

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

FEASIBILITY OF DETECTING VOIDS NEAR SURFACE IN SUBWAY TUNNEL LINING WITH INFRARED THERMOMETRY

川上 幸一^{1*}・小西 真治²・久保 昌史³・中山 聡子⁴

Kouichi KAWAKAMI^{1*}, Shinji KONISHI², Masafumi KUBO³, Satoko NAKAYAMA⁴

Spalling is the most serious problem in the maintenance of subway tunnels in service. Voids forming on or near the concrete surface are often considered as signs of degradation leading to spalling. However, it is difficult to detect these voids by visual inspection alone because no cracks or other signs of irregularities are visible on the surface. Thus, a non-destructive, contact-free method using infrared thermometry to detect these non-visible voids was developed. We have conducted a void detection test using infrared thermometry in a subway tunnel during its non-operating hours, and compared the results with that of other conventional test methods, such as hammer testing and non-destructive/less-destructive testing. This paper describes our testing methods. We also discuss the feasibility of applying this method for maintenance activities in all tunnel sites.

Key Words : Non destructive examination, Infrared heat measuring, Passive infrared method, Image analysis, Subway tunnels

1. はじめに

地下鉄トンネルの維持管理において大きな問題ははく落である。地下鉄トンネルは、鉄筋コンクリート構造物が多く、はく落の主な原因は、躯体内部の鉄筋等の鋼材が中性化や漏水等により腐食膨張し、かぶり部分のコンクリートが押し出されることと考えられる。

この前兆となる浮きはコンクリート表面のひび割れ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。

現在、浮きを検出する手法は、主に検査員による打音検査に頼っている。鉄道トンネルでは、2年に1度の徒歩点検と目視主体の通常全般点検と20年に1度の至近距離からの目視と打音主体の特別全般検査での実施が義務付

けられている¹⁾。打音検査は、はく落に直結するような浮きを発見した場合、すぐにたたき落とし等の処置ができる利点はあるものの、検査員が構造物を直接打診するため点検速度に限界があること、検査員の経験や能力の違いにより見落としや打音もれ等、結果にばらつきが生じたり、データ整理や図化作業が煩雑になるといった課題がある。

そこで、赤外線熱計測により浮きを非破壊・非接触で効率的に抽出できる検査方法（以下、赤外線法）を研究した。

赤外線法によるコンクリートの浮き・はく離の検査手法は、法面や建物、橋梁検査等では事例²⁾も多い。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く、適用が難しく道路トンネルでの実績が一

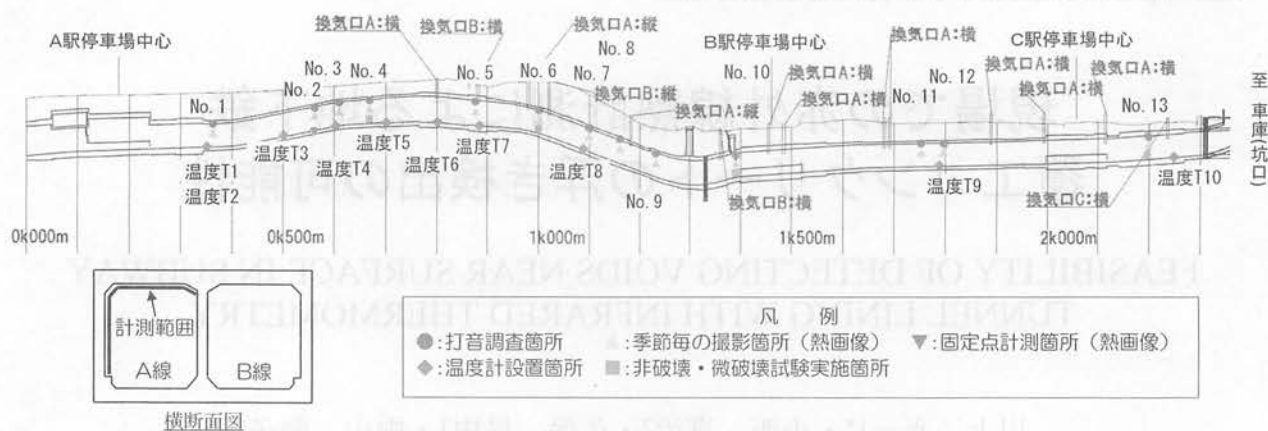
キーワード：非破壊調査、赤外線熱計測、パッシブ赤外線法、画像解析、地下鉄トンネル

¹正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部工務部 Structure Div. Engineering Dep. Tokyo Metro Co.,Ltd.(E-mail:kouichi.kawakami@tokyometro.jp)

²正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部工務部 Structure Div. Engineering Dep. Tokyo Metro Co.,Ltd.

³正会員 清水建設株式会社 土木技術本部基盤技術部 Technology Department of Engineering, Shimizu Corporation

⁴正会員 株式会社保全工学研究所 Hozen Maintenance & Management Engineering Corporation



部あるのみである。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おり³⁾、そうなれば将来的には軌道上を走行撮影する装置を用いることで夜間の線路閉鎖時間内に数kmの検査を行うことも可能となる。

今回、10月～2月の秋から冬季において、地下鉄営業線内で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・微破壊試験と比較した。

本稿では、トンネル坑内温度変化、浮きの検出可能な温度環境条件、検出可能な浮き、打音調査との比較の結果および維持管理実務への適用の可能性について述べる。

2. 調査方法

(1) 調査概要

本研究は、鉄道トンネル坑内におけるコンクリートの浮きを赤外線法により非破壊・非接触で効率的に検査する方法を検討するものである。

赤外線法によって、コンクリートの浮きを検出し維持管理の実務に適用するためには以下の要件が必要だと考えられる。

- ・トンネル坑内の温度環境の変化によって健全部に対して浮き部が変温部となっている。
- ・浮きによる変温部の状態（温度差、範囲）や、変温部が生じる環境条件（温度、時刻、場所等）を把握している。
- ・浮きによる変温部を検出するために必要な性能（温度分解能、解像度）を有する機器を使用している。

本研究は、鉄道トンネル坑内がこれらの要件を満足しているかを確認するために、次の手順で検討を行った。

- ① 調査対象全線の熱画像撮影および選定地点のトンネル坑内大気温度、コンクリート表面温度を連続測定

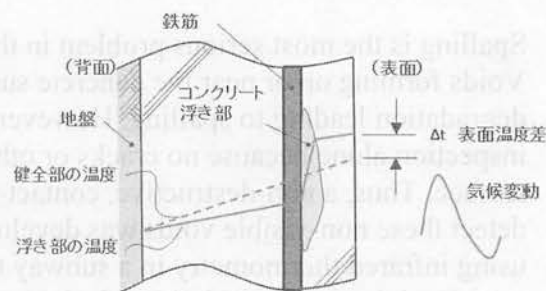


図-2 浮きの測定原理

し、トンネル坑内の温度環境の変化を分析し把握する。

- ②選定地点における線路閉鎖時間内における季節毎の熱画像撮影および6日間連続の熱画像定点観測を行い、浮きの検出が可能な温度環境を分析し把握する。
- ③選定地点において打音検査との検出精度を比較することで、赤外線法による浮きの精度を確認する。
- ④選定地点の浮き部周辺で非破壊・微破壊試験を行い、検出可能な浮きの状態を分析し整理する。
- ⑤今後の維持管理実務への適用の可能性を検討する。

