

報告 鉄道高架橋における赤外線法による調査の適用範囲および年間の調査可能日数

岡本 圭太*1・河井 勇樹*2・坂岡 和寛*3・黒川 浩嗣*4

要旨：本報告では、鉄道高架橋の片持ちスラブを対象として、打音法に代わる剥離検知の手法として赤外線カメラに着目し、1年間、月1回、1時間ごとに毎時間赤外線画像を撮影することで剥離の判別可能条件を検証した。その結果、健全部と剥離部の温度差が $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以上で判別性が高くなることがわかった。また、日較差が 7°C 以上 10°C 未満の調査日について10時から15時の間で判別性が高いこと、日較差が 10°C 以上の調査日について、9時から16時、24時から翌5時で判別性が高いことがわかった。1年間で実際に調査可能な日数を算定すると、本調査の期間においては、昼間は129日、夜間は131日であることがわかった。

キーワード：鉄道高架橋、非破壊検査、赤外線、片持ちスラブ

1. はじめに

鉄道高架橋の状態を把握する検査として、鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物（以下、維持管理標準）¹⁾では、全般検査が定められている。全般検査は、通常全般検査と特別全般検査に分けられ、通常全般検査は目視を基本としている。

写真-1に、高所作業車を使用した打音法による調査状況を示す。山陽新幹線では、過去、コンクリート片の落下事象が頻発したことから、全般検査による目視確認に加えて、目視では確認できない、かぶりコンクリートの剥離を確認することができる打音法による調査を実施している。しかし、打音法による調査は、高所作業車や足場を活用するため、目視調査と比較して作業効率が低いこと、調査を実施する作業員の主観で剥離の有無を判断するため客観性に欠けることが課題である。そこで、調査の作業効率を向上させること、客観性を有する高架橋コンクリートの剥離診断手法を確立することを目的として、打音法による調査に代わり、赤外線カメラを用いた調査手法に着目した。

表-1に、過去の西日本旅客鉄道（株）での研究結果から得られた、赤外線カメラを活用した調査の適用範囲

を示す。赤外線カメラを活用した調査は、気温の変化に応じて剥離部と健全部の温度差が生じることを利用して、熱画像から剥離部を検出する調査方法である。長田らは、鉄道高架橋を対象とし、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（9時から17時）を行うとともに、熱収支モデルによる数値解析を行い、適用範囲の定量化を実施している²⁾。また、虫明らは、夜間（21時から翌5時）に時系列観測を行い、適用範囲を提示している³⁾。なお、長田らの検証結果は維持管理標準の付属資料に取り入れられ、紹介されている。

ただし、上記検証から15年程度経過しており、最小検知温度や画素数など赤外線カメラの性能向上によって適用範囲が変化している可能性がある。また、打音法に代わり赤外線カメラを採用するためには、年間を通じた調査可能日数を確認して費用対効果を検証する必要がある。

そこで、既往の検証時よりも新しい赤外線カメラを使用して、1年間、月1回、1時間ごとに毎時間撮影し、剥離部の判別しやすさ（以下、判別性）を確認した。さらに、赤外線カメラの採用に向けて打音法に対する費用対効果を確認するため、赤外線カメラの年間調査可能日数を算定したので報告する。



写真-1 高所作業車を使用した打音法による調査状況

表-1 長田らおよび虫明らの調査に基づく適用範囲

昼	適用可	日較差が大きい10時から14時 晴の日で1時間に30分以上の日射
	適用不可	6月～8月 風速5m/s以上
夜	適用可	春、秋は21時から翌5時 夏は1時から5時 冬は1時から7時
	適用不可	風速5m/s以上

*1	西日本旅客鉄道株式会社	鉄道本部	構造技術室	主査	修士（工）	（正会員）
*2	西日本旅客鉄道株式会社	鉄道本部	構造技術室	課員	修士（工）	（正会員）
*3	西日本旅客鉄道株式会社	鉄道本部	構造技術室	課長代理	博士（学術）	（正会員）
*4	西日本旅客鉄道株式会社	鉄道本部	構造技術室	課長	修士（工）	（正会員）

