

# 赤外線サーモグラフィカメラによる地下鉄トンネルの浮き・はく離検出に関する有効性の検討

## VALIDATION OF DETECTION METHOD FOR VOID NEAR SURFACE AND FLAKING IN THE SUBWAY TUNNEL LINING BY INFRARED THERMOMETRY

川上 幸一<sup>1\*</sup>・小西 真治<sup>2</sup>・村上 哲哉<sup>3</sup>・日下 義政<sup>4</sup>

Kouichi KAWAKAMI<sup>1\*</sup>, Shinji KONISHI<sup>2</sup>, Tetsuya MURAKAMI<sup>3</sup>,  
Yoshimasa KUSAKA<sup>4</sup>

In this research, we validated the effectiveness of infrared thermometry in detecting void near surface and flaking in the subway tunnel. At first, we performed the measurement by setting the camera at a fixed position. Then we confirmed the condition for detecting void and flaking by evaluating the difference in temperature between sound and unsound surface using the infrared thermometry data.

Next, based on the gained condition we detected void and flaking using the data obtained by moving the infrared camera. By comparing the results of infrared thermometry against the hammering test, we found that the detection rate of overall void and flaking by using infrared thermometry was 70-80%. In the case of rank A and B judged by the hammering test, the detection rate from infrared thermometry was over 90%.

**Key Words :** *infrared thermometry, infrared camera, tunnel concrete lining, nondestructive inspection, spalling*

### 1. はじめに

我が国の地下鉄は古いものでは開業から 80 年を越えているものがある。そのため、近年、トンネルの老朽化に伴う覆工コンクリートの浮き・はく離の検査に対する要求が高まっている。これまでも点検・保守を行いながら営業が続けられてきた。しかし、これらの点検手法は人手による目視や打音によるものであることから、検査にかかる時間が問題になってきている。特に長大なトンネル構造である地下鉄においては、管理延長が長い上に検査時間が終電後から始発までの限られた時間（1:00～4:00）で点検作業を効率的に実施することが必要とされている<sup>1)</sup>。この様な中、現状の構造物を少ないリソースで効率的にメンテナンスし、安全の確保と構造物の長寿命化を図っていくことが必要であり、確実に効率的なメンテナンス手法の研究が必要とされている<sup>2)</sup>。

一方、黒須ほか<sup>3)</sup>および清水ほか<sup>4)</sup>は、舗装内部の損

傷の他、道路トンネルの覆工コンクリートの浮き・はく離箇所の検査に赤外線熱計測を適用し、その有効性を検証している。なお、赤外線熱計測とは、物体から放出される赤外線エネルギーを捕らえて熱画像化することにより、非破壊・非接触で広範囲に構造物内部の異常を検出することが可能な計測手法である<sup>5)</sup>。

そこで本研究では、地下鉄トンネル覆工コンクリート（以下、覆工コンクリート）における浮き・はく離の効率的な検出手法を開発することを目的として、赤外線サーモグラフィカメラ（以下、赤外線カメラ）による覆工コンクリートに対する赤外線熱計測の有効性について検討することとする。具体的には、トンネル壁面の温度変化を分析し、温度差から変状部の抽出が可能であることを確かめるために、実際に地下鉄トンネル内で建築限界より外側に機材を設置して固定位置からの赤外線カメラによる連続計測した方法（以下、固定計測）と、実用に近い形式として、広範囲を短時間に計測できるかを確認

キーワード：赤外線熱計測、赤外線サーモグラフィカメラ、トンネル覆工コンクリート、非破壊検査、はく離

<sup>1</sup>正会員 東京地下鉄株式会社 Tokyo Metro Co., Ltd. (E-mail: kouichi.kawakami@tokyometro.jp)

<sup>2</sup>正会員 東京地下鉄株式会社 Tokyo Metro Co., Ltd.

<sup>3</sup>正会員 東京地下鉄株式会社 Tokyo Metro Co., Ltd.

<sup>4</sup>正会員 株式会社パスコ PASCO Corporation

するためにトロ台車（線路上を移動する簡易な台車）に計測装置を搭載し移動しながら計測する方法（以下、移動計測）を行い、覆工コンクリートの浮き・はく離の検出を行い、その有効性を検討する。本稿は、第2章で研究概要について説明し、第3章で覆工コンクリートに発生した浮き・はく離に対して固定計測での赤外線熱計測が有効であることを確認する。次に、第4章で広範囲な移動計測を行い、浮き・はく離の発生箇所をスクリーニングした結果を分析し、第5章で全体をまとめている。

## 2. 研究概要

本研究では、地下鉄トンネルの覆工コンクリートにおける浮き・はく離の効率的な検出手法を開発することを目的として、非破壊・非接触の調査手法である赤外線カメラによる覆工コンクリートに対する赤外線熱計測の有効性について以下の内容で検討することとする。

