

赤外線計測による地下鉄トンネルの覆工コンクリートの浮き・はく離検出方法の研究

川上 幸一¹・小西 真治²・岩本 佑太³
日下 義政⁴・黒須 秀明⁵

¹正会員 東京地下鉄(株) 鉄道本部 工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)
E-mail:koui.kawakami@tokyometro.jp

²正会員 博 (工) 東京地下鉄(株) 鉄道本部 工務部 (同上)
E-mail:s.konishi.r4r@tokyometro.jp

³東京地下鉄(株) 鉄道本部 工務部 (同上)
E-mail:y.iwamoto,m6m@tokyometro.jp

⁴正会員 株式会社パスコ 研究開発本部 (〒227-0062 神奈川県横浜市青葉区青葉台2-6-17)
E-mail:yaoksh5672@pasco.co.jp

⁵正会員 株式会社パスコ (同上)
E-mail:huisdo8458@pasco.co.jp

地下鉄トンネル維持管理の主要な課題の一つははく落である。しかし、この前兆となる浮きはコンクリート表面のひび割れをを伴わない空洞であり、目視検査のみでは判断できない現象である。そこで、この現象を非破壊・非接触で効率的に抽出できる検査方式の確立を目的として、赤外線サーモグラフィによる調査について研究した。具体的には、打音調査で抽出した浮き・はく離箇所について赤外線計測を実施し、これら変状部と周辺健全部との表面温度の相違について分析を行った。また、計測精度を左右すると考えられる地下鉄トンネルの温度環境条件を詳細に調査・分析した。これらの結果から赤外線計測の有効性を確認し、浮き・剥離箇所の検出を確実にできる季節等の条件を検討した。本稿では、これら研究の内容について述べる。

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、1927年に開業されてから87年が経過している路線もあり、これまで利用者の安全、安心を確保しながら長期間の営業が続けられてきた。地下鉄トンネルの維持管理は、定期的な検査（2年毎の通常全般検査、20年毎の特別全般検査等）で問題となる箇所を抽出・記録し、その箇所の詳細な検査（個別検査）で補修・補強の必要性を判断し、補修・補強を行うことで進められてきた。通常全般検査は、徒歩による目視点検で実施されている。また、特別全般検査は、健全度の判定精度を高めるため、足場などを用いた近接での目視点検が実施されている。

このような中、現在、トンネルの老朽化により発生している課題としては、漏水、ひび割れおよび露出鉄筋の腐食等の他に、コンクリートのはく離・はく落が報告されている¹⁾。なお、コンクリートのはく落については、重大な事故につながる恐れがあるため、はく落に至る前の段階において、浮き・はく離の状態を正確に検知する技術が求められている。特に、浮きはコンクリート表面のひび割れをを伴わない空洞であるため、目視のみでは判断できない現象である。このため、通常全般検査・特別全般検査共に、必要に応じて打音調査を併用して行われる。しかし、全面打音している訳ではなく、過去のデータと検査者の判断で必要と思われる箇所を打音しているため、必ずしもすべての浮きを抽出できているとは言

えなく、さらなる調査方法の検討が求められている。

また、近接目視や打音調査では、高所作業車両や仮設足場を使用して実施することから、通常の列車が運転する時間で作業を実施することが困難な状況であり、終電から始発までの夜間（1:00～4:00）の限られた時間帯において、効率的な点検をする手法が求められている。

本稿では、トンネル覆工コンクリートの変状検出を非破壊・非接触で効率的に実施する新しい検査方式を確立することを目的として、赤外線サーモグラフィによる調査の地下鉄トンネルへの適応について研究した内容について述べる。研究では、打音調査に基づき抽出した構造物の浮き・はく離箇所（以後、変状部とする）について赤外線計測を実施し、変状部と周辺健全部（以後、健全部とする）との表面温度の相違について分析を行った。また、計測精度を左右すると考えられる地下鉄トンネルの温度環境条件を詳細に調査・分析した。これらの結果から赤外線計測の有効性を確認した。また、浮き・剥離箇所の検出を確実にできる季節などの条件を検討した。

