5. 赤外線サーモグラフィカメラを用いた地下鉄トンネルのモニタリング

Monitoring of subway tunnel by using infrared thermography camera

黒須 秀明*

Hideaki KUROSU

Abstract : Infrastructures constructed in Japan are estimated to age rapidly in the future. Hence, a method to efficiently inspect the infrastructures is needed. The purpose of this study is to verify that it is possible to detect the void near surface and flaking in the subway tunnel lining by the infrared thermography camera. At first, we acquire the data by infrared measurement system while moving. Next, we extract the void near surface and flaking by analyzing the infrared measurement. We have confirmed the efficacy of our proposed technique compared to conventional tapping sound investigation method. Furthermore, in the present study, we have been able to capture a very small temperature difference of even 0.05 degree centigrade.

1. はじめに

我が国のインフラ構造物の現状は、高度経済成長期に集中的に整備されたこともあり、今後、急速に老朽化することが見込まれている。また、従来どおりの維持管理・更新を実施すると仮定した場合、今後、維持管理・更新の費用が投資総額を上回る状況となることが予測されている。このため、今後のインフラ構造物の維持管理・更新をするためには、効率的かつ効果的なインフラ構造物の点検技術の開発が課題となっている。

この様な中、地下鉄トンネルにおいては、開業してから80年も経過しているトンネルが存在しており、トンネルの老朽化に伴い発生する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）の浮き・はく離といった現象が問題視されている（日下ほか, 2014）。この覆工コンクリートの浮き・はく離などを点検するために、現在、人手による目視点検やハンマー等を用いた打音調査が実施されている。しかし、こうした点検方法は、足場を伴う点検手法であることから点検時間に長時間を有するといった問題がある。

そこで本研究では、インフラ構造物のモニタリング技術として、赤外線サーモグラフィカメラ（以下、赤外線カメラ）による地下鉄トンネルにおける覆工コンクリートの浮き・はく離の検出の有効性について検討

している。具体的には、広範囲な計測対象を短時間に計測するために、トロ台車に赤外線カメラなどのセンサーを搭載して移動しながら計測を行い、その計測結果から覆工コンクリートの浮き・はく離の検出を行い、従来手法の打音調査との一致率を分析することでその有効性を確認している。

本稿は、第2章で赤外線カメラを用いた調査の概要を説明し、第3章で赤外線熱画像を用いて、浮き・はく離の発生箇所をスクリーニングした結果について分析し、第4章で全体をまとめている。

2. 赤外線カメラを用いた調査の概要

2.1 赤外線カメラによる計測技術

赤外線カメラは、計測対象物の表面から放射される赤外線放射エネルギーを検出し、エネルギー強度の分布から対象物の温度に換算した結果を熱画像として視覚化する技術である。本研究では、赤外線カメラによる熱画像を用いて、覆工コンクリートに発生する浮き・はく離といった変状部と周辺の健全部の温度差を算出し、その結果を視覚化することで、変状部のスクリーニング調査が可能であるか検討している。

なお、赤外線カメラを用いた計測は、パッシブ法とアクティブ方がある。パッシブ法は、物質が発する自然の赤外線放射エネルギーの変化のみで変状部を特定する。一方、アクティブ法は、物質を強制的に加熱または冷却することで変状部を特定する。本研究では、作業効率を考慮した結果、パッシブ法を用いることと

*株式会社バスコ

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 55, NO. 1, 2016

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活用されている事例が報告されている（黒須ほか，2012，清水ほか，2012）。