本研究の対象は、第三軌条方式の営業路線約2kmの範囲、開削工法で施工された鉄筋コンクリート構造の箱型トンネルである。対象構造物の縦断および横断面図を図-1に示す。ここで、換気口の表記について、例えばA:縦とは換気口がA線側で鉛直方向に設置されている、B:横とは換気口がB線側で水平方向に設置されている形状を表すこととする。

(2) 測定原理

本研究において浮き・はく離を検出する手法は、赤外線パッシブ法の原理を用いる。

赤外線法とは、測定対象を赤外線カメラで測定し、熱画像として表示することで、その温度差と、温度差の生じている範囲から、浮き・剥離、表層部の内部空洞およ

び漏水などを検出する手法である。熱画像では、浮き・剥離がある場合は、図-2に示すように、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おり、表面の温度差として表示される。漏水は、流出している水の温度として表示される。

赤外線パッシブ法とは、測定対象物の表面温度を強制的な加熱や冷却をすることなく自然状態で測定する。計測対象部を強制加熱するアクティブ法⁹⁾と比べて、装置も少なく、計測時間も短くできる。

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（位置によるゆがみの補正）、濃淡処理した赤外線熱画像から浮き・はく離を検出する。

赤外線カメラは、被写体からの放射と周辺（例えば対向面）からの反射を合算して計測しているため被写体の絶対温度とは多少の誤差が生じる。赤外線カメラの測定イメージを図-3に示す。

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。このため、本研究ではデジタルカメラを用いて可視画像も同画角にて撮影する。

本研究で使用する赤外線カメラの仕様を表-1に、その特長を以下に示す。

- ・ 検出素子に冷却型半導体素子を使用しているため、最小検知温度差(温度分解能 0.02°C 以下)が小さい。
- ・ 検出波長が短いため反射等のノイズを低減することができる。
- ・ 高解像度のため小さい範囲の温度変化を検知できる。

(3) トンネル坑内の温度環境変化の把握

a) トンネル坑内の温度変化状況の把握

トンネル坑内の環境要因による温度変化の特徴を把握し、温度条件の定点測定地点（温度計設置地点）を選定するために、2013年9月27日夜間の線路閉鎖時間内（午前1時から4時）に、調査対象の上床版全長の熱画像撮影を行った。

撮影はトロ台車に、熱画像を撮影する赤外線カメラ、可視画像を撮影するデジタルカメラを設置して上床部を視準し、3m毎に移動しながら行った。熱画像の撮影画角は、上床部のハンチまでが撮影される約 $4.0 \times 3.2\text{m}$ とした。ここで、熱画像の接合・解析時の補助として可視画像も撮影した。撮影画角は熱画像とほぼ同じになるように約 $4.0 \times 2.7\text{m}$ とした。

対象区間を連続撮影した熱画像からトンネル坑内上床版の温度分布をグラフ化し、土かぶり、換気口、坑口からの距離等の条件を整理して、温度計設置地点および季節毎の熱画像撮影地点を決定した。

上床版の撮影状況を写真-1に示す。

b) トンネル坑内温度の定点測定

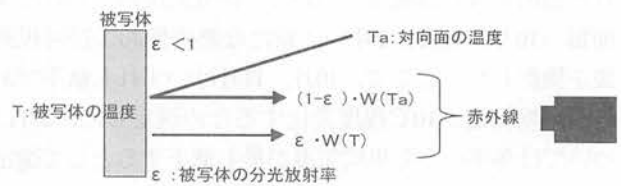


図-3 赤外線カメラの測定イメージ

表-1 赤外線カメラの仕様

外観	寸法・性能	
	温度分解能	0.02°C 以下 @ 30°C
	検出波長	$3 \sim 5 \mu\text{m}$
	検出素子	冷却型半導体素子 InSb
	素子数	640×512



写真-1 上床版撮影状況

トンネル坑内の温度環境を把握するために、トンネル坑内大気温度、コンクリート表面温度の測定を行った。測定期間は2013年10月6日～2014年2月24日、測定箇所はトンネル坑内で選定した10地点において、固定式小型温度計（自動記録）を軌道面から約 $1.5\text{m} \sim 2.0\text{m}$ の高さに設置し、10分間隔で連続的に、コンクリート表面温度とその直近のトンネル坑内大気温度の測定を行った。トンネル坑内の中柱に設置した温度計の状況を写真-2に示す。

(4) 浮きの検出が可能な温度環境の把握

a) 季節毎の熱画像撮影

トンネル坑内は外気の流入があるため、外気温の変化によってトンネル坑内の温度環境も変化していると考えられる。よって、外気の流入が熱画像法による浮きの検出に与える影響を把握するため、温度計を設置した地点周辺で、上床版や側壁に、赤外線法で浮きが検出さ

れた箇所を含む13地点について、研究期間内における季節毎（10月、11月、2月）に新たな熱画像および可視画像を撮影した。ここで、10月、11月はいずれも秋季であるが平均気温が10℃程度変化するため選定した。2月については冬季のうち平均気温が最も低下するとして選定した。

撮影は、熱画像、可視画像ともに、撮影機材を人力で運び込み行った。熱画像は、約3.0×2.4mの画角とした。また、可視画像の画角は、約4.0×2.7mとした。

b) 熱画像の定点観測

撮影は線路閉鎖時間内の限定的な条件となるため、その時間以外の電車運行や天候の影響によるトンネル坑内の温度変化の状況を確認することができない。この様なことから、これらの影響等を確認するために、顕著な浮きの見られた1地点において、6日間の定点連続撮影を行った。撮影は、赤外線カメラを線路運行に支障のない箇所に固定し、上床版、ハンチおよび側壁の一部を視準した。撮影間隔は、1分に設定し自動撮影した。熱画像の撮影画角は、4.1×3.1mとした。撮影は自動で5日間行い、6日目に計測を停止し、機材を撤去した。図-4に定点撮影範囲を示す。

(5) 打音結果と検出精度の比較

季節毎の熱画像を撮影した13地点において打音検査を行い赤外線法により抽出した浮きと打音法との整合や比較を行った。調査は、調査地点において仮設足場を設置し、打音法により浮き箇所のチョーキングを行いデジタルカメラで可視画像を撮影した。