2. 山陽新幹線片持ちスラブを対象とした調査方法

本調査の対象は、広島市に位置し、経年49年、3層3径間、地表面から床版天端までの高さ13.5m、橋長26.0mのラーメン高架橋であり（図-1）、南面の片持ちスラブを調査対象とした。片持ちスラブを対象としたのは、一般的に側道に沿って位置しておりコンクリートが剥落すると第三者への公衆災害に対するリスクが高いこと、部材厚が小さく温度変化しやすいことによるものである。南面を対象としたのは、日照による温度変化の影響が大きいためである。なお、調査箇所のコンクリート表面に最も近い鉄筋はD13であり、かぶり厚は40mmである。

写真-2に、調査対象の変状概要を示す。かぶりコンクリートに介在する空洞の大きさが異なると、赤外線による剥離検知性能にも違いが発生する可能性があると考え、剥離の程度が異なる2つの変状に着目することとした。変状1は目視で剥離の確認が可能な変状であり、変状2は目視で剥離の確認が困難だが打音では確認可能な変状である。なお、両変状ともに表面被覆材が施工されており、その仕様は不明であったが、塗膜厚が薄いため、温度変化への影響は限定的であると考えられる。

写真-3に、赤外線カメラ撮影状況を示す。赤外線カメラの操作性等を考慮し、変状を見上げる角度でカメラを構え、カメラから変状まで6.5m、高さ3.5mの位置で撮影を行った。

表-2に、撮影に使用したカメラの仕様を示す。参考に、長田らおよび虫明らが使用したカメラの仕様も示している。最小検知温度差が0.1℃から0.025℃に向上し、画素数は320×240から640×480に向上している。これは、画像解析をする際に、剥離部とその周辺の健全部の温度差を詳細に判別が可能となったことを示している。なお、赤外線カメラは、太陽光の影響が小さく昼間の調査に適している長周波帯を測定する機種と、太陽光の影響が大きいが周辺の反射による影響が小さく夜間の調査に適している短周波帯を測定する機種に分かれる。ここでは、夜間も調査するが、昼間での調査を主な使用と考え、長周波帯を測定する機種を選定した。

撮影期間は2021年1月から2021年12月までの約1年間、撮影頻度は月1回、撮影時間帯は2021年1月から2021年6月までは9時から17時、2021年7月から2021年12月までは9時～翌9時である。撮影と同時に記録したデータは、気温、風速、日照時間や天気である。

図-2に、赤外線画像による剥離判別の概要を示す。撮影した画像は、赤外線カメラ付属の解析ソフトを使用してコンター図上の剥離部と健全部の温度差を計測し、剥離部と健全部の色の違いの明確さにより剥離部の判別性を判定することとした。なお、判定は、明確に判別可能を○、不明瞭を▲、判別不可能を×とした。

