

### 赤外線熱計測によるトンネルコンクリートの浮き・はく離調査手法の検討

清水建設(株)		正会員	○久保昌史
東京地下鉄(株)	正会員	小西真治	正会員 川上幸一
(株)メトロレールファシリティズ		小松正典	沢田秀樹
(株)保全工学研究所		正会員	中山聡子

#### 1. はじめに

現在、赤外線熱計測によるコンクリートの浮き・はく離調査手法(以下、赤外線法)は、法面や建物調査においては採用される事例も多く、マニュアル<sup>1)</sup>等も整備されている。しかし、日射の影響をほとんど受けないトンネル内では温度変化が小さいことから、適用事例が比較的少ない。近年、赤外線サーモグラフィ(以下、赤外線カメラ)の性能が飛躍的に向上したため、温度変化が小さい箇所においても浮き・はく離を検出できる可能性が高くなってきている。今回、地下鉄営業線内において夜間の線路閉鎖時間に浮きの検出を行い、打音法や非破壊・微破壊試験との比較を行った。



写真-1 上床版撮影状況

#### 2. 概要

赤外線カメラにより測定対象を撮影し、画像のあおり補正、濃淡処理した赤外線熱画像から浮き・はく離を検出した。測定原理は赤外線パッシブ法による。これは、測定対象物の表面温度を強制的な加熱や冷却をせずに自然の状態での測定し、熱画像として表示することでその温度差から異常部の検出を行う手法である。赤外線熱画像は、温度分布を可視化しているため温度変化が小さい場合、実構造物面での変温部の位置特定が困難となる。よって、デジタルカメラを用いて可視画像も同画角にて同時に撮影する。ここで、浮きの定義は、従来の事例<sup>2)</sup>等から5×5cm以上の範囲でコンクリート表面温度が周囲より0.03~0.1℃以上の温度差が生じている箇所(可視画像から浮き以外と判断される変温部は除く)としている。

部4地点10箇所とした。調査期間は平成25年11月中の5日間であった。

調査は、赤外線熱画像および可視画像撮影に加え、打音調査を行った後に、非破壊・微破壊試験(電磁波レーダー試験、弾性波試験、内視鏡調査)を実施した。また、調査地点近傍に固定式小型温度計を設置し、調査期間中を含めて坑内気温、コンクリート表面温度を10分間隔で連続的に測定した。調査位置を図-1に示す。

今回の調査箇所は、以下の手順により選定した。

- ①打音調査が未実施な路線内の約2kmの範囲を選定
- ②全体の上床版およびハンチ部を赤外線カメラで撮影し(写真-1)、コンクリート表面の温度分布の傾向を把握
- ③坑口や換気口、駅舎からの距離等から特徴的な温度条件を示す13地点を選定し、側壁・天井の範囲の浮きを検出
- ④側壁部において浮きが見られる4地点を選定

#### 3. 現地調査

調査対象は、地下鉄営業線内のボックスカルバート側壁

#### 4. 調査結果

調査結果の概要を表-1に、赤外線熱画像の例を図-2に示

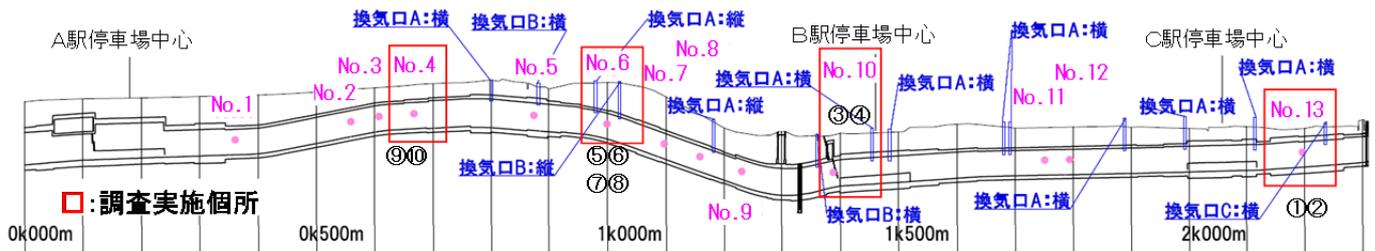
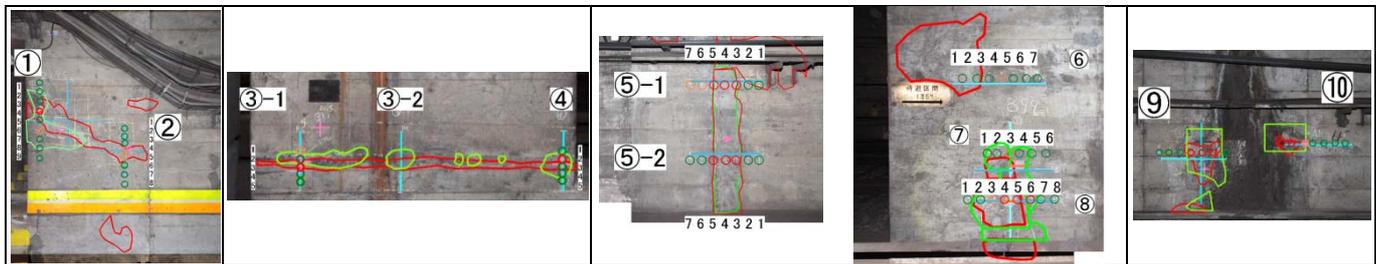