この結果を基準とし、熱画像から抽出した浮きの結果から、打音法と赤外線法との浮きの整合性、打音法に対する赤外線法の抽出率の確認を行った。

赤外線法と打音法の整合性は、打音法でチョーキングした範囲と、熱画像において浮きと判断した箇所が重なっている部分を整合した浮きと判定した。打音法の赤外線法に対する抽出率は、打音法による浮きの数に対する整合した浮きの数の割合とした。

ここで、図-5に打音法との比較例を示す。この例では、熱画像法での検出結果と重なっている打診_18、打診_19、打診_20を整合した浮きと判定し、重なっていない打診_17、打診_21を、整合しない浮きと判定した。

こうした比較を13地点、各季節（10月、11月、2月）に撮影した熱画像において行った。

(6) 赤外線法で検出する浮きの状態の整理

検出性能の特徴（長所・短所）を把握し、浮きの深さや範囲の確認を行うために、季節毎の熱画像撮影地点から4地点9箇所を選定し打音法による結果との整合を確認し、さらに非破壊・微破壊試験を実施した。実施した非

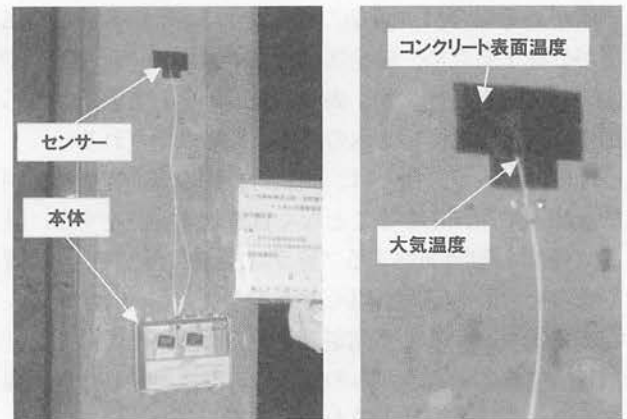


写真-2 中柱に設置した温度計の状況

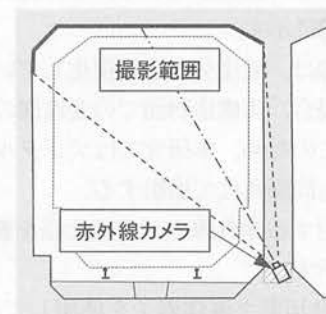


図-4 定点撮影範囲

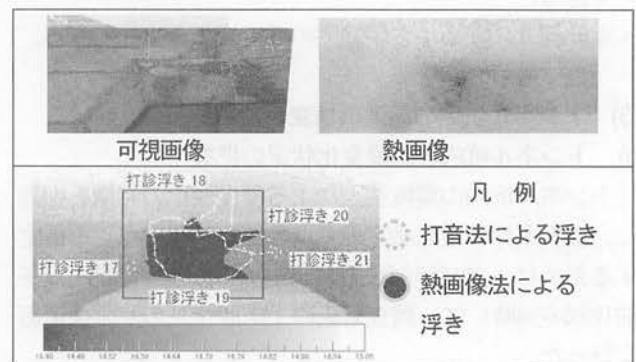


図-5 打音法との比較例

破壊・微破壊試験は以下に示す電磁波レーダー試験、弾性波試験、および内視鏡試験である。

a) 電磁波レーダー試験

鉄筋のかぶり位置の計測および、内視鏡観察時のドリル削孔を行う際に鉄筋位置上とならない様にするため電磁波レーダーによる鉄筋位置確認を行った。具体的には後に、ドリル削孔、鉄筋かぶり調査を行う周辺に、鉛直および水平方向に探査を行い、配筋状況調査を行った。調査結果は、配筋位置を現地にチョーキングで明示するとともに、測定波形の出力を行い鉄筋のかぶり深さを求

