

# 論文 赤外線カメラ搭載ドローンを活用したコンクリート法面の欠陥検出に関する研究

太田 龍之介\*1・川崎 佑磨\*2・橋本 康平\*3・濱口 貴仁\*3

**要旨:** 施工後何年も経過している法面は老朽化や背面空洞化により事故につながるケースもある。赤外線カメラ搭載ドローンは法面点検に有用であると考えられるが、使用条件や評価に関する知見は少ない。そこで計測の撮影時刻や評価方法について検討した。その結果、本研究で報告する9月、10月の範囲では、東面は正午付近の12時と日没前の17時、18時の2時刻の計測が、南面は9時と正午過ぎの14時の2時刻の計測で欠陥箇所が評価可能だった。また供試体縦方向には撮影距離の違いなどで温度差が生じること、実画像によるコンクリート表面の色合いによっても熱画像に影響が出ることがわかった。

**キーワード:** 赤外線カメラ, ドローン, 法面, 背面空洞化, 非破壊検査

## 1. はじめに

日本には山岳地帯を通過する道路が多く存在し、落石や地崩れなどを防止するために多くの法面が存在する。それらは施工性の良いモルタル吹付工法で施工されており、凹凸のある法面でも施工可能であることから法面保護工としても多用されている。しかし、施工後何十年も経過しているものが多く存在し、モルタルの老朽化の進行やモルタル吹付背面の空洞化も進んでいる。中には豪雨の影響で斜面崩壊が発生し重大な事故につながったケースもあり、道路の維持管理上の問題となっている。またモルタル吹付法面はその数が膨大なことや、高所での点検作業を要するなどの安全面の課題を抱えている。さらにモルタル吹付背面の空洞化が進んでいても目視点検のみでは発見が難しい。規定に基づいた定期点検が定められておらず、定期点検が実施されていない法面もあると考えられ、これらの法面は崩壊のリスクを抱えている。モルタル吹付法面の基本的な点検は近接目視による点検で打音調査を行うことである。しかし、点検技術者の人手不足や作業負担、点検費用などの課題から打音調査を定期的に行うことは難しいことから、効率的で安全に点検できる調査手法の確立が求められる。

そこでこの現状から脱却するため、近年のデジタル技術の発展により建設業界でも赤外線ドローンが採用されており、本研究では、赤外線ドローンを用いた点検の可能性について検討した。赤外線ドローンの特徴としては機動性が高く手軽に調査可能であることから、規模の大きな法面や据え付けの赤外線カメラの設置が困難な法面などの点検において利用され、人員の削減や点検の簡易化も期待される。

しかし、据え置き赤外線カメラのマニュアルはあるが発行から27年経過している<sup>1)</sup>。また赤外線ドローンを用いた橋梁点検や外壁調査などはある一方で、法面点検の知見は少なく、撮影日の時間や天気、気温、撮影距離など様々な要因によって結果が異なる場合もある<sup>2)</sup>。例えば、浮きの箇所と健全箇所温度差が生じにくい、欠陥部分の判断ができないなどの課題がある。

そこで本研究では、赤外線カメラを搭載したドローンを利用したコンクリート法面点検の実用化に向けて、欠陥検出の精度を高めることを目的とした。赤外線ドローンでの撮影において最適な撮影時間帯や評価方法の検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

本研究の使用供試体を図-1に示す。上幅2m、下幅6mの台形の面が4面存在し、高さ2m、勾配1:1(45°)、各面のモルタル厚さは50mmである。実際のモルタル法面では、吹付け厚さが不均一になり、それらは赤外線測定の結果にも影響を与える可能性がある。本研究では、施工時の吹付け厚さの不均一性は考慮せず、実験供試体を作製した。供試体設置場所はドローンの飛行距離が保