2. 検討概要

(1) 検討フロー

本研究では、図-1のフローに示す手順で検討を進めた。まず、打音調査により赤外線サーモグラフィ計測を予定している範囲について変状部を特定した。次に、3時期（平成25年度の9月、11月、1月）で、定点からの赤外線計測を実施した。最後に打音調査結果から得られた変状部と健全部について、赤外線計測データに基づき表面温度の相違について分析を実施し、赤外線計測の可能性やその条件を考察した。

(2) 検討対象箇所

地下鉄トンネルは構造や躯体の形状、施工方法（開削工法、シールド工法）、開業時期といった条件が路線や場所により異なっている。本研究では、より多くの種類の条件における変状を計測できるように、特徴が異なる3つの区間を選定し、各区間2箇所、合計6箇所の側壁もしくは上床（天井）を調査箇所とした。選定した区間の特徴を表-1に示す。

(3) 赤外線サーモグラフィの仕様

赤外線サーモグラフィカメラ（以下、赤外線カメラ）は、計測対象の表面から放射される赤外線放射エネルギーを検出することで対象物の温度を画像として視覚化するものである。一般的には、約 $3\sim 5\mu\text{m}$ の波長を使用する量子型と、約 $8\sim 14\mu\text{m}$ の波長を使用する熱型とに分類される²⁾。

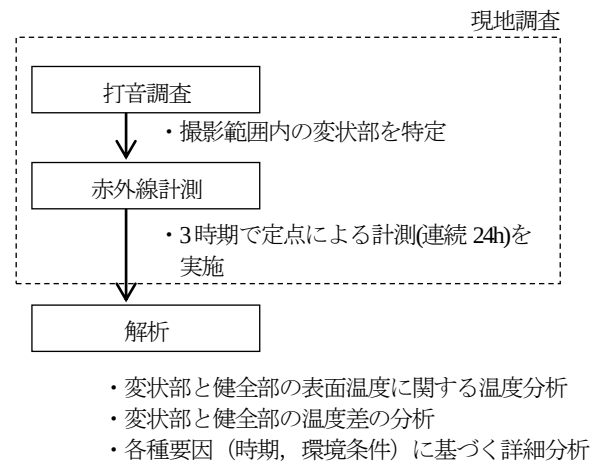


図-1 検討フロー

表-1 各工区の特徴

区間名	年代	位置情報	工法
区間A	古い (開業から約85年経過)	浅い (地表から8m)	開削 トンネル
区間B	やや古い (開業から約40年経過)	堀の直下 (水面から8m)	開削 トンネル
区間C	比較的新しい (開業から約25年経)	深い (地表から9m)	開削 トンネル

表-2 赤外線サーモグラフィカメラの仕様

電子シャッター速度	$9\mu\text{m}$ ～
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	$3.0\sim 5.0\mu\text{m}$ または $1.5\sim 5.0\mu\text{m}$
測定温度範囲	$-10^{\circ}\text{C}\sim +350^{\circ}\text{C}$
最小検出温度	0.018°C
動作温度範囲	$-40^{\circ}\text{C}\sim +55^{\circ}\text{C}$
重量	4.5kg

赤外線カメラはコンクリート構造物の非破壊試験の手法として注目されており³⁾、道路トンネル等では車両に赤外線カメラを搭載し、走行しながら覆工面の変状を検出する方法⁴⁾への適用も進みつつある。しかし、一日の気温変化が期待できる地上の構造物⁵⁾とは異なり地下鉄トンネル内では一日の気温変化も少ないと報告されている⁶⁾。そのため、微小な温度変化を捉えなければならないことが想定された。このため、本研究においては感度の波長選択性があり、応答速度の速い⁷⁾ ⁸⁾ 量子型を使用することとした。詳細な仕様を表-2に示す。

3. 現地調査

(1) 打音調査

赤外線計測を実施する前に、各区間で打音調査を実施

した。その際の状況を図-2に示す。打音調査は赤外線カメラの計測範囲全体に対して実施しており、健全度評価として、鉄道構造物等維持管理標準・同解説に示す基準⁹⁾を参考にして、構造物の判定を表-3に示すような、変状のA, B, Cの3区分と、健全部を区別して行った。同時に、変状の位置、形状、寸法についても記録を行った。また、打音調査時には、赤外線計測データ内で変状部と健全部の範囲が分かるように、変状範囲をチョーキングした現場写真を取得することとした。