### (1) 実施概要

本研究の実施フローを図-1 に示す。本研究では、2013 年度から 2014 年度の 2 年に渡って赤外線熱計測の有効性を確認してきた。

まず、2013 年度では、既知の変状部を打音調査によって確認した後に固定計測を行い、その計測結果から覆工コンクリートの変状部と健全部の温度変化などを分析し、赤外線熱計測の有効性を検討する。

次に、2014年度では、固定計測によって得られた知見に基づいて、別の区間において移動計測を実施し、未知の変状部の検出を行うこととする。この結果に対して実際の変状部の位置を比較し検出精度を確認すると共に分析を行い、その有効性を検証することとする。

### (2) 計測方法と使用機材

赤外線熱計測は、自然の温度分布による差を利用するパッシブ法と物質の表面を強制的に加熱または冷却するアクティブ法があるが、本研究では効率性を重視するためパッシブ法を用いることとした。なお、パッシブ法による赤外線熱計測における既往研究として、舗装内部の損傷の他、道路トンネルの覆工コンクリートの浮き・はく離箇所の検査に活用されている事例が報告されている<sup>3)4)</sup>。

赤外線カメラは、一般的に約3～5 $\mu$ mの波長を使用する量子型と、約8～14 $\mu$ mの波長を使用する熱型とに分類される。地下鉄トンネル内では一日の気温変化が少ないため、微小な温度変化を捉えなければならない<sup>5)</sup>。このため、本研究においては高感度で応答速度の速い量子型を使用することとした（表-1）。

## 3. 固定計測

地下鉄トンネルにおいて、変状部と健全部の温度変化を把握する目的として、変状部と健全部を含む範囲の赤外線熱計測を実施した。

### (1) 計測概要

赤外線熱計測は、変状部を含む覆工コンクリートに対し赤外線カメラを固定位置に設置し、計測開始時刻から24時間、30秒間隔、4時期（2013年9月、11月、2014年1月、7月）で計測を実施した。なお、計測準備作業を含め作業開始時間は1:00からであったため、状況により計測開始時間が2時からのもや3時からものが混在する。対象箇所は箱型トンネルの3区間（区間A, B, C）であり、事前に打音調査を行って、21箇所の変状を検出している（表-2）。

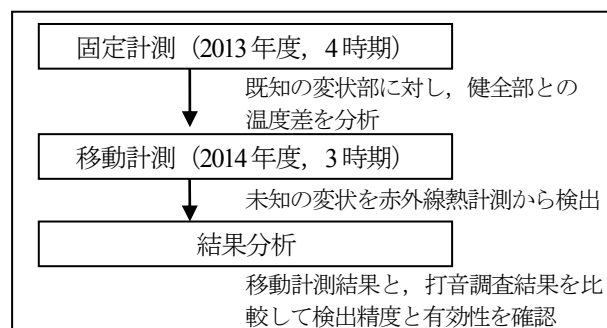


図-1 研究の実施フロー

表-1 赤外線カメラの仕様

| 項 目              | 仕 様              |
|------------------|------------------|
| 電子シャッター速度        | 9 $\mu$ S～       |
| フレーム速度           | 最高 125Hz（可変）     |
| 画素数              | 横 640×縦 512      |
| 視野角（標準 25mm レンズ） | 横 35.5° ×縦 28.7° |
| 解像度（標準 25mm レンズ） | 直交 10m で 1cm     |
| 測定波長             | 3.0～5.0 $\mu$ m  |
| 測定温度範囲           | -10℃～+350℃       |
| 最小検出温度           | 0.018℃以下(@30℃)   |
| 動作温度範囲           | -40℃～+55℃        |
| 重量               | 4.5kg            |

表-2 変状（浮き・はく離）の計測場所・部位・部材・位置（高さ）による分類

| 計測場所 | 部位・部材  | 位置（高さ） | 変状数 |
|------|--------|--------|-----|
| 区間 A | 側壁     | 高      | 4   |
|      |        | 低      | 2   |
|      | 側壁かまち部 | 高      | 6   |
|      |        | 低      | 1   |
| 区間 B | 上床かまち部 | 高      | 1   |
|      | ハンチ    | 高      | 1   |
|      | 側壁     | 低      | 1   |
| 区間 C | 側壁     | 低      | 3   |
|      | 上床     | 高      | 2   |
| 計    |        |        | 21  |

なお、赤外線カメラの他に環境状況を把握するために、温湿度計および風速計を設置して計測作業を実施している（図-2）。

## (2) 計測結果と考察

本稿では、測定データを解析するにあたり、打音調査によって確認された変状範囲の中心部分を変状部の温度とし、変状部の外側かつ近傍にあり、同一部材箇所を健全部の温度と定義した（図-3）。