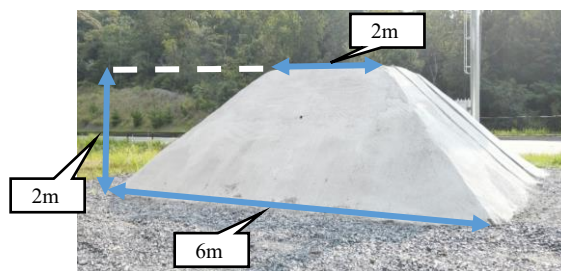


図-1 供試体概要

\*1 立命館大学大学院 理工学研究科環境都市専攻 (学生会員)

\*2 立命館大学 理工学部環境都市工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 滋賀県建設技術センター 技術課

持できるように、滋賀県大津土木事務所が管理する資材置き場とした。欠陥部分の模擬については深さ 100mm の空洞を設けた。欠陥の寸法、数などは各面で異なる。本論では、東面と南面の 2 面の結果について考察する。東面の空洞部分を図-2 に示す。東面は 1 辺が 0.7m の正三角形 4 つをまばらに中心から右側に配置し、空隙率は面全体のうち 6.6% である。南面の空洞部分を図-3 に示す。南面は 1 辺が 2m の正三角形を中心に配置し、空隙率は面全体のうち 15.2% である。それぞれの位置については端部からの温度影響を考慮し縁部から 0.5m 以上離隔を取った。また端部の影響ではなく空隙による温度変化であることを示すためそれぞれの空隙の辺が供試体端部と平行にならないように角度を設けて配置した。

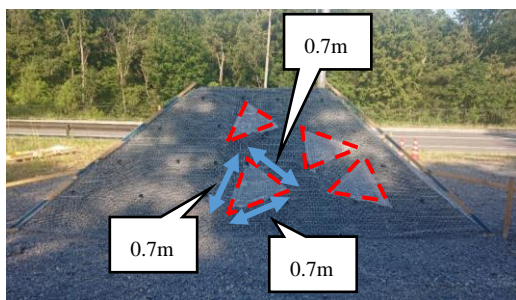


図-2 東面空洞位置 (施工前)

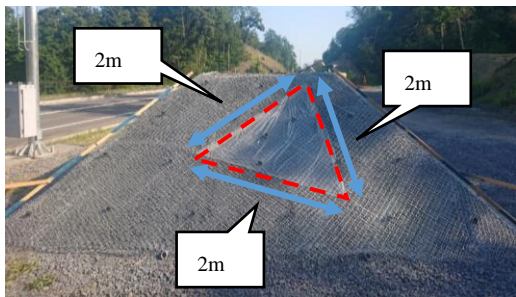


図-3 南面空洞位置 (施工前)

## 2.2 赤外線ドローン

計測に使用した赤外線ドローンは DJI の MAVIC2 ENTERPRISE である。計測時に熱画像と実画像を同時に計測することが可能である。計測に用いたドローンを図-4 に、赤外線のパフォーマンスを表-1 に示す。付属の解析ソフトのパフォーマンスでは、撮影した熱画像の最大温度から最小温度の範囲で測定温度範囲の設定が可能である。そのため、撮影した時間や時期が異なる場合、熱画像の測定温度範囲の設定が同一にできない場合もあることに留意したい。



図-4 赤外線ドローン

表-1 赤外線ドローンの性能

センサー	非冷却VOx マイクロボロメータ
センサー解像度	640×512
フレームレート	30Hz
画素ピッチ	12μm
スペクトル帯	8~14μm
空間分解能 (IFOV)	1.334
温度測定精度	±2°C

## 2.3 撮影条件

撮影は 2023 年 9 月と 10 月に実施した。撮影時間帯はドローンの飛行可能な時間を考慮しつつ、9 時から 17 時を基準とし、日没まで 1 時間ごとに計測した。現地で撮影時の温湿度、天気を記録し、さらに気象庁より大津市の気象データを参照した。また、照度も撮影ごとに各面中心部分で記録した。