図-2 打音調査の実施状況

(2) 赤外線計測

赤外線計測は、打音調査を実施した3区間、各2箇所、6箇所について実施した。なお、計測対象は側壁もしくは上床とした。計測にもっとも適した時間帯や季節を検討するため、30秒毎の赤外線データを24時間連続して計測し1日の表面温度の変化を捉える計測を、3時期（9月、11月、1月）で実施した。

また、赤外線計測装置を列車が通過する近くに設置することから、建築限界に影響のない場所に専用の架台を設置し、アンカーで機材を固定した上で定点からの計測を実施した。なお、計測時の環境条件を整理するために、赤外線計測に同期させて気温、湿度、風速も測定した。計測機器全体の外観を図-3に示す。

表-3 構造物の状態と標準的な健全度の判定区分⁹⁾

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

4. 分析結果

(1) 計測データの特徴

赤外線計測で得られたデータから、変状部と健全部の温度変化を確認した。変状部は打音調査によって確認された変状範囲の中心のコンクリート表面温度を変状部温度とした。健全部は変状部の外側かつ近傍にあり、同一の部材で温度が安定している箇所のコンクリート表面温度を健全部温度とした（図-4）。なお、計測した6箇所での変状部は全部で21個あり、表-4のような内訳となっている。

変状部と健全部の温度差を確認した結果、時期や時間帯に応じて相違はあるが、それぞれの場所において温度差が確認された。代表的な例として、図-5、図-6、図-7に区間Aの側壁での温度推移を示す。1日での変化は、昼間は温度が高く夜間に温度が下がっている。これは、昼間は電車や駅営業による発熱によりトンネルが暖められ、終電から始発まではこの熱の供給がないため温度が下がるものと考えられる。9月では全体的に変状部の方が健全部よりも0.2℃程度高いが、11月、1月では、2:00～14:00にかけて健全部よりも変状部の方が最大0.5℃低く、明確な差が見られる。



図-3 計測機器外観

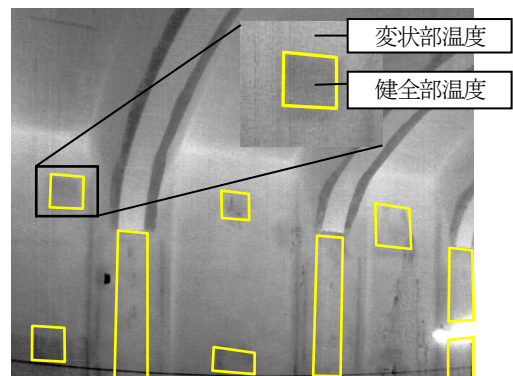


図-4 赤外線計測画像の例

(2) 変状部と健全部の温度差

次に、変状部と健全部の温度差を変状検出の指標として検討するため、個々の変状箇所についての温度差を整理した。なお、用いる変状部と健全部の温度差は、比較を容易にするため、変状部温度から健全部温度を引いた値の絶対値を用いた。まず、全時期、全箇所の 24 時間における温度差の平均を取ったところ、9 月が 0.13°C 、11 月が 0.07°C 、1 月が 0.1°C となっており、全体の温度差の平均は 0.1°C であった。

実際の運用を想定した場合、終電から始発までの時間帯でしか計測することが出来ないため、今回の分析においては、1:00～4:00 のデータを分析の対象とした。表-5 に各箇所の 1:00～4:00 の間の温度差の平均を示す。箇所、時期により 0.03°C ～ 0.42°C と値にバラツキがみられた。浮き、はく離と判断するための閾値は、小さくすれば抽出できる可能性が上がるが、逆に、浮きやはく離でない部分も誤認識する率も上がる。そこで、今回は、全時期、全箇所の温度差の平均である 0.1°C を閾値と設定し、変状の検出を試みた。その結果、閾値よりも温度差が大きい箇所は 9 月で 71.4% (15/21 箇所)、11 月で 42.9% (9/21 箇所)、1 月で 52.4% (11/21 箇所) となっており、時期による検出可能と判定される割合に差がみられた。但し、9 月の側壁では 90.0% (9/10 箇所) の検出率であるなど、時期や部位・部材などの条件を限定することで、高い検出率を有している。