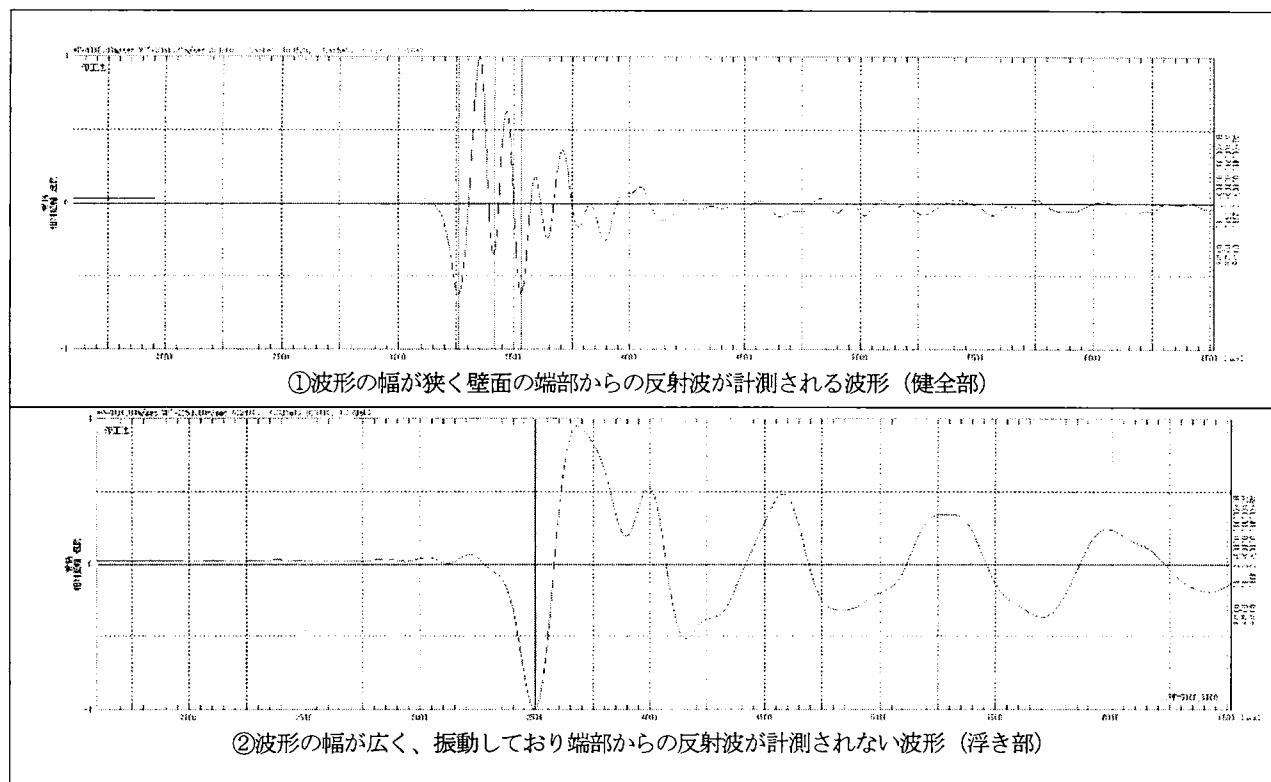


図-6 弾性波試験における健全部と浮き部の波形の例

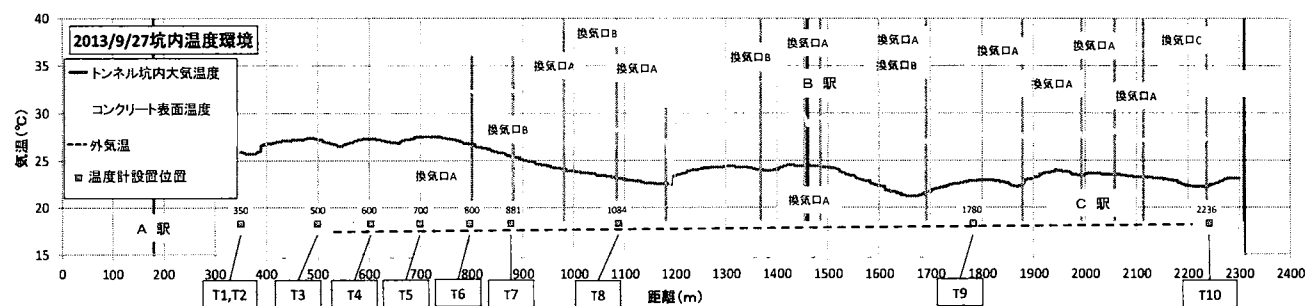


図-7 トンネル坑内の温度環境

めた。

b) 内視鏡試験

熱画像で変温部と確認された箇所について、ドリル削孔を行い、孔内に内視鏡を挿入し画像撮影を行った。撮影画像から、浮きの深さや内部の状況（豆板の深さ等）の確認を行った。

c) 弾性波試験

熱画像で変温部と確認された箇所周囲の弾性波速度を計測し、浮き波形が計測されるかを確認した。

一定のエネルギーでコンクリート表面を打撃した場合、健全部は波形の幅が狭く壁面端部からの反射波が確認されるが、浮き部は波形の幅が広く振動しており端部からの反射波が計測されない。健全部と浮き部の波形の例を図-6に示す。

計測された波形から②に該当した場合は浮きと判断し

た。また、①に該当した場合は、壁の厚さを図面から求め弾性波速度を算定し、弾性波速度が3,050m/s以上を健全、2,130m/s以上3,050m/s未満を空洞が内在している可能性が高いと評価した。ここで、弾性波速度の健全性評価の基準は、既往の文献⁹⁾を参考とした。

3. 調査結果

(1) トンネル坑内の温度変化

a) トンネル坑内の温度変化状況の把握

熱画像から計測したトンネル坑内の温度環境を図-7に示す。ここで、トンネル坑内大気温度およびコンクリート表面温度は赤外線カメラによる測定値、外気温は気象庁発表の値を用いた。

当日の外気温は約17.5℃であったが、コンクリート表

表-2 温度計設置地点

No.	距離	位置	設置地点の選定理由
T1	0k350m	左中柱	換気口，駅からの距離を比較するため
T2	0k350m	右中柱	換気口，駅からの距離
T3	0k500m	左側壁	換気口，駅からの距離
T4	0k600m	左側壁	換気口，駅からの距離
T5	0k700m	左側壁	換気口，駅からの距離
T6	0k800m	左側壁	換気口 A 横付近
T7	0k881m	左側壁	換気口 B 横付近
T8	1k084m	左側壁	換気口 B 縦付近
T9	1k780m	左側壁	換気口の間
T10	2k236m	左側壁	換気口 C 横，坑口付近

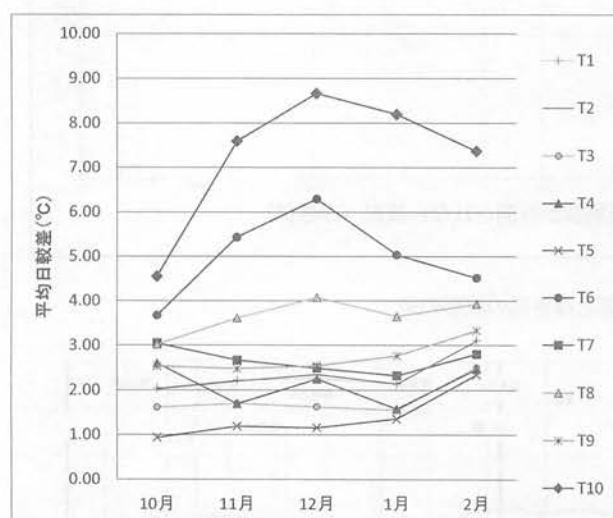


図-8 各温度計のトンネル坑内大気温度の平均日較差

表-3 季節毎の撮影および打音検査実施地点

No	距離	周辺環境	No	距離	周辺環境
1	0k360m	A 駅付近	8	1k158m	換気口有
2	0k556m		9	1k230m	
3	0k606m		10	1k388m	B 駅付近
4	0k666m		11	1k759m	
5	0k871m	換気口有	12	1k796m	
6	0k899m	換気口有	13	2k195m	換気口有
7	1k094m				

面温度は，換気口のない区間(350m～800m)では約33℃，換気口が多くある区間(800m～2k300m)では約28℃程度であった。換気口や坑口から外気を取り込み温度が低くなっていると考えられる。

トンネル坑内大気温度は，ほぼ一様にコンクリート表面温度より5℃～6℃程度低かった。

以上より，トンネル坑内の温度環境は外気を取り込む換気口，駅および坑口からの距離に特に関係性が深いと考えられたため，表-2に示す地点に温度計を設置するこ

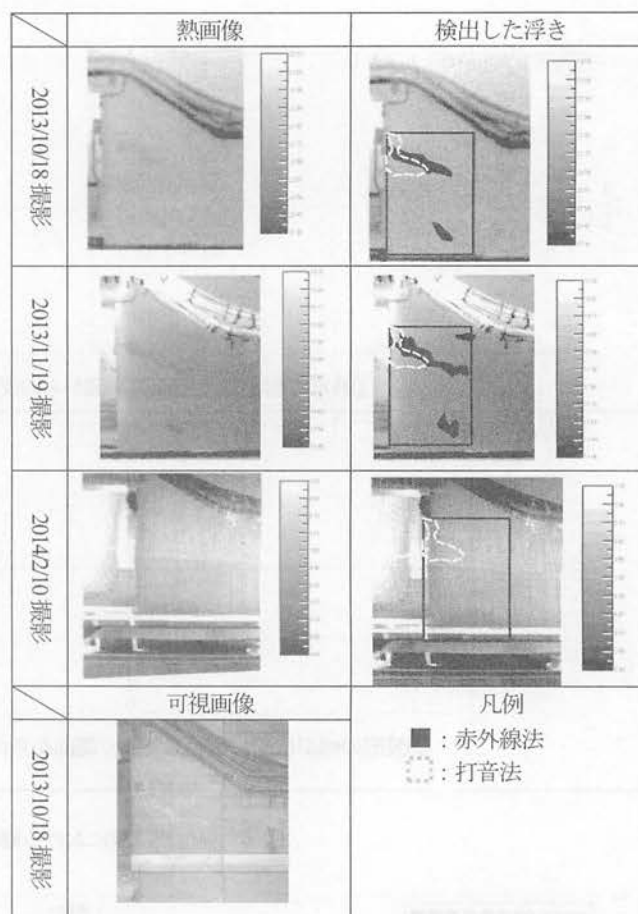


図-9 各季節の熱画像と浮きの比較事例(No. 13)