2.2 計測条件

今回の計測作業は、地下鉄のシールドトンネル区間におけるコンクリート製中子型セグメント（以下、中子型セグメント）の100m 区間を対象としている。なお、赤外線熱計測は、夜間の立ち入りが制限されている時間帯にトロ台車の上に赤外線カメラを2台設置して移動しながらの計測している（図1）。また、覆工コンクリートの計測範囲は、コンクリート片が実際にはく離した際に第三者被害に繋がる可能性を考慮した結果、レールレベル（RL）2m 以上の場所を計測対象とした。赤外線カメラの計測回数は、2台の赤外線カメラで対象範囲をカバーすることを考慮した結果、同一区間を2往復で合計8分割の計測を実施している（図2）。なお、解析作業の際に位置の特定を容易にするた

図1 赤外線熱計測システム

図2 赤外線カメラの計測アングル

めには、移動距離に応じて等距離間隔の計測ができることが望ましいと考えた結果、トロ台車に距離計測装置を設置して1m 間隔でデータ取得を行った。また、計測時期による違いを確認するために、2014年8月、10月、2015年1月の3時期で計測を実施している。

2.3 赤外線カメラの仕様

赤外線カメラは、一般的に約3～5 μm の波長領域に感度がある量子型と、約8～14 μm の波長領域に感度がある熱型とに分類される。量子型は高感度で応答速度が速い特徴を有していると共に、内部に冷却機能を有しているため、外部環境温度の変化に伴う一定時間でのキャリブレーション補正が無く安定的なデータを記録することができる。これらの特性を考慮した結果、移動計測に適していると判断できる量子型の赤外線カメラを使用することとした（表1）。

2.4 解析方法

赤外線カメラで取得した熱画像の解析は、覆工コンクリートの表面温度とトンネル内気温の温度差により発生する色の違いを人により判読を行った。変状部と健全部で温度差が発生する要因は、トンネル内気温が覆工コンクリートより高温または低温の際に、浮き・はく離が発生している変状部が周辺の健全部と比較して高温または低温となる現象を想定している。具体的には、覆工コンクリート内部に発生した浮き・はく離といった現象は、コンクリート内部に空気層を含む現象となることから健全部と熱伝導率が異なる。このため、覆工コンクリート表面が空気より冷たい場合においては、空気により暖められるまたは、覆工コンクリー

表1 赤外線サーモグラフィカメラの仕様

項目	仕様
電子シャッター速度	9 μs ～
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 μm
測定温度範囲	-10°C～+350°C
温度分解能	0.018°C
動作温度範囲	-40°C～+55°C
重量	4.5kg

図3 トンネル内気温と覆工面温度の関係概念図
(口絵カラー)

ト表面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状況が異なると考えている(図3)。

このように、実際の計測がどのような温度条件で実施されているかを把握してから解析作業を実施する必要があると考え、赤外線熱計測を実施している時間帯は、トンネル内気温と覆工コンクリートの温度を別途に計測した結果を参考にして解析作業を実施している。

2.5 解析結果

温度条件の計測結果より、今回計測した3時期全ての計測時間帯においては、覆工コンクリートの温度がトンネル内気温より高温となる状況で計測を実施していることが分かった。そこで、解析手法に基づくと変状部が健全部の温度に比べて低温となることを想定して変状部の抽出を実施している(図4)。

その結果、微小なものを含めて8月が362箇所、10月が389箇所、1月が297箇所の検出数であり、10月が一番多く、1月が一番少ない検出数となっていた。なお、その後の打音調査により変状として認識された箇所は、246箇所となっており、その一致率については、8月が71.1%、10月が80.1%、1月が77.2%となっていた(表2)。

図4 熱画像サンプル(枠内が変状部)

表2 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	検出数	362
8 月	的中数	175
	未検出	71
	検出率(%)	71.1
赤外線熱計測	検出数	389
10月	的中数	197
	未検出	49
	検出率(%)	80.1
赤外線熱計測	検出数	297
1 月	的中数	190
	未検出	56
	検出率(%)	77.2

3. 浮き・はく離のスクリーニング結果の分析

浮き・はく離の検出結果の分析については、別途に実施した打音調査の健全度(ランク評価)に基づく検出率を確認し、スクリーニング調査として適用の可能性があるかを評価している。次に、3時期での熱画像の分析により季節によって見え方が異なる状況の関係を分析している。