次に、変状検出について詳しく見てみると、1 箇所でも 3 時期とも閾値に届いていないものもある。閾値を超えない時期が多い箇所は、側壁かまち部、ハンチ、上床となっている。

今後、変状部と健全部の温度差を検出指標とするためには、これらの箇所においても変状部が検出できる必要がある。特に、ハンチ、上床は、トンネル覆工コンクリ

表-4 変状の計測場所・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
	上床 かまち部	高	1
区間 B	ハンチ	高	1
	側壁	低	1
区間 C	側壁	低	3
	上床	高	2
計			21

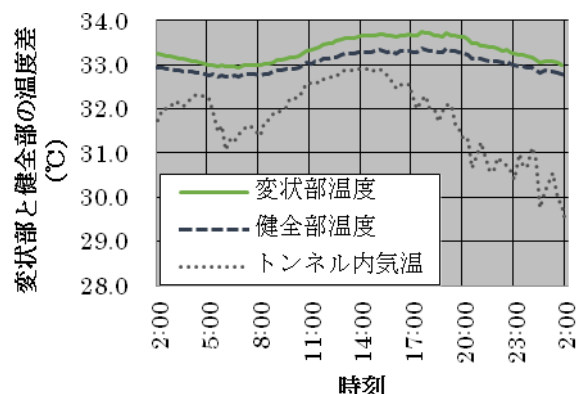


図-5 区間 A の側壁での温度推移のグラフ (9 月)

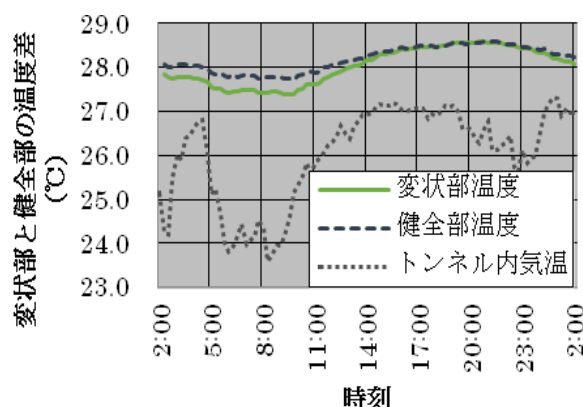


図-6 区間 A の側壁での温度推移のグラフ (11 月)

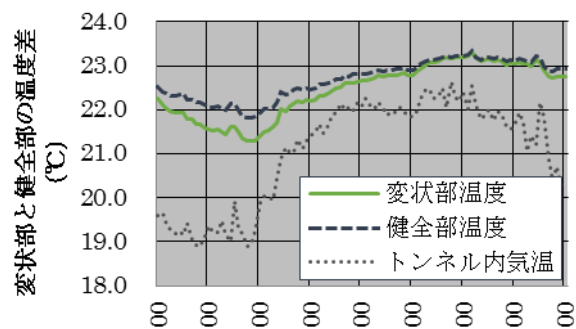


図-7 区間 A の側壁での温度推移のグラフ (1 月)

ートの上に位置しており、今後の運用を考えると、これらの箇所で変状検出を可能にすることが重要となる。そこで、これらの箇所について詳細に分析を行った。なお、側壁かまちについては、かぶりの薄いコンクリート背面に鋼材が存在しているため温度差が出にくいと考えられる。

(3) ハンチと上床についての時期に基づく分析

本項では、変状部と健全部の温度差が低い傾向を示したハンチ(図-8)と上床(図-9)に着目し、3 時期の温度差の傾向をそれぞれ分析した。図-10 はハンチでの、変状部と健全部の温度差とトンネル内気温（以後、気温とする）と健全部の温度差の関係を示した図である。気温と健全部の温度差の値が正の場合、気温がトンネル覆工コ

ンクリートよりも温度が高い状態であり、値が負の場合、気温が覆工コンクリート表面よりも温度が低い状態となる。各時期、1日の変状部と健全部の温度差による変化は小さいものの、全体的な温度差が時期によって変化していることが確認できる。また、気温と健全部の差が9月で $-0.5\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 、11月で $0\sim -1^{\circ}\text{C}$ 、1月で $-1\sim -1.5^{\circ}\text{C}$ と徐々に気温と覆工コンクリート表面の温度の差が増加している。更に、変状部と健全部の温度差は、9月で 0.02°C 、11月で -0.05°C 、1月で -0.1°C となり、同様に温度差が増加する傾向を示している。