ととした。ここで温度計の設置地点の選定理由は，換気口，駅および坑口からの距離，換気口の位置がA線かB線か，換気口の取付け方向が縦方向か横方向か，により温度環境に違いが表れるかを確認するためである。

b) トンネル坑内大気温度の定点測定

測定期間中の各温度計のトンネル坑内大気温度の日較差を図-8に示す。図-8より，坑口に最も近いT10の最高気温と最低気温の日較差が最も大きく外気の影響を受けていたと考えられる。また，換気口付近に温度計を設置したT6，T8の日較差も比較的大きかった。T7とT8は換気口B横・縦の組み合わせであったが，縦方向のT8のほうが日較差が大きく，外気の影響をより受けていたと考えられる。T5は，今回の計測期間を通して日較差が小さく，外気の影響が非常に小さかったと考えられる。T3についてはT5と比較すれば外気の影響を受けているが，その他の場所と比較すると外気の影響は小さかったと考えられる。T1，T2は同じ距離程の左右に設置を行っており，ほとんど差が見られなかった。

計測期間中における日較差は，換気口や坑口に近い

T6，T8，T10では12月が最も大きくなったが，その他の地点では，2月が最も大きくなった。

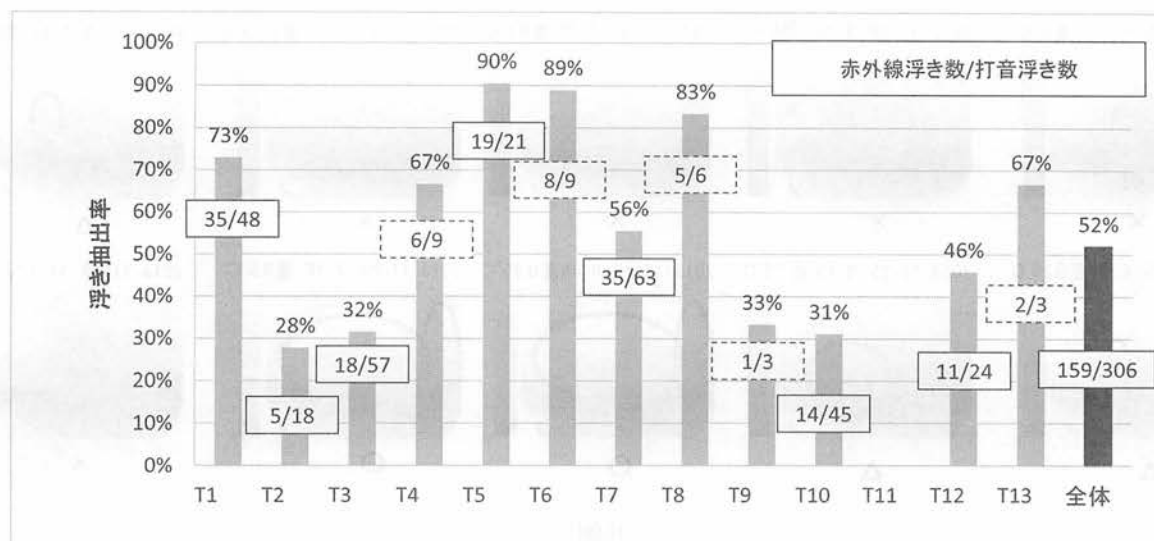


図-10 調査地点毎の打音法に対する赤外線法の抽出率

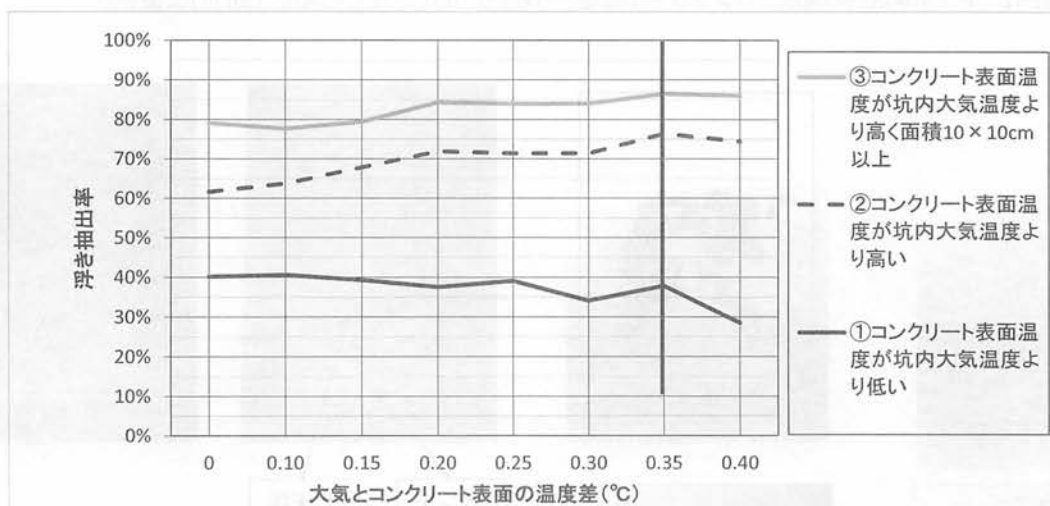


図-11 トンネル坑内大気温度とコンクリート表面温度差による浮きの抽出率

(2) 浮きの検出が可能な温度環境

a) 本研究での浮きの検出方法

本研究において浮きとは、既往の研究³⁾を参考にして、約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）と仮定した。

b) 季節毎の熱画像撮影

トンネル坑内の温度変化状況の確認から設定した季節毎の撮影および打音検査を実施する地点を表-3に示す。また、No.13地点における各季節で撮影した熱画像と赤外線法および打音法の浮きを比較した事例を図-9に示す。この結果、赤外線法では撮影する時期によって、温度環境が異なるため、浮きが検出できる場合とできない場合があることがわかった。