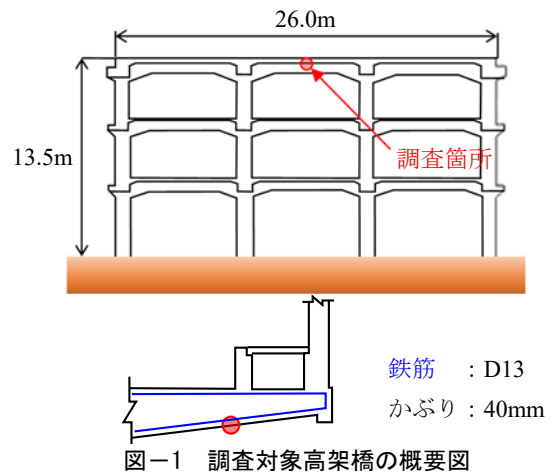


図-1 調査対象高架橋の概要図

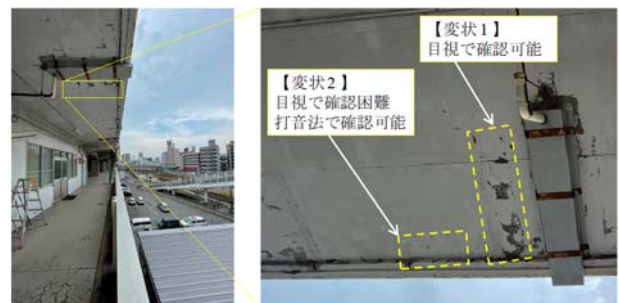


写真-2 調査対象の変状概要

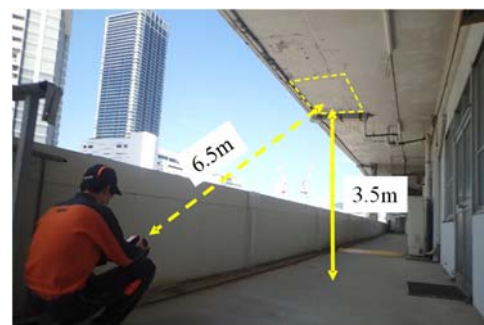


写真-3 赤外線カメラ撮影状況

表-2 赤外線カメラの仕様

	本検討	長田ら、虫明ら
検出素子	非冷却マイクロポロメータ	非冷却マイクロポロメータ
測定波長	8～14μm	8～14μm
測定温度範囲	-40℃～120℃	-20℃～300℃
最小検知温度差	0.025℃	0.1℃
画素数	640×480	320×240
フレームタイム	30Hz	30Hz

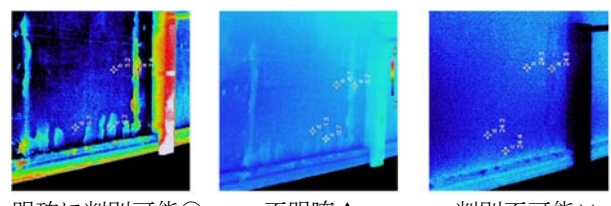


図-2 判別性の判定例

3. 各測定時間帯に対する変状の判別性

図-3, 4に、変状1および2を対象として2021年10月15日に計測した剥離部と健全部の温度を示す。当日の天気は晴れである。現地で測定した気温と、赤外線により測定した剥離部および健全部の温度の傾向は概ね一致していることが確認できる。9時から18時は剥離部が健全部よりも温度が高く、19時から翌8時は剥離部が健全部よりも温度が低い。この温度差は、剥離部の空洞内は健全部のコンクリート内に対して温度変化しやすく、周辺の気温変化の影響を受けやすいため生じている。

図-5, 6に、変状1および2を対象として2021年10月15日に計測した健全部と剥離部の温度差および剥離の判別性を示す。長田らは、剥離部と健全部の温度差と判別性について、判別性○は0.5℃以上としており、本検証においても概ね温度差±0.5℃程度が判別性○の境界であることが確認できた。また、変状1よりも変状2の方が健全部と剥離部の温度差は小さい。そのため、同一時刻において変状1よりも変状2の方が判別性は低下する傾向がある。しかし、変状1と変状2で判別性が○となる時間帯は概ね同様であった。