図-4 は変状部と健全部に温度差が見られた典型例として区間 B・側壁の位置の 9 月 26～27 日、変状部（点線）、その近傍の健全部①（太実線）および健全部①に近い健全部②（細実線）の温度変化を示すグラフである。この図より健全部①と健全部②とはほぼ同一の温度変化であることがわかる。一方、変状部と健全部①を比較すると、1:00～4:00 の間は一定間隔で温度差があることがわかる。これらの傾向は、局部的な条件があるところ（水漏れ部分が存在する箇所など）を除くと、時期により大小の差はあるものの、他の変状部と健全部とでもほぼ同様に見受けられた（観測箇所にある 21 箇所の変状中 15 箇所、約 70%）。このことから変状部と健全部では 1:00～4:00 の間でほぼ一定の温度差があることが示唆される。よって、覆工コンクリートの温度を測り、温度の変化部を捉えることにより、変状部と健全部を区別することが可能になることが確認できた。

## 4. 移動計測

地下鉄内での軌道内に立ち入る現地計測作業の実施は、これまで述べてきた通り 1:00～4:00 に限定されている。このため、本研究の移動計測においても、実作業を想定した時間帯で移動計測を実施している。解析作業は、まず解析方針を決定し、変状部の検出を行い、計測結果の整理を行った。次に、解析結果の分析を実施している。

### (1) 計測概要

移動計測には、手押しのトロ台車に赤外線カメラ2台を搭載した計測システムを使用した（図-5）。赤外線カメラを2台使用した理由は、限られた時間内に効率的な作業の実施が求められているためである。また、この赤外線計測システムは、距離計測装置を備えているため、進行方向1m毎に等距離間隔で計測できる特徴を持っている。なお、使用する赤外線カメラは、固定計測で使用した機器と同じものを使用している。

今回実施した移動計測区間は、計測対象としてシールドトンネルのコンクリート製中子型セグメントに浮き、はく離、漏水および遊離石灰等が発生している場所を選

定した。このような損傷が発生している場所を選定した理由は、赤外線熱計測が多様な条件下で浮き・はく離

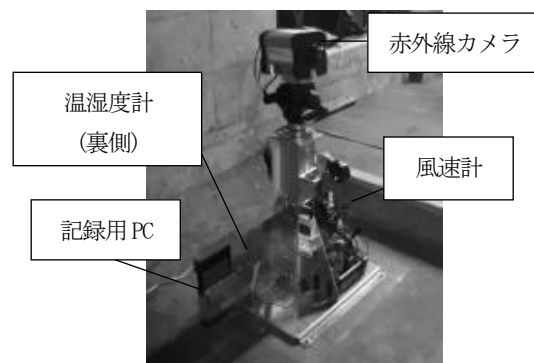


図-2 固定計測機器外観

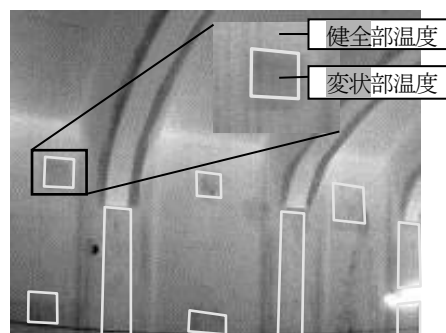


図-3 赤外線熱計測の画像サンプル  
(枠内が打音調査で確認した変状部)

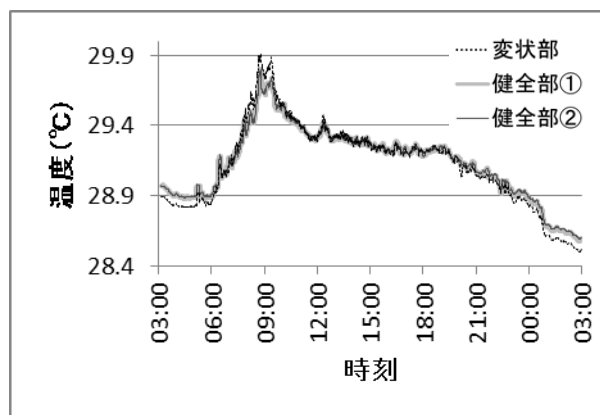


図-4 24時間における変状部と健全部の温度推移例

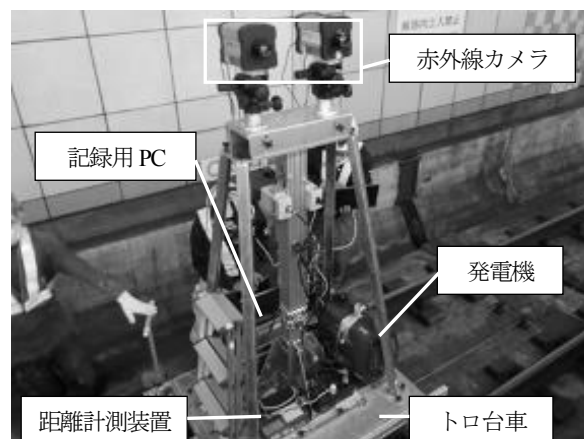


図-5 手押し式赤外線熱計測システムの外観

を検出可能かを確認するためである。

計測時期は季節の変動を考慮して、気温の最も高くなる時期、低くなる時期、およびその中間を想定して、3 時期（2014年8月、10月、2015年1月）での計測を実施した。計測範囲は、覆工コンクリートのはく落により列車の安全運行に直接影響を及ぼす可能性が高いと言われてい、軌道から高さ2m以上を対象としている。このような状況から計測アングルは計測対象を網羅し、上下左右のラップを考慮して8分割で計測することとした（図-6）。なお、この計測作業に先立ち、トンネル内の環境状況測定として、対象区間に覆工コンクリート表面温度とトンネル内気温を測定するための温度計を設置し、2014年7月～2015年2月の期間中に10分間隔で連続的に温度計測を実施している。