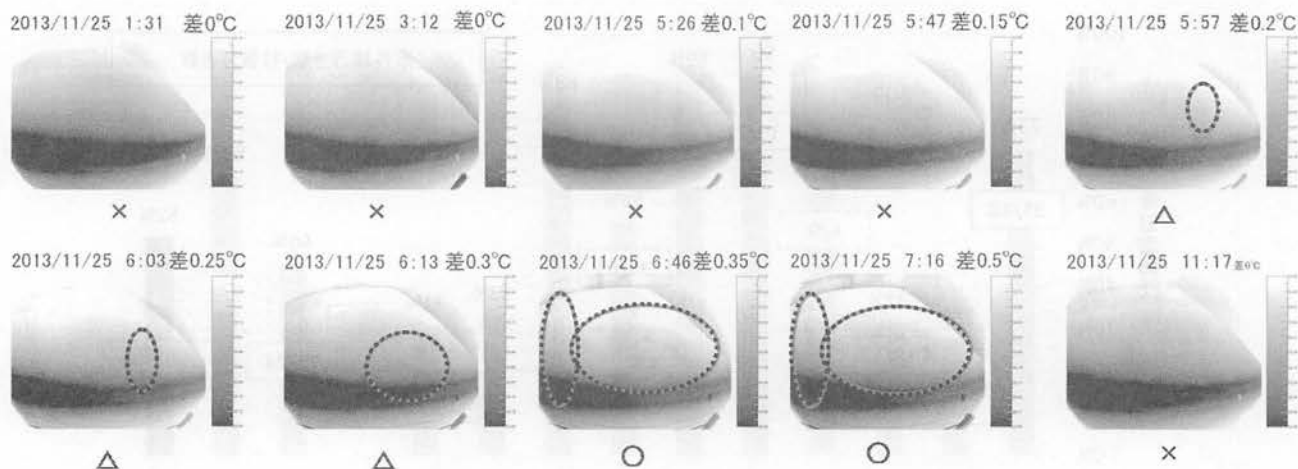
調査地点毎の打音法に対する赤外線法の浮き抽出率を図-10に示す。打音法に対する赤外線法の浮き抽出率(%)は、全体で52%であったが、撮影地点によって28

～90%とばらつきがある事がわかった。抽出率の特に高い地点、No.5、No.6およびNo.8は、換気口付近であった。

換気口付近はトンネル坑内温度の定点測定で明らかになったように、温度変化が比較的大きい。これは、トンネル坑内大気温度の上昇によるコンクリート表面への吸熱量や、トンネル坑内大気温度の下降によるコンクリート表面からの放熱量が大きく、よって浮き部の変温量も大きくなり、抽出率が高くなったと想定される。

そこで、トンネル坑内大気温度とコンクリート表面の温度差が、浮きの抽出率にどのように影響するかを比較検証した。

各地点および各季節で撮影したそれぞれの熱画像上のトンネル坑内大気温度（コンクリート表面から離れた金属部分）とコンクリート表面温度（健全部）の差分を取り、その温度差での浮きの抽出率を算出した。トンネル坑内大気温度とコンクリート表面温度差による浮きの抽出率を図-11に示す。比較に当たっては、①コンクリー



凡例

○：浮きが検出された範囲 ○：浮きを明瞭に抽出 Δ：浮きを明瞭ではないが抽出 x：浮きを未抽出

図-12 トンネル坑内の温度とコンクリート温度との差が0～0.5℃となる熱画像（2013/11/25撮影分）

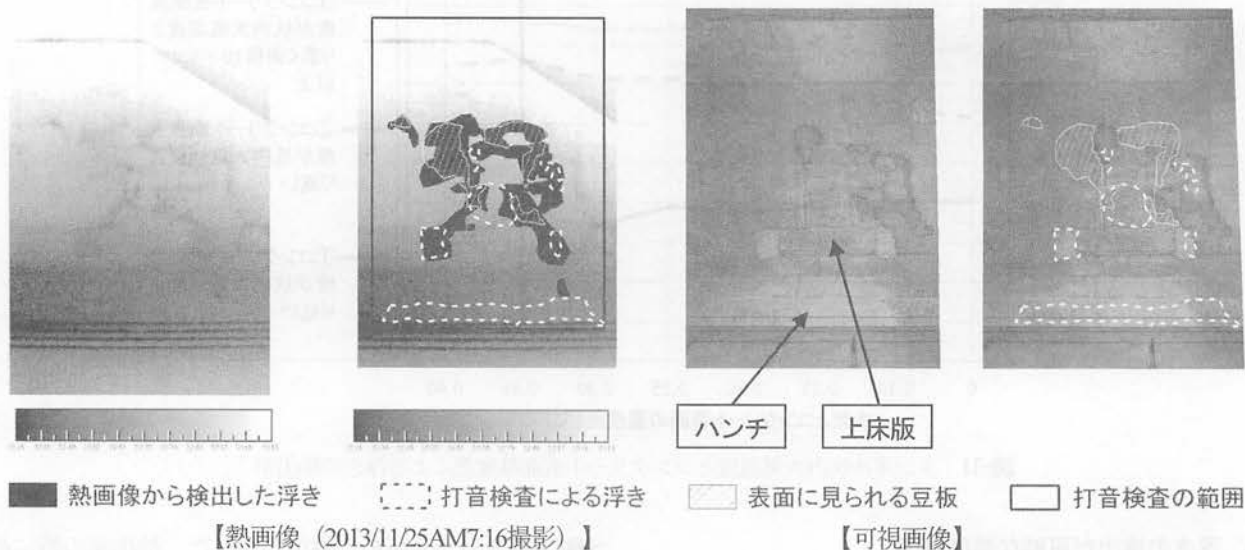


図-13 定点測定地点の打音調査結果および熱画像による浮き検出例

ト表面温度がトンネル坑内大気温度より低い場合、②コンクリート表面がトンネル坑内大気温度より高い場合および③コンクリート表面がトンネル坑内大気温度より高くかつ浮きの大きさが10cm×10cm以上の3通りに分類した。ここで、浮きの大きさを分類の指標として挙げた理由は、浮きの面積が大きいほど変温が生じやすく検出されやすいと考えたからである。比較検証した結果を以下に示す。

- ①コンクリート表面温度がトンネル坑内大気温度より低い場合は、抽出率は40%程度と低く、温度差が大きい範囲でも抽出率に大きな変化が見られなかった。
- ②コンクリート表面温度がトンネル坑内大気温度より高い場合は、抽出率は比較的高く、温度差が大きくなる

ほど抽出率も高くなり温度差が0.35℃を超えると抽出率は76%となった。

- ③コンクリート表面温度がトンネル坑内大気温度より高くかつ浮きの大きさが10cm×10cm以上とした場合は、さらに抽出率が高くなり、全体で78%、温度差が0.35℃以上を超えると86%であった。