ドローンの撮影状況を図-5 に示す。ドローンの撮影画面に供試体全体が捉えられるように、撮影距離は 5m、ドローンの飛行高さは 1m で計測した。撮影距離は供試体下部の端部からドローンまでの距離とした。また撮影角度は正面のみで計測した。



図-5 撮影状況

## 2.4 評価方法

視覚的評価について、評価例の概要を表-2 に示す。既往研究の判別方法<sup>2)</sup>を参考に、赤外線画像より欠陥部分の判断が可能であるかを視覚的に判断した。撮影した熱画像を欠陥の形状が捉えることが可能かを評価することとした。評価については明確に形状が判断可能な場合○、判断可能な場合□、やや判断可能な場合△、判断不可能な場合×とした。

表-2 視覚的評価の評価例

○	□	△	×
4	3	2	1
明確に判断可能	判断可能	やや判断可能	判断不可能

温度差の評価について、熱画像処理ソフトを用いて撮影結果より、表面温度を測定した。表面温度計測の概要を図-6に示す。概要は南面を例にしたもので、図中の計測箇所の数について、詳細を以降で説明する。供試体上部（高さ1.5m付近）で横一列、下部（高さ0.5m付近）で横一列の温度を評価した。表面温度の計測位置は15cm間隔でプロットした。各面、上段は20カ所、下段は33カ所を基準とした。東面は上段20カ所のうち16カ所が健全部分、4カ所が欠陥部分であり、下段33カ所のうち21カ所は健全部分、11カ所は欠陥部分である。南面は上段20カ所のうち14カ所が健全部分、6カ所が欠陥部分であり、下段33カ所のうち26カ所は健全部分、7カ所は欠陥部分である。横一列の健全部分、欠陥部分で表示温度の平均をそれぞれ算出し、平均した温度の1日の変化の様子について評価した。また健全部分の平均温度と欠陥部分の平均温度の温度差も評価した。温度差の算出は「欠陥部分の平均温度－健全部分の平均温度」とした。

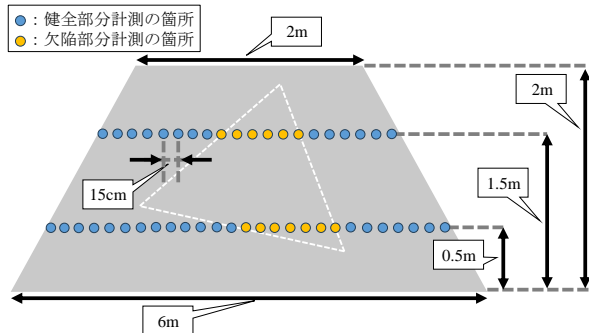


図-6 表面温度計測の概要（南面）

### 3. 視覚的評価による実験結果

#### 3.1 東面

東面の視覚的評価による結果を表-3に示す。東面9月計測の11時の熱画像を図-7に、14時の熱画像を図-8に、18時の結果を図-9に示す。東面10月計測の11時の熱画像を図-10に、14時の熱画像を図-11に、17時の結果を図-12に示す。図-7撮影時の実画像を図-13に示す。東面は○ではなく□や、△の評価が午前中に多くなった。供試体の上部と下部で実際の撮影距離に約1m差があるため1日の計測を通して温度表示が異なり、上部は評価可否が分かるが下部は評価可能となる熱画像の結果になったと考えられる。熱画像より11時の計測では欠陥部分の温度が健全部分より高くなり欠陥の形状が明瞭に確認できた。14時の計測では日射が当たらないことから欠陥部分の温度が11時から徐々に低下した。そのため、9月の計測では形状の判断が少し可能であるが、10月の計測では形状の判断が難しくなった。日没前の計測では9月、10月ともに欠陥部分の温度が健全部分より