検出精度の検証を目的とした打音調査は、赤外線熱計測を実施した後に点検作業を実施し、浮き・はく離が発生している覆工コンクリートの位置と健全度を確認することとした。なお、ここでの健全度は、鉄道構造物等維持管理標準・同解説に示す打音調査判定基準を参考にしている<sup>7)</sup>。具体的には、変状部の状態をA判定（本研究では上述の判定基準であるAA、A1、A2を全てA判定とした）、B判定、C判定の3区分、健全部をS判定の1区分として整理し（表-3）、赤外線熱計測の検出精度との関係性を評価した。この判定は構造物への対応の優先度を現したものであり、変状の状態を客観的に現したものではないため、一部の箇所において、覆工コンクリートの厚さ計測または、はつり落としを行って損傷の深さや状態を整理し、赤外線熱計測結果と合わせて分析することとした。

## (2) 解析方針

移動計測より得られた赤外線熱計測の解析は、一般的な熱の移動を想定し、同様な傾向が発生しているかを確認している。ここで言う一般的な熱の移動とは、対象と

する物質が空気より冷たい場合に、空気により暖められるまたは、物質の方が温かい場合に冷却されるケースを想定しており、物質が温められる過程と冷却される過程で変状部と健全部の温度の上下が異なると考えられる（図-7）。このように、実際の計測がどのような環境条件で実施されているかを把握する必要がある。

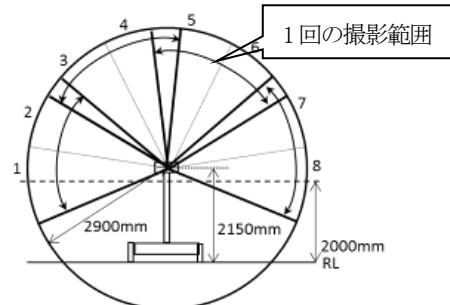
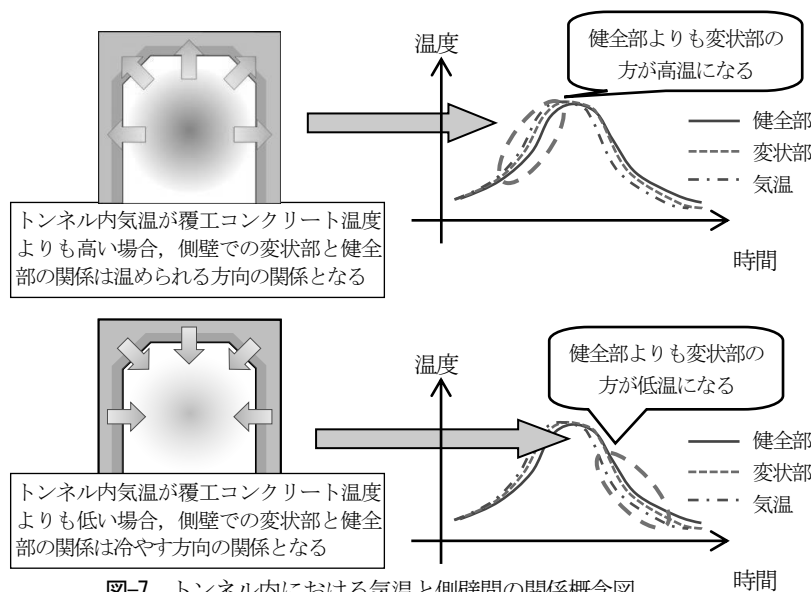


図-6 赤外線熱計測の範囲  
(コンクリート製中子形セグメント構造)

表-3 構造物の状態と標準的な健全度の判定区分<sup>7)</sup>

| 健全度 | 構造物の状態                                                              |
|-----|---------------------------------------------------------------------|
| A   | 運転保安、旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす、またはそのおそれのある変状等があるもの             |
|     | AA 運転保安、旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす変状等があり、緊急に措置を必要とするもの          |
|     | A1 進行している変状等があり、構造物の性能が低下しつつあるもの、または、大雨、出水、地震等により、構造物の性能を失うおそれのあるもの |
|     | A2 変状等があり、将来それが構造物の性能を低下させるおそれのあるもの                                 |
| B   | 将来、健全度Aになるおそれのある変状等があるもの                                            |
| C   | 軽微な変状等があるもの                                                         |
| S   | 健全なもの                                                               |