以上より、今回の計測ではコンクリート表面温度がトンネル坑内大気温度より高く、その温度差が大きいかつ浮きの大きさが大きいほど抽出率が高くなることが明らかになった。

c) 熱画像の定点観測

図-12に2013年11月25日に0k 556m付近で定点撮影を行った時のトンネル坑内大気温度とコンクリート表面温度

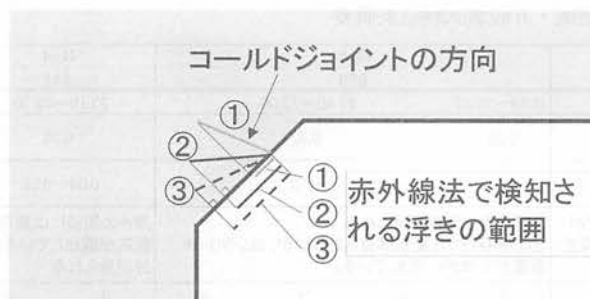


図-14 コールドジョイントによる浮きのイメージ

との差が $0\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ となる熱画像を示す。この結果から、コンクリート表面温度がトンネル坑内の温度より 0.2°C 程度高くなると抽出可能な浮きも見られるが、 0.35°C 以上高くなると浮きと健全部との濃度差が明瞭になることが確認できた。

当該箇所での打音検査の結果および2013年11月25日午前7時16分に撮影した熱画像からの浮きの抽出例を図-13に示す。可視画像との照合結果から、熱画像から検出した浮きは、豆板も含まれていることがわかった。これは、豆板には空隙が多く存在するため浮きと同様に変温部が生じたためと考えられる。また、打音検査により判明したハンチ部の浮きについては、赤外線法では今回の調査時間内では浮きとして検出することはできなかった。この箇所は目視観察の結果、コールドジョイントによって発生した浮きであった。コールドジョイントによる浮きは、対象面に対して斜め方向に生じることが多いため、その角度によっては変温部の範囲が狭く検出が困難になると想定される。コールドジョイントによる浮きのイメージを図-14に示す。

(3) 検出可能な浮きの条件

赤外線法により検出可能な浮きの条件を確認するために実施した打音法との比較および微破壊・非破壊試験結果の概要を表-4に示す。試験は、季節毎の撮影地点のうち、軽微なはく落が生じても営業線に影響のない側壁部分で浮きを抽出したNo.4, No.6, No.10, No.13を選定した。電磁波レーダー試験、弾性波試験、内視鏡試験の状況を写真-3に示す。ここで、内視鏡試験については例として豆板の画像を示す。

表-4より、打音法との比較では、赤外線法による浮き部10か所のうち、8か所において、打音検査での浮きと一致し、5か所についてはその範囲も一致した。

微破壊・非破壊試験のうち内視鏡試験により、浮きの深さ・豆板の深さ（豆板が連続して続く厚さ）としてと



写真-3 電磁波レーダー試験、弾性波試験、内視鏡試験の状況

りまとめを行った。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。浮きの原因となる躯体内部の空隙の深さは $2\sim 16\text{mm}$ 、他方、豆板の深さは 100mm 程度であった。

電磁波レーダーによる試験により、かぶり深さを計測した。かぶり深さの平均は $17\sim 102\text{mm}$ であった。表-4の、⑨、⑩については、浮きの深さと鉄筋かぶりの値が近かったこと、目視の結果、周辺のコンクリート表面に漏水跡が認められたことから、浮きの原因は鉄筋腐食と考えられた。その他の箇所では浮きの深さと鉄筋かぶりに相関性は見られなかった。

弾性波試験により、内部の空隙がある箇所（③、④、⑤、⑨および⑩）については赤外線法、打音法ともに健全部、浮き部の範囲がほぼ一致した。ただし、③および④における打音法の範囲、⑧および⑩における赤外線法の範囲は、それぞれ弾性波試験の範囲と大きさが異なっていたので注意が必要である。また、豆板の箇所（①、⑥、⑦および⑧）については、打音法は①の箇所が、赤外線法は⑥の箇所が一致していなかった。前者は壁の端部、後者は打音法では浮きが認められなかった箇所である。

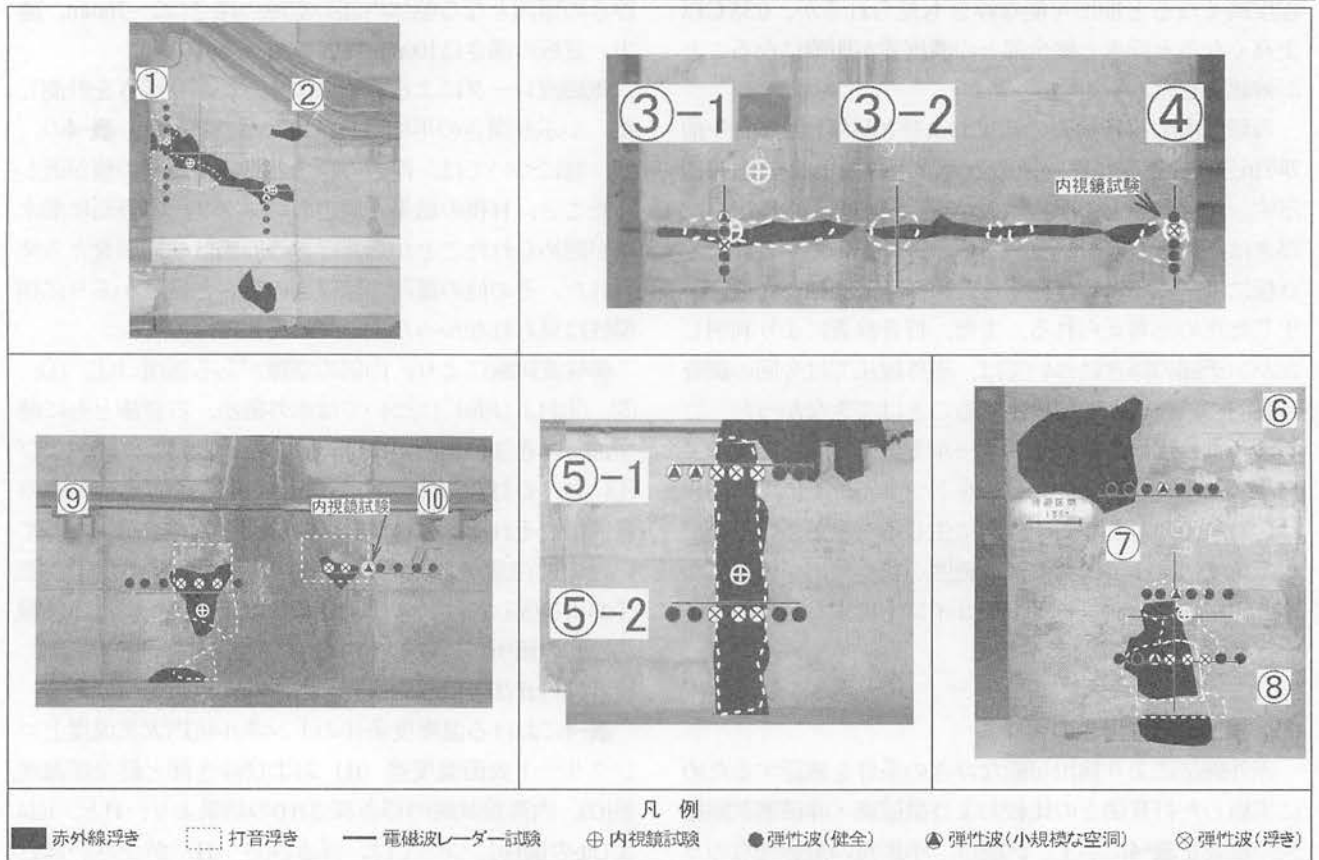
表-4における温度条件のトンネル坑内大気温度とコンクリート表面温度差（ t_1 ）および浮き部と健全部温度差（ t_2 ）、内視鏡試験の浮き深さ（ H ）の結果より、 H と、 t_1 および t_2 の関係については、浮き深さ（ H ）が小さいほどトンネル坑内大気温度とコンクリート表面温度差（ t_1 ）が大きく、また、この t_1 が大きいほど浮き部と健全部温度差（ t_2 ）も大きくなる傾向がみられたが、検討数が少ないため定量的な評価は難しい。今後データ数を増やして検証していく必要がある。