も低くなり欠陥の形状が確認できる。以上より9月、10月の東面は13時頃までの午前中と日没前の時間帯で視覚的評価が可能と考える。東面は日の出から12時頃まで日射を受けるため表面温度が上昇する変化を伴い、正午以降から日没前までは温度が低下する変化を伴うため、この時間帯での評価が可能になったと推察される。

表-3 視覚的評価結果（東面）

時刻	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
9月	△	□	○	□	□	△	×	×	△	□
10月	△	□	□	□	△	×	×	×	□	/

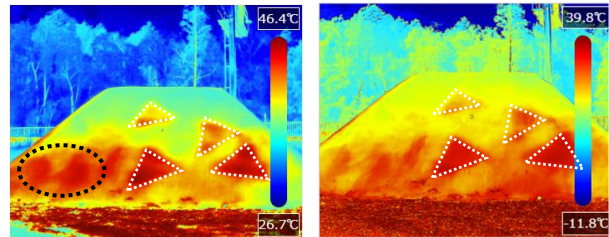


図-7 東面9月11時

図-10 東面10月11時

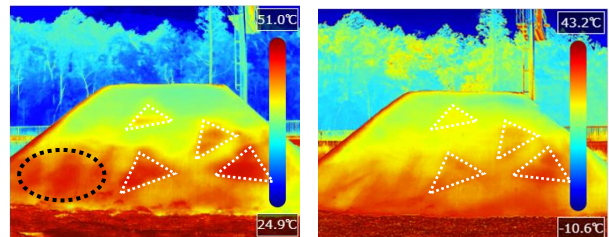


図-8 東面9月14時

図-11 東面10月14時

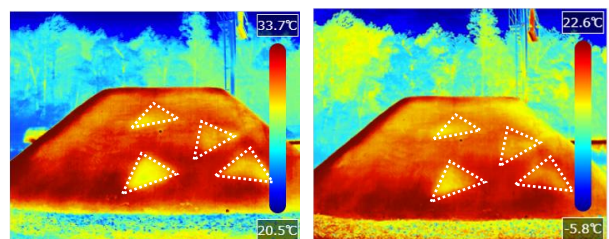


図-9 東面9月18時

図-12 東面10月17時



図-13 東面9月11時の実画像

図-7、図-8より供試体左下の部分（黒点線の○）は健全部分であるにも関わらず、温度変化が確認できた。図-13の実画像の同箇所と比較すると、供試体表面が少し粗く黒色に近い模様となっていることがわかる。既往研究<sup>3)</sup>より表面の粗さによる違いで放射率が異なることが示されており、粗いと温度がわずかではあるが高くなることが示された。したがって、健全部分で温度が高く表示される箇所についてはコンクリート表面の状態（例えば凹凸など）も考慮して検討する必要もある。

### 3.2 南面

南面の視覚的評価による結果を表-4に示す。南面9月計測の9時、12時、14時、17時の熱画像を図-14、図-15、図-16、図-17に示す。南面10月計測の9時、12時、14時、17時の熱画像を図-18、図-19、図-20、図-21に示す。熱画像より9時の計測では、9月、10月とも欠陥部分と健全部分の差がなく形状の確認が難しい。9月、10月の場合は、実験箇所において9時の時点では南面に日射が当たらず、欠陥部分の空洞が十分に熱を吸収できなかったことが要因として考えられる。11時頃から日射により欠陥部分が熱せられ、温度差が生じ欠陥部分が確認できるようになった。14時頃ではさらに熱せられ、より温度差が生じ欠陥部分を十分に確認できた。17時頃は日射が当たらず、温度が低下し形状の判断

表-4 視覚的評価結果 (南面)

時刻	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
9月	×	△	○	□	○	○	□	△	△	×
10月	×	×	□	○	○	○	□	△	△	/