次に、上床についての結果を図-11に示す。ハンチ部と同様に、1日の変状部と健全部の温度差の変化は小さいものの、時期により全体的な温度差が変化している。9月では、気温と健全部の温度差が -0.8°C に対して、変状部と健全部の温度差が $-0.01^{\circ}\text{C}\sim 0.01^{\circ}\text{C}$ 程度であった。なお、1月の気温と健全部の温度差が 1.5°C に対して、変状部と健全部の温度差が 0.19°C 程度であった。

この結果をみると、時期的に、気温が覆工コンクリート表面よりも温度が高い場合（気温と健全部の温度差の値が正）、変状部の温度は健全部の温度よりも高い傾向を有し、気温が覆工コンクリート表面よりも温度が低い場合（気温と健全部の温度差の値が負）、変状部の温度は健全部の温度よりも低い傾向を有していた。

表-5 変状箇所温度差の平均(1:00~4:00)

区間	位置	変状ランク	部位・部材	温度差 ($^{\circ}\text{C}$)		
				9月	11月	1月
A	高	B	側壁	0.26	0.18	0.29
	高	C	側壁	0.16	0.12	0.22
	高	B	側壁	0.20	0.10	0.25
	低	C	側壁	0.14	0.09	0.12
	低	B	側壁	0.16	0.05	0.24
	高	B	側壁かまち部	0.14	0.05	0.07
	高	B	側壁かまち部	0.22	0.05	0.12
	高	B	側壁かまち部	0.32	0.07	0.21
	低	B	側壁かまち部	0.15	0.10	0.09
	高	B	側壁かまち部	0.05	0.14	0.05
	高	A	側壁かまち部	0.03	0.04	0.08
	高	B	側壁かまち部	0.09	0.05	0.05
	高	B	側壁	0.25	0.22	0.18
	高	B	上床かまち部	0.17	0.12	0.09
B	高	C	ハンチ	0.03	0.08	0.09
	低	A	側壁	0.11	0.13	0.09
C	低	A	側壁	0.42	0.14	0.34
	低	B	側壁	0.35	0.09	0.13
	低	B	側壁	0.06	0.05	0.06
	高	A	上床	0.19	0.04	0.05
	高	C	上床	0.03	0.06	0.19

■: 変状部と健全部の温度差が 0.1°C 以上

これら9月~1月のデータから、秋より冬の方が浮き・はく離を検出しやすいことが分かる。

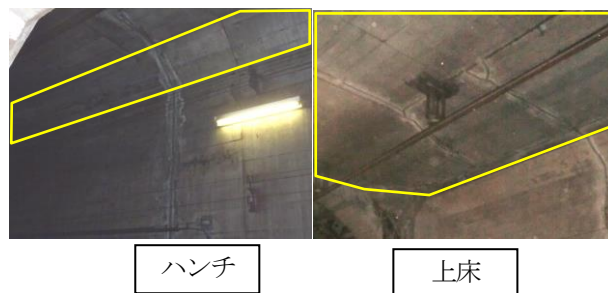


図-8 ハンチの例
(枠内がハンチ)

図-9 上床の例
(枠内が上床)

図-9 上床の例(枠内が上床)