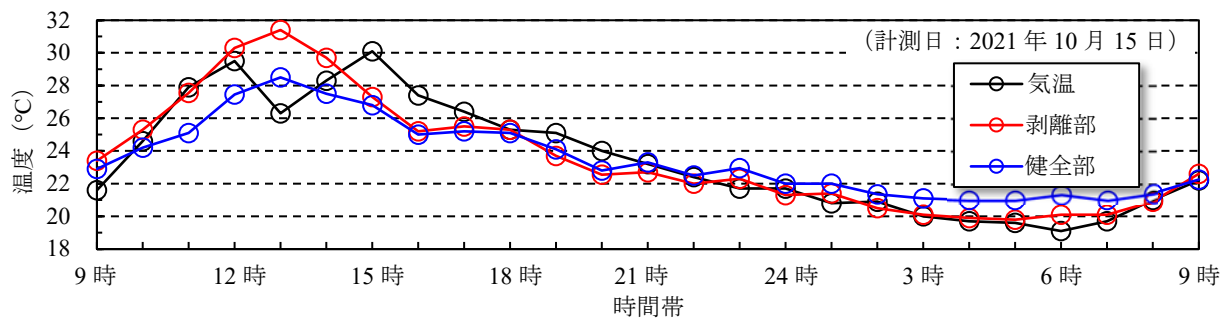


図-3 変状1を対象とした剥離部と健全部の温度

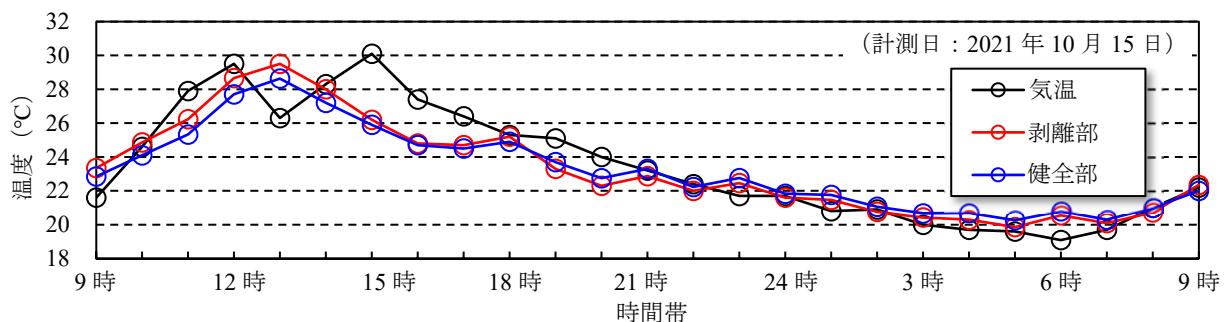


図-4 変状2を対象とした剥離部と健全部の温度

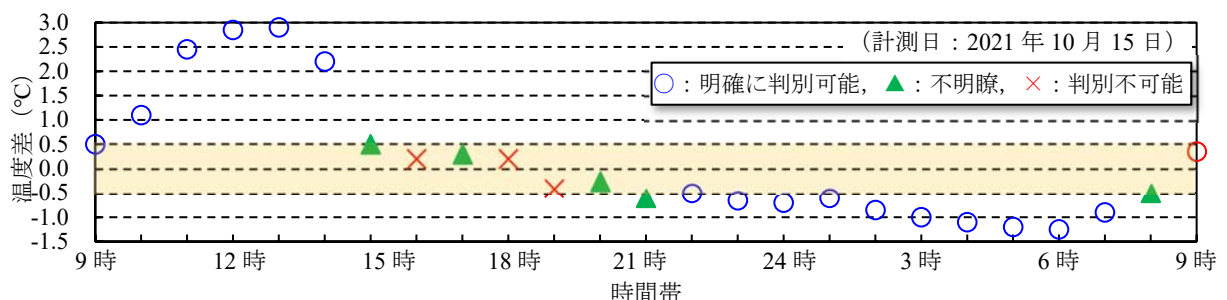


図-5 変状1を対象とした健全部と剥離部の温度差および剥離の判別性

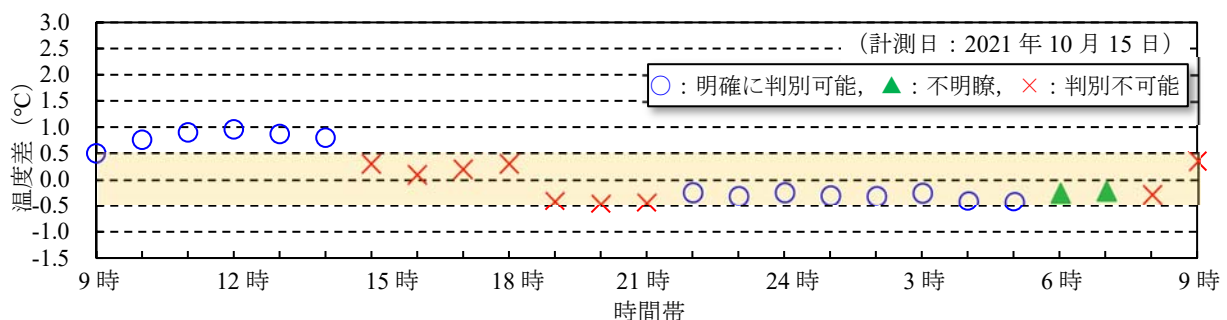


図-6 変状2を対象とした健全部と剥離部の温度差および剥離の判別性

表-3, 4 に、変状 1 および 2 を対象とした各測定日の日較差と各測定時間帯の判別性を示す。全ての調査日、時間帯において、風速は 5m/s 以下であった。降雨が判別性におよぼす影響は認められなかった。また、変状 1、変状 2 ともに日較差が概ね 10℃以上の日は、10℃未満の調査日と比較して、夜間（22 時以降）の判別性が良好である。そこで、日較差 7℃以上 10℃未満と 10℃以上の 2 グループに分け、各時間帯の判別性を確認するため、判別性○、▲、×について 1.0、0.5、0 と点数を与え、各時間帯の点数の平均を算定した。表-5 に、点数で示した日較差および時間帯ごとの判別性を示す。なお、測定を

