

地下鉄トンネル内の赤外線熱計測における 変状部の判定確度と浮き・はく離検出精度の関係性の研究

(株) パスコ 正会員 ○川島 千明
(株) パスコ 正会員 黒須 秀明
(株) パスコ 非会員 高松 学

東京地下鉄(株) 正会員 小西 真治
東京地下鉄(株) 正会員 川上 幸一
東京地下鉄(株) 正会員 村上 哲哉

1. はじめに

我が国の地下鉄トンネルの管理は、コンクリートはく落による事故を防止するため、2年ごとの通常全般検査と20年ごとの特別全般検査(以下、特全)が実施されている。通常全般検査では徒歩による目視検査と必要に応じた打音検査を実施し、特全では精度を高めるために仮設足場上での近接目視と打音検査を実施している。このような線路内に立ち入って作業を行う全般検査は、終電から始発までの1:00~4:00に作業時間が限定されており、作業の効率化が求められている。

上記の課題に対して、これまでに地下鉄トンネルで赤外線サーモグラフィカメラによる赤外線熱計測を実施し、赤外線熱画像上で壁面の温度差から浮き・はく離部(以下、変状部)を検出する手法を検討してきた¹⁾。

本論文では、地下鉄トンネルのボックストンネルですでに特全を実施した区間のうち、1040mを対象として、トロ台車上に赤外線熱計測システムを搭載し、移動計測を実施した。その結果から、変状部としての判定確度と浮き部の検出率の関係について知見を得たので報告する。

2. 赤外線熱計測概要

赤外線熱計測は平成27年10月、11月の2時期に実施した。作業の効率化を図るため、トロ台車に赤外線サーモグラフィカメラを2台設置し、移動しながら計測を実施した(図1)。計測対象範囲は、コンクリートはく落によって列車の安全運行に直接影響を与える可能性が高い、軌道面から2m以上の高さにある側壁部と上床部とした。このとき、計測対象範囲を網羅するために、赤外線サーモグラフィカメラの画角を考慮した結果、同一区間を2往復で合計8分割の計測を実施した(図2)。また、進行方向の計測間隔は、距離計を用いて等間隔で連続的に計測するように設定した。



図1. 赤外線熱計測システムの外観

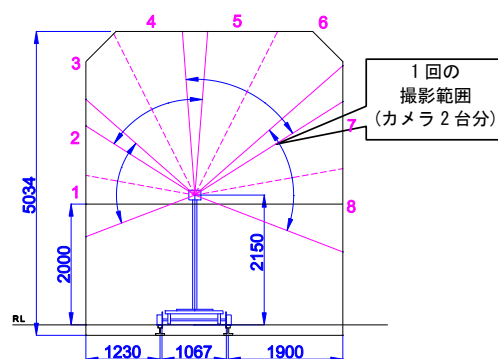


図2. 赤外線熱計測の計測範囲

3. 計測データの解析と検証箇所の選定

赤外線熱画像上で、変状部の温度が周囲の健全部と比較して高温もしくは低温として現れる条件は、コンクリート壁面温度とトンネル内気温の関係によって決定される²⁾。今回、計測した時間帯は、2時期共にトンネル内気温の方がコンクリート壁面温度より低い状態であったため、変状部は健全部と比較して低温となる。解析では、この温度差条件を基本とし、それ以外に変状部の位置、発生規模、損傷や補修跡などの表面状態といった抽出条件を加味し、変状部を抽出した。このとき、特全で見つかった浮き・はく離部はほぼ全数抽出できていた。

それ以外に抽出した浮き・はく離部について追加打音検査で確認するため、解析結果について、変状部の抽出条件を考慮して、浮き部である確度が高いと判断した53箇所と、浮き部の可能性があると判断した37箇所の計90箇所の変状部に選定した。これらの変状部

は、計測対象区間のうち、駅部の側壁にあたるエリアを除いた 18 エリア（区間長約 100m、側壁部と上床部分類）に 5 箇所ずつ配置されるよう選定した。

4. 打音検査による検証

赤外線熱計測結果がどの程度一致しているかを確認するため、選定箇所について打音検査を実施した。なお、今回の打音検査で、浮き部と判定した箇所は、3 ランクの判定基準で評価した（表 1）。