図-1 調査位置

キーワード 非破壊調査 トンネル 赤外線熱計測 パッシブ法 温度環境 打音検査  
 連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1 清水建設(株) TEL03-3561-3915

表-1 調査結果概要

地点No		No.13		No.10		No.6		No.4			
距離程(m)		2195		1388		899		666			
温度条件 (°C)	撮影範囲の温度分布	17.45~18.35		19.20~20.00		25.68~26.38		21.40~22.00		23.10~23.70	
	大気温とコンクリート表面温度差	0.59		0.34		0.89		0.32		0.26	
	浮き部と健全部温度差	0.09		0.08~0.10		0.1		0.12		0.04~0.05	
近接目視による撮影対象面の状況		目だつた変状は見られないが、コンクリート表面が全体的に荒れている。		水平方向に補修部分が見られ、補修部分に浮きが見られる。		⑤補修部に浮きが見られる ⑥⑦⑧目だつた変状は見られないが、コンクリート表面が全体的に荒れている。		浮きの周辺には剥落し、鉄筋が露出している部分が見られる			
試験番号		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
打音法との比較 ○:範囲一致、△:一部一致、×:浮きなし		△	×	○	○	○	×	△	△	○	○
内視鏡調査	損傷状況	顕著な豆板、深さ100mm以上	小さな空洞(2~4mm)が0~50mmに点在	空隙有り、深さ3~4mm	補修部境界に空隙、深さ2~3mm	補修部境界に空隙、深さ10mm	小さな空洞、豆板0~35mm	5mm程度の空洞が0~81mmに点在	顕著な豆板、深さ98mm以上	空隙有り、深さ7、16mm	空隙有り、深さ10mm
	状態	豆板	—	空隙	空隙	空隙	豆板	豆板	豆板	空隙	空隙
電磁波レーダー試験	被り平均(mm)	62	66	55	66	102	42	68	39	17	21
弾性波試験	赤外線熱画像	ほぼ一致	健全部一致	ほぼ一致	位置ずれ	浮き部一致	一致しない	ほぼ一致	赤外線範囲が狭い	ほぼ一致	赤外線範囲が狭い
	打音	一致しない部分が多い	—	打音範囲が広い	打音範囲が広い	浮き部一致	一致	打音範囲が広い	打音範囲が広い	ほぼ一致	ほぼ一致



凡例

□: 赤外線浮き, □: 打音浮き, —: 電磁波レーダー試験, +: 内視鏡試験, ○: 弾性波(健全), ○: 弾性波(小規模な空洞), ○: 弾性波(浮き)

す。また、調査時の温度条件は、調査地点により異なるが、坑内大気温度は最高 17.17~23.53°C、最低 12.75~22.61°C、平均 15.41~23.05°C、コンクリート表面の温度の最高値と最低値の差は 0.60~0.90°C、坑内大気温度とコンクリート表面温度の差は、0.26~0.59°Cでいずれも大気温度が低温であった。

また、浮き箇所は健全部と比較して、0.04~0.12°C低温となっていた。

調査の結果、赤外線法による浮き部 10 か所のうち、8 か所において、打音調査でも浮きと判定された。このうち 5 か所についてはその範囲も一致した。

これより、地下鉄営業線内における赤外線法による浮き・はく離調査はある程度可能であると考えられる。一部結果が一致しなかった点については、適用条件を整理する必要がある。

一方、非破壊・微破壊試験との比較では、内視鏡調査により、赤外線法で検出された浮きは、内部の空隙だけでなく豆板も含まれていることがわかった。躯体内部の空隙の深さは 2~16mm、豆板の深さは 100mm 程度であった。

電磁波レーダによる被り深さと浮き深さの関係から、⑨、⑩についての浮きの原因は鉄筋腐食と考えられた。

弾性波試験では、弾性波速度が 3,050m/s 以上を健全、2,130~3,050m/s を内視鏡調査により観察された小規模な空洞がある箇所、部材背面からの反射波が計測され

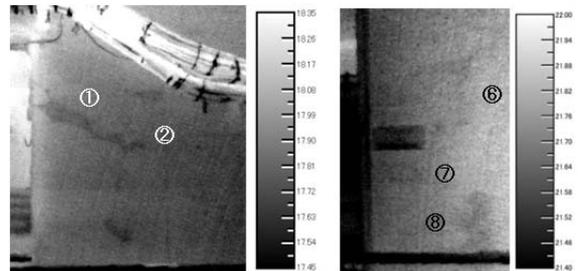


図-2 赤外線熱画像の例

ず低周波のたわみ振動波形を示す箇所を浮きとしたが、赤外線法による結果とある程度一致した。

#### 4. おわりに

今回の調査により、地下鉄営業線内において赤外線法による浮き・はく離調査が適用可能であること、赤外線法では躯体内部の空隙だけでなく豆板も検出できることが明らかとなった。

#### 【参考文献】

- 1)例えば、独立行政法人 土木研究所：熱赤外線映像法による吹付のり面老朽化診断マニュアル、平成 8 年 1 月
- 2)久保、天野、中山、ファン：赤外線画像と可視画像を併用した画像診断技術の開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.33, No1,pp.1847~1852, 2011