51(3), pp. 134-138, 2002.
- 17) 阪上隆英, 込山貴仁:赤外線サーモグラフィによるコンクリートの非破壊試験, 非破壊検査, 47(10), pp. 723-727, 1998.
- 18) 岡本芳三:遠赤外線リモートセンシング熱計測法, コロナ社, pp. 1-79, 1994.
- 19) 日本機械学会:伝熱工学資料 改訂第 4 版, pp. 320-322, 1986.
- 20) 岡田清・六車熙:改訂新版 コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, p. 556, 1991.
- 21) 日本建築学会編:建築設計資料集成 1 環境, pp. 97-134, 1987.
- 22) 赤松幸生, 瀬戸島政博, 安田嘉純:試験体観測による構造物内部の変状と温度変化特性の關係の検討, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 19, No1, pp. 81-86, 1999.

(2003.5.22 受付)

DEVELOPMENT OF INSPECTING METHOD FOR A DEFECT INSIDE OF CONCRETE RAILWAY VIADUCT USING THERMAL IMAGE

Fumihiko OSADA, Yuichi YAMADA, Naruo MUSIAKE and Yukio AKAMATSU

In case that a defect exists inside of concrete structure, the temperature of the surface of the defective portion will become higher as compared with that of sound portion in the daytime. The detection of the defect becomes possible by sensing the temperature distribution of the surface in the thermal image. However, detecting the defect in the thermal image is greatly influenced by environmental conditions, such as sunshine, and temperature.

Therefore, in this study, we observed the thermal images of the railway viaducts in the field and made numerical analyses of the heat balance model based on the observed data to verify in which quantitative condition the defects were able to be detected using thermal image. As a result, we propose an efficient inspecting method for a defect inside of concrete structure using thermal image.