また、変状部を検出するにあたっては、変状部の最低の大きさを約5cm×5cm以上としている。これは今回撮影した赤外線熱画像の1ピクセルが覆工コンクリート表面の約3mmに相当するため、画面上で縦横17ピクセル以下の変状部を除外していることになる。これらを除外する理由としては、赤外線熱計測の精度検証が打音調査との関連性で評価する方針であるため、ハンマーを使ってある程度の間隔を空けて叩く打音調査の特性を考慮し、これ以上小さいサイズの変状部を検出すると、検出誤差が大きくなると判断したからである。更に、赤外線熱画像の解析で小さい損傷部を判断する場合は、その変状部が析出物や埃等の影響を多く含む可能性が高いと考えたため、小さい損傷については、連続している場合のみ検出することとした。ここで、変状部と判断した箇所の赤外線熱画像のサンプルを図-8に示す。なお、変状の抽出はオペレータにより行っており、枠内以外にも温度差が存在する場所はあるが、画面端と中央での赤外線吸収率の変化と思われる差、表面に析出物等の付着と思われる場所およびコンクリート以外の材質を除いて判断した。

### (3) 計測結果

解析を実施するに当たり、解析方針で想定している物質と空気の温度を考慮して実際の解析を行った。具体的には、変状部が高温変状となるか低温変状となるかを環境状況測定の結果で確認し、どの変状部を浮き・はく離とするかを決定した。

環境状況測定は、赤外線計測とは別の装置を使い、コンクリート表面温度と付近の気温を数か月間に渡って連続測定し、その記録を分析した。今回計測した3時期については、季節により覆工コンクリートおよびトンネル内気温の変動があるものの、3時期共に移動計測を実施した期間は、トンネル内気温が覆工コンクリート表面温度より低い状態であった(表-4)。また、作業中のトンネル内気温と覆工コンクリート表面温度の差の分布を確認した結果、ほとんどの時間帯でトンネル内気温の方が低い傾向に安定していることが確認できた(表-5)。1月のみ0℃を上回る場所があるが、1:00～4:00における10分間隔中1回のみ計測された温度差であり、影響は少ないと考えられた。以上の状況と図-7の温度推移のグラフから、変状部は健全部に比べて低温な状況になると推測した上で、変状部を検出した。

これらの条件を環境状況を認識した上で解析を実施した結果、3回の赤外線熱計測の解析結果には、実際の検出数にばらつきが発生していた(表-6)。具体的には、8月が362箇所、10月が389箇所、1月が297箇所であり、10月の検出数が一番多く、1月は一番少ない検出数となっていた。なお、赤外線熱計測による検出数で、打音調査と一致した箇所を確認したところ、8月が175箇所、

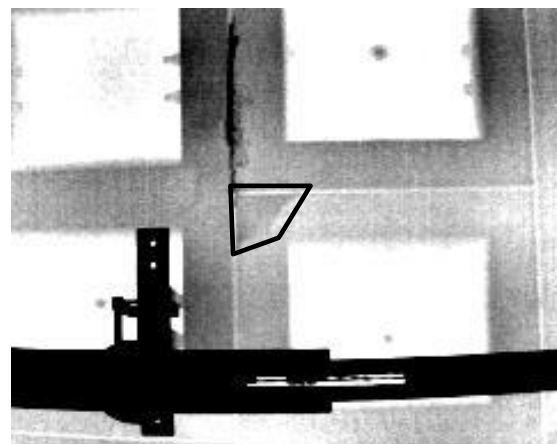


図-8 変状部(枠内)を含む赤外線熱画像例

表-4 各時期の検出に使用した変状部と健全部の温度差と、トンネル内気温と健全部温度の温度差

| 時期  | 温度差<br>(変状部温度<br>－健全部温度)  | 温度差(トンネル内<br>気温－健全部温度)           |
|-----|---------------------------|----------------------------------|
| 8月  | -0.05℃～-0.07℃<br>(変状部が低い) | 最大-0.38℃<br>最小-0.28℃<br>平均-0.33℃ |
| 10月 | -0.06℃～-0.39℃<br>(変状部が低い) | 最大-2.02℃<br>最小-1.74℃<br>平均-1.84℃ |
| 1月  | -0.05℃～-0.30℃<br>(変状部が低い) | 最大-0.90℃<br>最小-0.50℃<br>平均-0.74℃ |

表-5 移動測定中のトンネル内気温と表面温度の温度差の発生割合(1:00～4:00、10分毎の計測)

| 温度幅(℃)    | 8月(%) | 10月(%) | 1月(%) |
|-----------|-------|--------|-------|
| ～ 0.5     | 0.0   | 0.0    | 0.0   |
| 0.5 ～ 0   | 0.0   | 0.0    | 5.3   |
| 0 ～ -0.5  | 89.5  | 0.0    | 15.8  |
| -0.5 ～ -1 | 10.5  | 5.3    | 63.2  |
| -1 ～ -1.5 | 0.0   | 10.5   | 15.8  |
| -1.5 ～ -2 | 0.0   | 42.1   | 0.0   |
| -2 ～ -2.5 | 0.0   | 42.1   | 0.0   |
| -2.5 ～    | 0.0   | 0.0    | 0.0   |