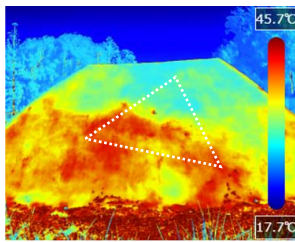


図-14 南面9月9時

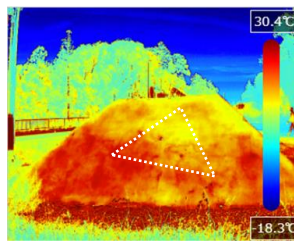


図-18 南面10月9時

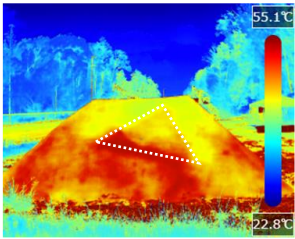


図-15 南面9月12時



図-19 南面10月12時

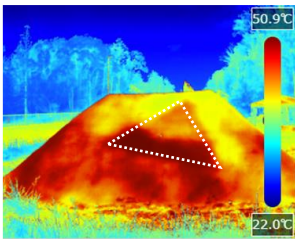


図-16 南面9月14時

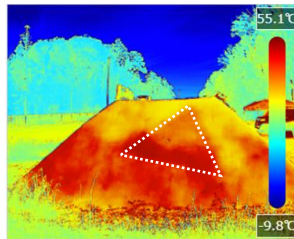


図-20 南面10月14時

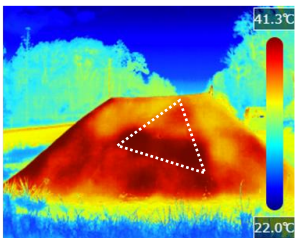


図-17 南面9月17時

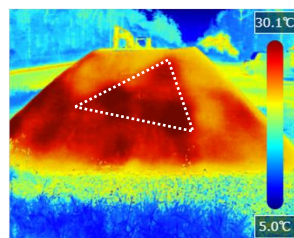


図-21 南面10月17時

可否が分かれる評価となった。南面は○が正午前後で多くなった。上部と下部で温度差は生じているが、それぞれの健全部分と欠陥部分で温度差が生じているため評価可能な熱画像が多くなったと考えられる。9月、10月の結果から、南面は正午前から日没前まで日射により、温度が上昇する変化を伴う。そのため、この時間帯での視覚的評価が可能になったと推察される。また供試体南面の地面付近の健全部分の温度が高く表示されている箇所は、東面と同様にコンクリート表面の粗さによる違いと考えられる<sup>3)</sup>。

## 4. 温度差評価による実験結果

### 4.1 東面

9月および10月に計測した熱画像より表面温度の結果を図-22、図-23に示す。9月、10月ともに午前から14時までは温度表示が上段健全、上段欠陥、下段健全、下段欠陥の順に高くなった。これには機械的な性質も含めていくつかの理由が考えられる。機械的な差としては、ドローンから上段、下段までの撮影距離が異なり、距離によって温度差が生じる可能性がある。しかしこれによって生じる温度差は各時刻でほぼ一定であるため、欠陥評価に対して大きな影響を与えていないと考えられる。また、地面や法面内部の土の熱伝導率はおよそ0.6W/m・Kであるのに対し、空気の熱伝導率が0.02W/m・Kと小さい。よって、下段は地面からの熱伝導により上段よりも熱の供給量が多いため、地面に近い下段の方が温まりやすいと考えられる。