実施しなかった時間帯は算定から除外している。ここでは、0.8 以上の点数について、概ね判別性が高い時間帯とし、青字で示す。

日較差が 7℃以上 10℃未満の調査日における判別性について、昼の調査時間は 10 時から 15 時の間で判別性が高く、夜は 2 時から 4 時の間で判別性が高い。ただし、夜間の判別性が高い時間は短く、作業効率は低い。

日較差が 10℃以上の調査日における判別性について、昼の調査時間は 9 時から 17 時で判別性が高く、夜は 24 時から 7 時で判別性が高い。ただし、変状 2 では 17 時、6 時、7 時で、判別性○が他の時間帯と比較して少ない。

表-3 変状 1 を対象とした各測定日の日較差と各測定時間帯の判別性

調査日	日較差 (℃)	時間帯																			
		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4
2021年1月21日	7.4	▲	▲	○	○	○	○	○	○	▲											
2021年2月19日	9.9	▲	○	○	○	○	○	○	○	○											
2021年3月31日	14.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○											
2021年4月22日	13.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○											
2021年5月31日	12.9	○	○	○	○	○	○	○	○	○											
2021年6月15日	6.2	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×										
2021年7月15日	9.2	○	○	○	○	○	○	○	×	×	▲	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2021年8月26日	6.8	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2021年9月21日	7.0	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2021年10月15日	12.1	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2021年11月16日	10.9	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2021年12月27日	6.2	×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

○：明確に判別可能，▲：不明瞭，×：判別不可能，■：測定を実施しなかった時間帯，：降雨があった時間帯

表-4 変状 2 を対象とした各測定日の日較差と各測定時間帯の判別性

調査日	日較差 (℃)	時間帯																			
		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4
2021年1月21日	7.4	×	×	○	○	○	○	○	○	▲											
2021年2月19日	9.9	▲	▲	○	○	○	○	○	▲	▲											
2021年3月31日	14.5	○	○	○	○	○	○	○	○	▲											
2021年4月22日	13.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○											
2021年5月31日	12.9	○	○	○	○	○	○	○	○	▲											
2021年6月15日	6.2	▲	○	○	○	○	▲	×	×	×											
2021年7月15日	9.2	○	○	○	▲	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2021年8月26日	6.8	▲	○	○	○	○	○	○	○	▲	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2021年9月21日	7.0	▲	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2021年10月15日	12.1	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2021年11月16日	10.9	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2021年12月27日	6.2	×	×	▲	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

○：明確に判別可能，▲：不明瞭，×：判別不可能，■：測定を実施しなかった時間帯，：降雨があった時間帯

表-5 点数で示した日較差および時間帯ごとの判別性

日較差		時間帯																			
		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4
7℃以上 10℃未満	変状 1	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.6	0.6	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	変状 2	0.6	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	0.8	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.7	0.7	0.7
	平均	0.7	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.6	0.5	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.8	0.8	0.8
10℃以上	変状 1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.9	0.0	0.0	0.3	0.3	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	変状 2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.5	0.8	1.0	1.0	1.0
	平均	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.0	0.0	0.1	0.1	0.6	0.6	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0

4. 赤外線カメラによる年間の調査可能日数

表－6 に、本調査結果に基づく赤外線カメラの適用範囲を示す。なお、本表では表－5 において判別性の点数が 0.8 以上の時間帯を基本としたが、作業効率などを考慮し、0.8 以上でも適用不可としている時間帯がある。また、既往の検証結果を踏まえ、雨天時は中止とした。

24 時間ごとの調査結果から日較差に基づき適用範囲を設定したことにより、例えば、天気予報から測定可能日を判定することが可能となった。ここで、気象庁のデータ⁴⁾を用いて、2021 年度を対象として、表－6 で得られた適用範囲を採用した際の調査可能日数を確認した。

表－7 に、本検証から得た適用範囲を満たす日数を示す。昼間の適用範囲を満たす日数は 200 日、夜間は 203 日である。ここで、土日祝日を約 130 日間とすると、適用範囲を満たす日数×(365-130) / 365 が実際に調査可能な日数となる。これを考慮すると、年間の調査可能日数は、昼は 129 日、夜は 131 日である。