表-6 赤外線熱計測による検出数

| 時期  | 項目     | 赤外線熱計測による検出数         |                |     |
|-----|--------|----------------------|----------------|-----|
|     |        | 変状部<br>(打音調査<br>と一致) | 変状部以外<br>(過検出) | 計   |
| 8月  | 検出数    | 175                  | 187            | 362 |
|     | 該当率(%) | 48.3                 | 51.7           |     |
| 10月 | 検出数    | 197                  | 192            | 389 |
|     | 該当率(%) | 50.6                 | 49.4           |     |
| 1月  | 検出数    | 190                  | 107            | 297 |
|     | 該当率(%) | 64.0                 | 36.0           |     |

10 月が 197 箇所、1 月が 190 箇所となっており、10 月の検出数が一番多かった。ちなみに、打音調査で検出した変状部については、246 箇所となっており、各月の検出数より少ない値となっていた。また、打音調査の検出箇所を赤外線検出できなかった未検出の数は、10 月が最も少なく 8 月が多かった(表-7)。

#### (4) 結果分析

赤外線熱計測の検出状況の結果分析にあたっては、打音調査の健全度に基づく検出率や温度差の状況进行分析した。次に、打音調査により変状部と判定した 246 箇所のうち 10 箇所について、浮き部の厚みと有意な関係性があるかを分析した。また、今回の赤外線熱計測の過検出要因を考察している。

##### a) 熱赤外線計測の検出率と変状部と健全部の温度差

打音調査の検出箇所を基準とし、移動計測で検出した変状部と一致した箇所数から検出率を算出した。その結果、8 月が 71.1%、10 月が 80.1%、1 月が 77.2%となっており、70～80%の変状部が赤外線熱計測で検出されていた状況となっていた(表-7)。更に、これらの検出した変状部と健全部の温度差をみてみると、トンネル内気温と健全部の温度差が最も大きかったのは 10 月の $-0.39^{\circ}\text{C}$ であり、次いで 1 月の $-0.30^{\circ}\text{C}$ 、最後に 8 月の $-0.07^{\circ}\text{C}$ の順になっていた。これは、トンネル内気温と覆工コンクリート(健全部)の温度差の大きい順である 10 月、1 月、8 月と一致しており、トンネル内気温と覆工コンクリート(健全部)の温度差が大きくなると変状部と健全部の温度差も同様に大きくなる傾向がみられた。

##### b) 打音調査の健全度に基づく分析

打音調査では、変状部の有無の他に健全度の判定区分を A 判定、B 判定、C 判定に分類していたが、調査の結果、A 判定の数が少なかったため、ここでは A 判定と B 判定の危険度が高いものを 1 つのグループ(以下 A、B 判定)とし、危険度の低いものを C 判定として表-8 に検出率を示した。

その結果、各時期の A、B 判定の変状部では 91.3%～100.0%と高い検出率であったのに対して、C 判定は 69.1%～78.5%であった。浮き・はく離がある場合には、図-9 のように、その背面に空気層が介在するため、健全部に比べて温まりやすく冷めやすい特徴を有している<sup>8)</sup>。今回対象とした箇所では A、B 判定されるような明確な変状箇所であれば内部空隙の影響により、変状部と健全部には明確な温度差が表れるのに対して、C 判定のような軽微な変状では、図-9 における浮き部の空隙規模が小さく、温度差が出にくい状況であったと推察される。

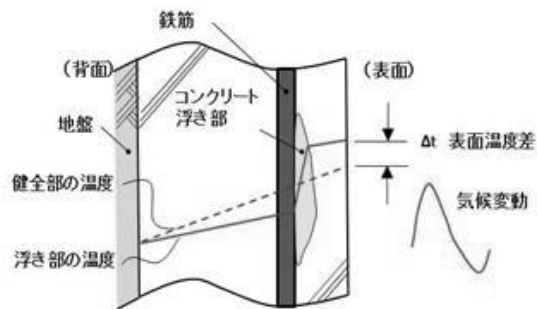


図-9 浮き部に温度差が発生する原理

表-7 打音調査と赤外線熱計測による結果

| 項 目            |        | 計    |
|----------------|--------|------|
| 打音調査           | 箇所数    | 246  |
| 赤外線熱計測<br>8 月  | 検出数    | 362  |
|                | 的中数    | 175  |
|                | 未検出    | 71   |
|                | 検出率(%) | 71.1 |
| 赤外線熱計測<br>10 月 | 検出数    | 389  |
|                | 的中数    | 197  |
|                | 未検出    | 49   |
|                | 検出率(%) | 80.1 |
| 赤外線熱計測<br>1 月  | 検出数    | 297  |
|                | 的中数    | 190  |
|                | 未検出    | 56   |
|                | 検出率(%) | 77.2 |