打音検査との比較結果（表 2）から、浮き部である確度が高いと判断した箇所を見ると、53 箇所中 39 箇所（73.8%）で浮きが確認された。この内、 $\beta 2$ 判定は 22 箇所、 $\beta 3$ 判定は 17 箇所であった。確度が高いと判断した箇所については高い割合で浮きが発生していた。

次に、浮き部の可能性があると判断した箇所を見ると、37 箇所中 12 箇所（33.4%）で浮きが発生していた。この内、 $\beta 2$ 判定は 6 箇所、 $\beta 3$ 判定は 6 箇所であった。浮き部の確度が高いと判断した箇所と比較して、検出率が低くなっていた。

浮き部の可能性があると判断した箇所を表面の損傷状態別に分類すると、析出物は 4 箇所中 3 箇所（75.0%）と検出率が高いのに対して、漏水跡は 6 箇所中 2 箇所（33.3%）、ひび割れは 6 箇所中 2 箇所（33.3%）、補修跡は 8 箇所中 2 箇所（25.0%）と検出率が低い。このことから、析出物を伴う浮きは変状部と健全部の温度差に注視するだけで比較的高い割合で判別できる可能性があるのに対して、漏水跡、ひび割れ、補修跡については、温度差以外の抽出条件に基づいて適切に判別しなければ過検出につながる可能性が高いと考えられる（表 3）。

5. おわりに

本研究の結果、赤外線熱計測によって特全で見つけられなかった浮き・はく離部を抽出することができることが分かった。また、浮き部の確度が高いと判断した箇所については、高い割合で実際に浮きが確認された。一方、浮き部の可能性のある箇所については、壁面状態によって過検出率が高くなるものがあった。これらの壁面状態の箇所については、今後、赤外線熱計測データを蓄積し、既存の検査資料等も踏まえて判断することで解析の精度の向上が見込めると考えられる。

本研究の実施にあたり（株）メトロレールファシリテーターズの皆様にご協力をいただいた。ここに感謝の意

を表す。

参考文献

- 1) 目下ら、移動赤外線熱計測による地下鉄トンネル内コンクリートの浮き・はく離検出、土木学会第 70 回年次学術講演会概要集、2015. 9
- 2) 川上ら、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、地下空間シンポジウム論文・報告集第 21 巻、2016. 1

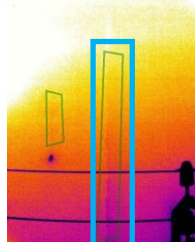
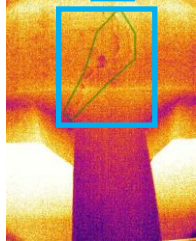
表 1. 打音検査による浮き部の判定基準

判定	状態
$\beta 1$	密着度合があり、列車運行・施設物等に支障する可能性が高いもの
$\beta 2$	密着度合があり、列車運行・施設物等に支障する可能性が低いもの
$\beta 3$	はく離・浮きがある、はく落跡

表 2. 打音検査との比較結果

選定基準	浮き部である確度が高いと判断した箇所	浮き部の可能性があると判断した箇所						計
		① 温度差変化	② 析出物	③ 漏水跡	④ ひび割れ	⑤ 補修跡	⑥ ハンチ部等	
選定箇所数	53	6	4	6	6	8	7	90
打音調査結果	浮きなし	14	3	1	4	4	6	7
	浮きあり	39	3	3	2	2	2	51
浮き部内訳	$\beta 1$	0	0	0	0	0	0	0
	$\beta 2$	22	1	3	1	0	1	28
	$\beta 3$	17	2	0	1	2	1	23
検出率		73.6%	50.0%	75.0%	33.3%	33.3%	25.0%	56.7%

表 3. 過検出箇所の例

壁面状態	可視画像	赤外線熱画像
漏水跡		
ひび割れ		
補修跡	