打音法と費用対効果を比較する際には、調査可能日数、1 日当たりの調査可能量、赤外線カメラの購入費用や画像解析を含む調査員の人工、高所作業車・足場の費用や作業員の人工を考慮して年間の費用を算出することで可能と考える。

なお、本検討から得た適用範囲は、限られた条件で得た結果であるため、道路交差部など第三者への公衆災害に対するリスクが高い箇所については、打音を併用すること、特に判別性が高い時間帯を選択する必要がある。また、本検証では南側の片持ちスラブを対象とした。北側では日照条件が異なり、また、鉄道高架橋の中間スラブはバラストや路盤コンクリートなど床版上面の構造が熱分布に影響を及ぼす可能性がある。そのため、南側に面していない部材や、鉄道高架橋の中間スラブなどバラストや路盤コンクリートを有する部材は、別途、同様の調査を実施し、その適用性を確認する必要がある。

5. まとめ

本報告では、鉄道高架橋の南側の片持ちスラブを対象として、打音法に代わる剥離検知の手法として赤外線カメラに着目し、1 年間、月 1 回、1 時間ごとに毎時間赤外線画像を撮影することで剥離の判別可能な条件を検証した。その結果は以下の通りである。

- ・目視では確認できない剥離、目視で確認できる剥離ともに、健全部との温度差が±0.5℃以上で判別性が良好となり、その時間帯は両変状で概ね同じである。
- ・日較差が 7℃以上 10℃未満の調査日は、昼間の調査時間は 10 時から 15 時の間で判別性が高い。
- ・日較差が 10℃以上の調査日は、昼間の調査時間は 9 時から 16 時で判別性が高く、夜間は 24 時から翌 5 時で判

表－6 本検証から得た適用範囲

昼	適用可	・日較差が 7℃以上 10℃未満の場合 →10 時から 15 時 ・日較差が 10℃以上の場合 → 9 時から 16 時
	適用不可	・雨天 ・風速 5m/s 以上
夜	適用可	・日較差が 10℃以上の場合 →24 時から翌 5 時
	適用不可	・雨天 ・風速 5m/s 以上

表－7 本検証から得た適用範囲を満たす日数

	昼				夜			
	◎	○	▲	×	◎	○	▲	×
	測定可能	測定不可能	測定可能	測定不可能	測定可能	測定不可能	測定可能	測定不可能
1 月	6	6	6	13	7	7	5	12
2 月	12	4	4	8	13	6	2	7
3 月	13	7	2	9	11	8	5	7
4 月	12	10	0	8	11	9	4	6
5 月	8	6	3	14	8	6	10	7
6 月	6	12	4	8	6	11	4	9
7 月	2	12	4	13	2	13	7	9
8 月	2	10	4	15	2	11	5	13
9 月	3	10	9	8	3	11	6	10
10 月	14	6	7	4	13	8	4	6
11 月	11	8	3	8	11	7	8	4
12 月	7	13	3	8	7	12	5	7
合計※	200	165	203	162				
	(129)		(131)					

◎：日較差 10℃以上の日

9 時から 16 時

○：日較差が 7℃以上 10℃未満で晴れあるいは曇りの日
10 時から 15 時

▲：測定開始前の時間帯で雨が観測された日

×：測定時間帯に雨が観測された日

※（ ） 土日祝日を考慮した年間の調査可能日数

別性が高い。

・本検証から得た適用範囲を採用し、土日祝日などを考慮して 1 年間で実際に調査可能な日数を算定すると、昼間は 129 日、夜間は 131 日であった。

・本検証から得た適用範囲は、限られた条件で得られた結果であるため、第三者影響のリスクが高い箇所に採用する際には留意する必要がある。

・南側に面していない部材や、鉄道高架橋の中間スラブなどバラストや路盤コンクリートを有する部材は、別途、同様の調査を実施し、その適用性を確認する必要がある。

参考文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造，丸善，2007 年 1 月
- 2) 長田文博，山田裕一，虫明成生，赤松幸生：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，土木学会論文集，No.760/V-63, 121-133, 2004.5
- 3) 虫明成生，小野尚哉，渡辺佳彦，長田文博：夜間時の赤外線カメラを用いた高架橋コンクリートの剥離診断（その 2），土木学会 第 58 回年次学術講演会，V-404, 2003.9.25
- 4) 気象庁 HP 過去の気象データ参照：
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>