表-8 赤外線熱計測の検出率(括弧内は検出数/変状部数)

| 計測<br>時期 | A, B 判定の<br>検出率 | C 判定の<br>検出率   |
|----------|-----------------|----------------|
| 8 月      | 91.3%(21/23)    | 69.1%(154/223) |
| 10 月     | 95.7%(22/23)    | 78.5%(175/223) |
| 1 月      | 100.0%(23/23)   | 74.9%(167/223) |

表-9 浮き部における変状部と健全部の温度差

| No.                      | 健全度 | 変状部と健全部の温度差( $^{\circ}\text{C}$ ) |        |        |
|--------------------------|-----|-----------------------------------|--------|--------|
|                          |     | 8 月                               | 10 月   | 1 月    |
| 1                        | A   | -0.033                            | -0.113 | -0.069 |
| 2                        | B   | -0.012                            | -0.178 | -0.081 |
| 3                        | B   | -0.013                            | -0.103 | -0.05  |
| 4                        | B   | -0.013                            | -0.087 | -0.056 |
| 5                        | C   | -0.001                            | -0.069 | -0.009 |
| 6                        | C   | -0.002                            | -0.06  | -0.032 |
| 7                        | C   | -0.033                            | -0.088 | -0.074 |
| 8                        | C   | -0.005                            | -0.045 | -0.042 |
| 9                        | C   | 0.003                             | 0.024  | 0.027  |
| 10                       | C   | -0.002                            | -0.065 | -0.024 |
| A, B 判定 平均温度差            |     | -0.018                            | -0.121 | -0.064 |
| C 判定 平均温度差               |     | -0.007                            | -0.051 | -0.026 |
| 温度差の比<br>(A, B 判定)/C 判定) |     | 2.6                               | 2.4    | 2.5    |

また、10月で検出できなかったA、B判定のうち1箇所は、温度差は見られたが浮き・はく離ではなく表面の汚れや析出物などによるものと分類しており、変状と判定することができなかった。判定基準については、今後のデータの蓄積により精度を向上することが課題となる。

次に、健全度A、B判定、C判定のうち、変状部と判定した246箇所のうち10箇所について、変状部と健全部の温度差と健全度の関係性を分析してみた。温度は誤差の発生を考え、周囲9点の平均とした。その結果、打音調査による健全度がA、B判定とC判定の平均温度差を各月ごとに比較した結果、各時期における平均温度差は異なるものの、A、B判定はC判定の約2.5倍の温度差が発生している事が確認できた(表-9)。

#### c) 浮き部の厚みと赤外線熱計測による検出結果の関係性

赤外線熱計測による検出結果と、浮き部の厚みについての分析を実施した。まず打音調査で確認した箇所のうち、b)で抽出した10箇所の変状部に対して、非破壊の厚み計測を実施した。なお、浮き部の厚みは、コンクリート表面からコンクリートが不連続となるまでの厚さと定義した。この厚み計測箇所は、赤外線熱計測で変状部として検出できなかった2箇所を含んでいる。

厚み計測は各箇所3回計測を行い、その平均値をその場所の厚みとした。但し、No.1とNo.2の2箇所については、はく落の危険があったため、覆工コンクリートをはつり落として、浮き部までの厚みを実測している。また、健全度、漏水の有無、赤外線熱計測による判断の可否についても確認できるように整理した(表-10)。

厚み計測の結果、今回の損傷が発生していた箇所は、覆工コンクリート内部約30mm程度までの間で鉄筋の腐食が原因で浮き・はく離が発生している状況であった。この範囲においてA、B判定の浮きが検出できており、覆工コンクリート内部約30mm程度までの浮き・はく離については、実用化に向けての期待ができる高い確率で確認できたと言える。また、移動計測全体の検出率が高かった理由は、コンクリート製中子型セグメント区間では覆工コンクリート表面から鉄筋までのかぶり厚さが均一であったため、深さによる温度差の違いが影響しなかったためと考えられる。

健全度と浮き部厚みの計測結果については、損傷部が19～30mmと同じような深さで、かつその場所の浮きの量を計測できなかったため、明確な関連性は確認できなかった。このため、健全度と変状の状態の関連性については今後データ数を増やして検証していく必要がある。

なお、赤外線熱計測で検出できなかったNo.9とNo.10については、漏水や析出物も付着していない状況にも関わらず変状箇所として検出できなかったことから、

再度打音調査を実施した結果、密着度が高い(空隙が少なく、温度変化が生じにくい)C判定であると判断された。このため、密着度合いが高い場合には、温度差が現れないために検出が困難だった可能性が高いと考える。

#### d) 過検出要因

次に、過検出についての分析を行った。ここで言う過検出とは、覆工コンクリート内部が健全であっても何らかの原因で覆工コンクリートの表面温度が変化している場合に変状部として検出してしまった状況である。

現状の過検出の状況を確認し今後の検出精度を向上させるために、3時期全てで過検出していた52箇所について、詳細に分析することとした。なお、既存の資料や別途撮影した可視画像を参考に分析を実施した。その結果、析出物、漏水の合計が全体の約50%になっており、次いでひび割れや、はく落・はつり跡等の要因が多い状況であった(表-11)。