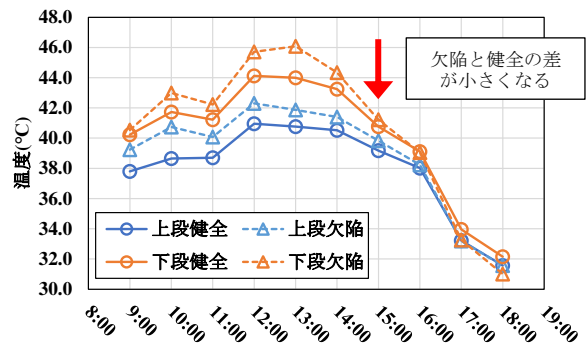


図-22 9月東面の健全部と欠陥部の温度

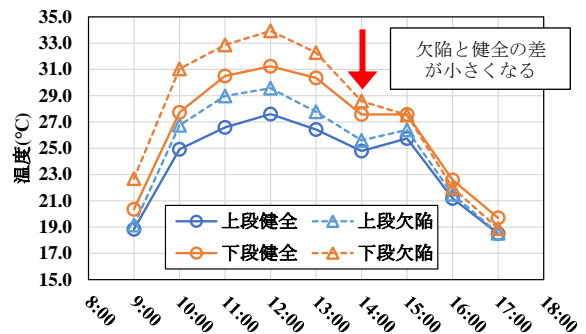


図-23 10月東面の健全部と欠陥部の温度

9月、10月の温度変化をみると9時から温度が上昇し12時、13時で最大となり以降は温度が低下する変化となった。これは東面に当たる日射の影響であると考えられ、東面は日の出から日射が当たるため午前中は温度が上昇し、午後は日射が当たらないため温度が低下したと考えられる。上段、下段ともに14時頃まで欠陥部分の温度が健全部分よりも高くなった。15時以降は欠陥部分の温度が健全部分よりも低くなり、温度が逆転した。この温度変化の逆転は欠陥判断の評価のひとつである。特に、9月と10月の上段および下段の欠陥について、14時から18時までの温度変化の勾配が健全よりも大きいことがわかる。すなわち、東面のように日射が当たりやすい面においては、赤外線ドローンの画像だけではなく、取得した温度情報からも欠陥の判断が可能であるといえる。しかし、上段は下段よりも温度が低いいため判断が難しくなったと考える。よって東面は正午付近と日の入り前までの間で温度変化の逆転が生じないかを確認することが有効だと考えられる。

図-6に示したように熱画像から供試体の上段および下段の健全箇所と欠陥箇所の温度差を計算して、時刻歴変化を確認した。9月および10月の東面の結果を図-24、図-25に示す。グラフ内には温度差が $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以上の範囲を緑で示す。上段と下段で健全部分と欠陥部分の温度差が1日を通してどのように変化したかを評価した。温度差が大きいほど欠陥部分の判断に有効だと考えられる。正午前で温度差が最大となり日没前に温度差が徐々に縮まった。この温度差が最大、最小となる時刻が適切な計測時刻ではないかと推察される。温度差が最大となる時刻では欠陥部分が健全部分よりも高くなり、欠陥部分の

判断可能な温度差が生じていると考えられる。最小となる時刻は欠陥部分が健全部分より低くなり、温度差が最大となる時刻との比較を行うことで変化量から欠陥部分の判断可能になると考えられる。この変化量の違いからも欠陥部分の評価が可能になるため、この2時刻間での温度差の比較を行い評価することが適切ではないかと考えられる。また、既往研究<sup>4)</sup>を基に欠陥部分の評価する基準値を検討したところ、およそ $1^{\circ}\text{C}$ となった。下段は9時と15時から17時までの間を除き温度差が $1^{\circ}\text{C}$ を超えており、上段は10時から14時までの間でのみ $1^{\circ}\text{C}$ を超えた。一方で11時、12時、13時の熱画像では上段の欠陥を捉えるのは難しい。しかし温度差が $1^{\circ}\text{C}$ 以上あり、欠陥部分の判断可能な温度差が生じたといえる。視覚的評価では判断可否が分かれる、あるいは見逃してしまう結果でも、温度差の評価より $\pm 1^{\circ}\text{C}$ より差がある場合、計測した熱画像より欠陥部分の評価が可能であると考えられる。

#### 4.2 南面

9月および10月に計測した熱画像より表面温度の結果を図-26、図-27に示す。南面は9月、10月ともに10時以降は欠陥部分の温度が健全部分よりも高くなった。温度表示については東面と同様に上段健全、上段欠陥、下段健全、下段欠陥の順に高くなった。東面と同様にドローンと供試体までの距離の違い、地面からの熱伝導率の違いにより、上段よりも下段の温度表示が高くなったと考えられる。