3.1 打音調査の健全度に基づく検出率の分析

赤外線熱計測により検出した浮きの精度を確認するために、計測範囲において調査員による打音調査を行った。打音調査により検出する浮きは、打音による濁音の程度によって3段階にランク分けした(表3)。

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(表4)。このため、今回の計

表3 打音調査による浮きの判定基準

判定	打音	状態
A	濁音が大きい	剥落のおそれがある
B	濁音が中程度	将来 A に進展のおそれ
C	濁音が小さい	剥落のおそれ無し

表4 赤外線熱計測の検出率（括弧内は検出数/変状部数）

計測時期	A, B 判定の検出率	C 判定の検出率
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)

測箇所においては、A, B 判定とされるような明確な変状箇所であれば内部空隙の影響が大きく、C 判定のような軽微な変状では、温度差が出にくい状況であったと推察される。

3.2 計測時期によって見え方が異なる変状の分析

今回の赤外線熱計測は、8 月、10 月、1 月の 3 時期で計測を実施している。各時期の計測作業中の覆工コンクリートと空気中の温度は、上述までの報告の通りトンネル内空気温度の方が低い傾向であった。具体的には、計測期間中の平均温度差は、8 月が -0.33 度、10 月が -1.84 度、1 月が -0.74 度となっており、10 月の温度差が一番大きくなっていることが確認できている。また、これらの結果と一部のデータの平均値を用いた分析であるが、3 時期で同一箇所の変状部と健全部の温度差に着目した結果、8 月が -0.05 度、10 月が -0.10 度、1 月が -0.07 度となっていた（図5）。

このような結果から、覆工コンクリートとトンネル内温度の温度差が大きくなる方が変状部と健全部の熱伝導に違いが発生するために、温度差が大きくなっていると推測している。また、図5の8月のデータは、変状部と健全部の温度差が 0.05 度となっていたが、赤外線カメラで取得した熱画像より変状箇所を目視できることを確認している。

8 月 (温度差 0.05 度) 10 月 (温度差 0.10 度) 1 月 (温度差 0.07 度)

図5 計測時期による熱画像の違い（枠内が変状部）

4. ま と め

本研究では、赤外線カメラを簡易的にトロ台車に設置した機材を基に移動計測を実施し、覆工コンクリートに発生するコンクリートの浮き・はく離の検出が可能であるかを分析した結果、以下の知見を得た。

打音調査の健全度が 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。また、計測時期による変状部の温度差は、トンネル内温度と壁面温度の差が大きい程、熱画像からの判読が容易であることが確認できた。

本研究においては、赤外線カメラを用いたパッシブ法の検査手法が、地下鉄トンネルの覆工コンクリートに発生している浮き・はく離を検出するための手段として有効であることが確認できた。一方で、本稿には詳細な記載をしていないが、赤外線カメラで過検出した要因についても突き止めている。このため、今後、実務へ適用を考慮すると、計測タイミング、適用範囲および検出可能な部位・部材を明確にしていく必要があると考える。また、熱画像の判読に合わせて、これまで蓄積している点検データや既存の可視画像等のデータを利活用することで、さらに計測精度を向上させるとともに、判読の自動化を視野に研究を進めていくが必要になると考える。

謝 辞

本研究の実施にあたり、貴重なご意見をくださった東京地下鉄株式会社の小西真治氏、川上幸一氏に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 日下義政, 黒須秀明, 前田近邦, 小西真治, 川上幸一, 沢田秀樹, 2014. 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.
- 黒須秀明, 内間満明, 前田近邦, 新井正典, 塚田芳則, 清水俊吾, 2012. 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回年次学術講演会概要集.
- 清水俊吾, 新井正典, 塚田芳則, 内間満明, 黒須秀明, 前田近邦, 2012. 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.