表-10 浮き部厚み計測

| No. | 健全度 | 漏水の有無 | 赤外線検出結果 | 浮き部厚み計測結果(平均, mm) |
|-----|-----|-------|---------|-------------------|
| 1   | A   | 有     | ○       | 20                |
| 2   | B   | 無     | ○       | 30                |
| 3   | B   | 無     | ○       | 23                |
| 4   | B   | 有     | ○       | 25                |
| 5   | C   | 有     | ○       | 19                |
| 6   | C   | 無     | ○       | 23                |
| 7   | C   | 有     | ○       | 23                |
| 8   | C   | 有     | ○       | 22                |
| 9   | C   | 無     | ×       | 20                |
| 10  | C   | 無     | ×       | 23                |

表-11 3時期共通の過検出要因と箇所数

| 過検出要因    | 検出箇所数 | 割合     |
|----------|-------|--------|
| 析出物      | 20    | 38.5%  |
| 漏水       | 11    | 21.2%  |
| ひび割れ     | 9     | 17.3%  |
| はく落・はつり跡 | 8     | 15.4%  |
| 錆汁       | 2     | 3.8%   |
| 補修材等     | 2     | 3.8%   |
| 合計       | 52    | 100.0% |



図-10 過検出の例(析出物)

今回の検証作業で一番多かった析出物の例を図-10 に示す。なお、析出物による過検出が多かった理由としては、析出物が覆工コンクリート表面に薄く付着している状態が多く、温度変化の影響を受けやすいと考えられる。また、赤外線熱計測の熱画像からは、浮き・はく離に近い温度差が発生していたため、過検出したと考える。

## 5. まとめ

本研究では、固定計測において赤外線熱計測により変状部と健全部の温度差による覆工コンクリートの浮き・はく離が認識できることを確認した。次に移動計測により、広範囲の覆工コンクリートにおいて赤外線熱計測の適用が可能であるかを分析した。その結果、以下の知見を得た。

箱型トンネルで実施した固定計測においては、変状部と健全部の間には温度差があることが示唆された。そのことから、覆工コンクリートの表面温度を赤外線カメラにより計測し、温度の変化部を捉えることにより、変状部と健全部を区別することが可能である。

シールドトンネルのコンクリート製中子型セグメント区間で実施した移動計測においては、トンネル内気温と健全部の温度差が大きいほど、変状部と健全部の温度差も大きくなる傾向が確認できている。健全度がA, B判定の変状は、検出率90%以上と高くなっており、C判定は69～78%に留まっている。なお、健全度がA, B判定における変状部と健全部の温度差においては、健全度がC判定の箇所と比較すると温度差が約2.5倍となっていた。更に、浮き部の厚み測定について確認した結果から、30mm程度までの浮き・はく離については実用化に向けての期待ができる高い確率で確認できた。

一方で、過検出の原因としては、析出物と漏水が約50%であり、次いでひび割れやはく落・はつり跡が多い状況であった。

このように本研究により、地下鉄トンネルの浮き・はく離を検出する手法として、赤外線熱計測の有効性を確

認することができた。このため、覆工コンクリート内部に発生している浮き・はく離をスクリーニングするという観点からすると、有効な手法になりうる可能性があると考えられる。今後は、より実務へ適用させていくためには、適切な計測時期の決定手法や、適用範囲を明確にすると共に、可視画像等の既存データを活用することにより、計測精度を向上させることが必要になると考える。

**謝辞：**本研究にあたっては、株式会社メトロレールファシリティーズの小松正典氏、篠原秀明氏に多大なるご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 日下義政，黒須秀明，前田近邦，小西真治，川上幸一，沢田秀樹：赤外線熱計測による地下鉄トンネル覆工コンクリートの浮き・はく離検出，土木学会第 69 回年次学術講演会概要集，2014.
- 2) 小西真治，構造物のメンテナンス，第 20 回鉄道総研講演会，2007.
- 3) 黒須秀明，内間満明，前田近邦，新井正典，塚田芳則，清水俊吾：赤外線熱計測によるトンネル覆工コンクリートの損傷検出 1－高速走行計測，土木学会第 67 回年次学術講演会，2012.
- 4) 清水俊吾，新井正典，塚田芳則，内間満明，黒須秀明，前田近邦：赤外線熱計測によるトンネル覆工コンクリートの損傷検出 2－詳細点検との比較検証，土木学会第 67 回年次学術講演会概要集，2012.
- 5) 本村均，吉田敦，菅野安男，藤野陽三：赤外線画像解析法を用いたコンクリート構造物の浮き・剥離の検出，土木学会第 56 回年次学術講演会，2001.
- 6) 斎藤寛之：地下鉄トンネル内温度の予測と検証，鉄道総研月例発表会，2013.
- 7) 鉄道総合研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，p16，丸善株式会社，2007.
- 8) 川上幸一，小西真治，久保昌史，中山聡子：現場での赤外線熱計測による地下鉄覆工コンクリートの浮き検出の可能性，第 20 回地下空間シンポジウム，2014.