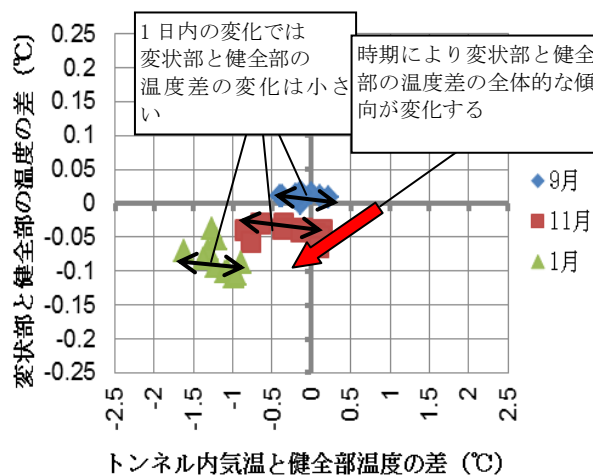


図-10 ハンチにおける変状部と健全部の温度差と、トンネル内気温と健全部の温度差の関係

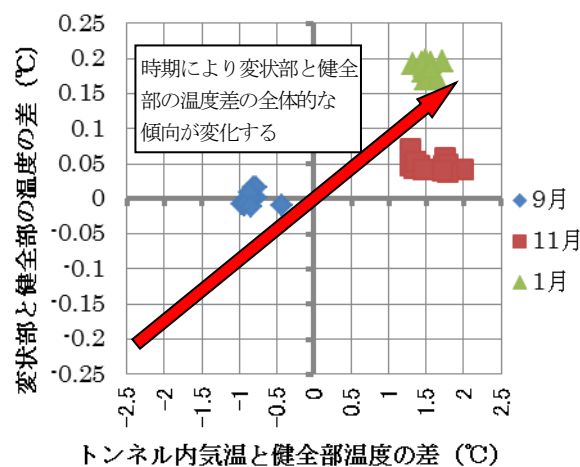


図-11 上床2における、変状部と健全部の温度差と、トンネル内気温と健全部の温度差の関係

5. まとめ

本研究では、トンネル覆工の浮き・はく離を検出することを目的に、定点からの計測による赤外線計測により、地下鉄トンネルの変状部と健全部に関する温度分析を行った。その結果、以下の知見を得た。

1. 地下鉄トンネル内の変状部と健全部の間には、時期により温度差が発生する。
2. 変状部と健全部の温度差で 0.1℃を閾値として検出可否を判定したところ、時期による検出可能と判定される割合に差がみられた。
3. 9月～1月のデータから、秋より冬の方が浮き・はく離を検出しやすことが分かった。

6. おわりに

本研究により、変状部と健全部の温度差に基づく変状検出が可能であることを示すことができた。今後は、通年のデータを収集・分析し、より精度の高い、変状検出が出来る時期やその他の条件を求めるとともに、地下鉄トンネル検査の実務への適応性を検討していく。

謝辞：本調査・計測にあたっては、東京地下鉄株式会社の加賀谷晃氏、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、沢田秀樹氏、株式会社パスコの前田近邦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) 岡嶋正樹ほか：地下構造物の劣化現象と対策について、地下空間シンポジウム論文・報告集、第 6 巻、2001.
- 2) 増谷光正：赤外線カメラ、精密工学会誌、Vol.56, No.11, 1990.
- 3) 魚本健人：コンクリート最新技術 (5) コンクリート構造物への非破壊試験の適用 (その 1)、コンクリート工学、Vol.32, No.12, 1994.12
- 4) 黒須秀明ほか、赤外線熱計測によるトンネル履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.
- 5) 土木コンクリート構造物のはく落防止用 赤外線サーモグラフィによる変状調査マニュアル、p14、財団法人土木研究センター、2005.
- 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) 木内雄二：特殊撮像技術概論、映像情報メディア学会誌、Vol.51, No.2, 1997.
- 8) 谷川邦廣：赤外線撮像技術の変遷、電気学会誌、Vol.119, No.6, 1999.
- 9) 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.

(2014.9.15 受付)

STUDY ON DETECTION METHOD FOR VOID NEAR SURFACE AND FLAKING IN THE SUBWAY TUNNEL LINING BY INFRARED THERMOMETRY

Kouichi KAWAKAMI, Shinji KONISHI, Yuuta IWAMOTO
Yoshimasa KUSAKA and Hideaki KUROSU

One of the most important problems on subway tunnels is spalling. A void near surface and flaking are ominous of the spalling. However, the void can't be found by observational inspection, because it occurs without any crack on the surface of tunnel lining. Therefore, we studied on a nondestructive detection method on the phenomenon with infrared thermometry.

At first, places with voids or flaking on subway tunnel lining were found by hammering tests. Next, distributions of temperature on the places were measured by an infrared camera. Then, a difference in temperature between sound and unsound part was analyzed. Moreover, conditions of temperature in subway tunnels, which affect accuracy of the measurement, were investigated and analyzed in detail.

From these results, we confirmed availability of the infrared thermometry for subway tunnel inspection and sorted conditions for accurate detection of voids and flaking in subway tunnel linings.

The paper describes contents of the research.