9月、10月の温度変化をみると9時の時点では上段、下段ともに欠陥部分の温度が健全部分の温度よりわずかではあるが低くなり、10時以降は日の入りまで欠陥部分

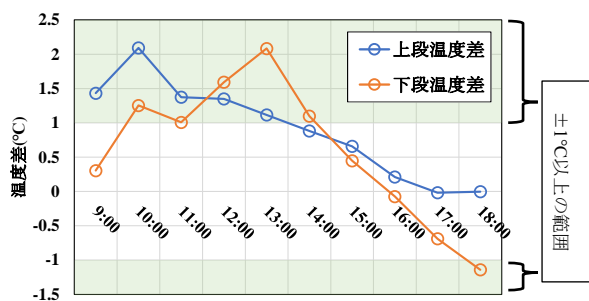


図-24 9月東面の上段、下段の温度差

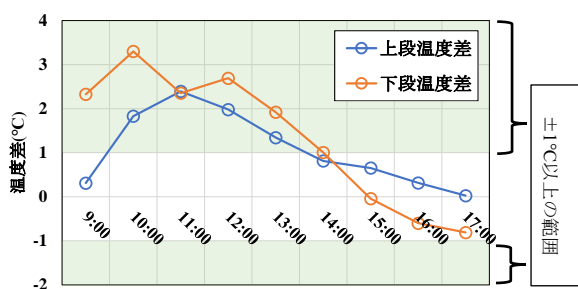


図-25 10月東面の上段、下段の温度差

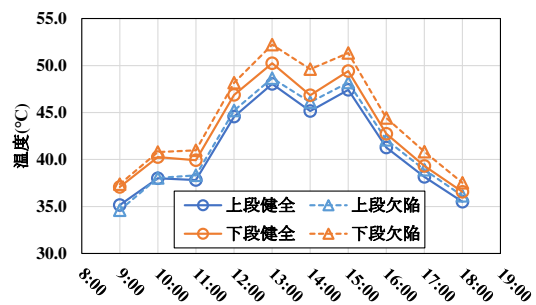


図-26 9月南面の健全部と欠陥部の温度

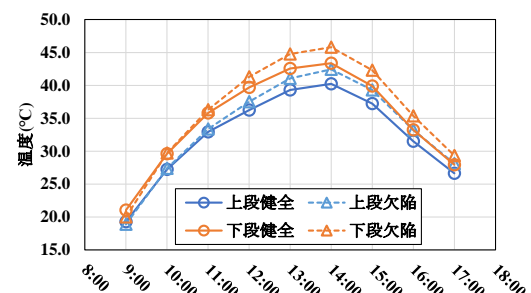


図-27 10月南面の健全部と欠陥部の温度

の温度が健全部分よりも高くなり、温度が逆転した。南面に日射が当たるのは10時以降から日の入り前までであると考えられるため、日射が当たる前までは日射による温度変化がなく、10時以降から日射が当たり温度が上昇する変化となったためである。また日射が当たり始めてから日の入り前まで日射を受けるため、常にコンクリート表面が温められ、温度が低下し始める時刻が14時、15時頃になったことより、日の入り前の時刻での温度の逆転が生じなかったと考えられる。したがって、南面の温度変化の逆転を確認するためには、計測開始の9時またはそれ以前から正午付近までの温度変化の逆転が生じないかを確認することが有効だと考えられる。

9月および10月に計測した南面の熱画像より供試体の上段、下段の温度差の変化を図-28、図-29に示す。南面は午前中で温度差が小さく、時刻が進むにつれて徐々に温度差が大きくなっていることがわかる。また上段下段ともに温度差が1°C以上ある場合、評価が可能であると示されたため、東面と同様温度差が1°C以上生じると欠陥部分の評価が可能になると考えられる。

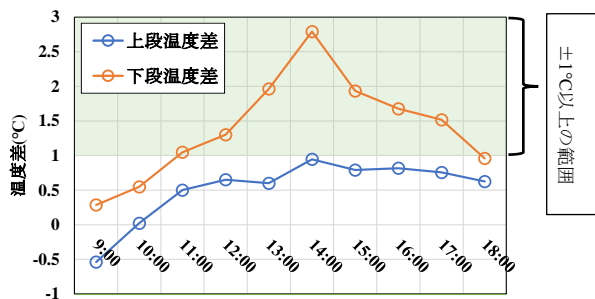


図-28 9月南面上段、下段の温度差

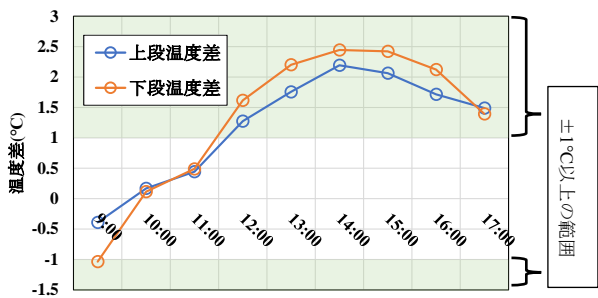


図-29 10月南面上段、下段の温度差

## 5. まとめ

本研究では、赤外線ドローンの実用化に向けて、月ごと、時間ごと、面ごとに計測を行い、視覚的評価と温度差評価を行い適切な撮影時期、時間帯の検討を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 赤外線ドローンにより、表面でわずかな温度差が生じることが、視覚的評価、温度差評価から確認できた。これは、供試体表面までの距離の差、地面からの熱伝導率、供試体が空気と触れる表面積の差などで生じ

ると考えられる。そのため、視覚的評価では表面の粗さによって表示温度が異なることがあり、評価に影響を及ぼす可能性が示された。また、評価者によっても評価は異なるため、定性的な評価になる。

- (2) 東面では、午前中に日射が当たり温度上昇の変化を伴い欠陥部分は健全部分よりも温度が高くなった。正午以降は日射が当たらず温度低下の変化を伴い日没前に欠陥部分は健全部分よりも温度が低くなり、温度変化が逆転した。9月、10月の東面は12時と日没前の17時の2時刻で計測を行うと、熱画像、記録温度の差分、温度変化の逆転から欠陥部分の定量的な評価ができる可能性が示された。
- (3) 南面では、日射が十分に当たらない9時では欠陥部分は健全部分よりも低くなり、10時から日の入り前まで日射を受けるため欠陥部分は健全部分よりも温度が高くなった。わずかではあるが温度変化が逆転したことから、9月、10月の南面は9時もしくはそれ以前の日の出後と14時の2時刻で計測を行うと、熱画像、記録温度の差分、温度変化の逆転から欠陥部分の定量的な評価ができる可能性が示された。
- (4) 温度差の評価より、法面は健全部分と欠陥部分の温度差が±1°Cより大きくなると欠陥部分が評価しやすくなる結果が得られた。すなわち、計測時の気温、気温変動などから、差分を取るための計測時間は異なることが確認できた。

法面の向きは多様なため、赤外線ドローンで欠陥箇所が評価可能な時期や時刻などの条件は多様である。そのため、本計測は撮影時期の影響も確認するため、現在も毎月実施しており、1年間を通じてより多くのデータから評価を進める予定である。

## 参考文献

- 1) 建設省土木研究所：熱赤外線映像法による吹付のり面老朽化マニュアル，pp.13-23，1996.1
- 2) 岡本圭太，河合勇樹，坂岡和寛，黒川浩嗣：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，pp.1384-1389，2023
- 3) 林詳梧，橋本和明，明石行雄：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，pp.1696-1701，2012
- 4) 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，pp.121-133，2004.5