4. 維持管理実務への適用の可能性

(1) 浮きの検出が可能な時期と区間

表-4 打音法との比較および微破壊・非破壊試験結果概要

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			
	トンネル坑内大気温度とコンクリート表面温度差(t1)	0.59	0.34	0.89	0.32			0.26			
	浮き部と健全部温度差(t2)	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		目だっ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目だっ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		△	×	○	○	○	×	△	△	○	○
内視鏡試験	損傷状況	顕著な豆板	小さな空洞(2~4mm)	空隙有り	補修部境界に空隙	補修部境界に空隙	小さな空洞、豆板	5mm程度の空洞	顕著な豆板	空隙有り	空隙有り
	浮き深さ(H)	100mm以上	0~50mm[に点在	3~4mm	2~3mm	10mm	0~35mm	0~81mm[に点在	98mm以上	7、16mm	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	2	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



季節毎の熱画像計測結果および熱画像の定点観測結果から、コンクリート表面温度がトンネル坑内大気温度より0.35°C以上高くなる環境条件では、浮きの抽出率が高くなることが分かった。そこで、実務において計測可能な時間帯(線路閉鎖時間帯1:00~4:00)にコンクリート表面温度がトンネル坑内大気温度より0.35°C以上高くなる日を撮影可能日とし、トンネル坑内に設置した温度計の測定結果から、各地点における月ごとの撮影可能日数を集計した。撮影可能日数の地点ごとの集計結果を図-

15に示す。ただし、図-15には、季節毎の撮影地点における浮き抽出率もあわせて示す。

以下に、浮きの検出が可能な時期と区間条件について今回得られた知見を示す。

①10月で撮影可能日の割合が80%以上になる箇所はT3、T7およびT10のみであり、全延長の30%程度の区間と考えられる。

②11月で撮影可能日の割合が80%以上になる箇所は、T3、T7、T8およびT10のみであり、全延長の約50%程度の

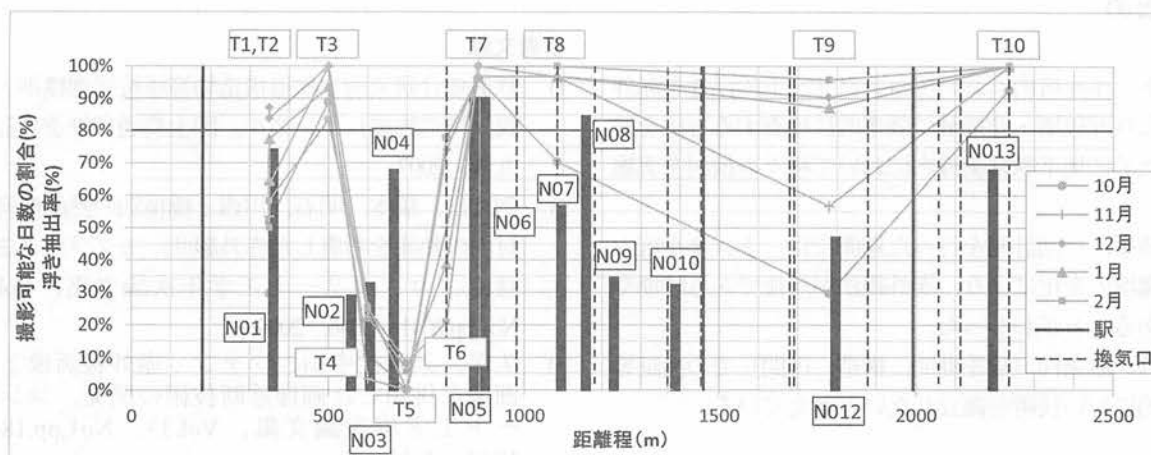


図-15 月毎の撮影可能日数の割合

区間と考えられる。

③12月で撮影可能日の割合が80%以上になる箇所は、T1, T2, T3, T7, T8, T9およびT10であり、全延長の約90%程度の区間と考えられる。

④1月で撮影可能日の割合が80%以上になる箇所は、T3, T7, T8, T9およびT10であり、全延長の約80%程度の区間と考えられる。1月は、撮影可能日の割合が80%以上となる区間は12月と比べて減少したが、撮影可能日がほとんどなかったT4では23%（6日間）、T5では6%（2日間）と微増した。

⑤2月の撮影可能日の割合が80%以上になる箇所は、T3, T7, T8, T9, T10であり、全延長の約80%程度の区間と考えられる。1月と同様にT4, T5においても撮影可能日が見られる。

⑥全体としては、日較差が大きくなると、撮影可能日も増加する傾向にあった。

⑦撮影可能な日数の割合が低いT4, T5の周辺は、浮き抽出率も低い（No.3, No.4）傾向にあった。この地点は駅や換気口から遠いため、外気の流入が生じにくく、大気が滞留し温度変化が生じにくい環境であったと考えられる。

(2) 維持管理実務への適用へ向けて

本研究において明らかになった事項を以下にまとめる。

- ①トンネル坑内の温度環境は換気口、駅および坑口からの距離に影響を受けている。
- ②赤外線法では撮影する時期によって、浮きを検出できる場合とできない場合がある。
- ③打音法に対する赤外線法の浮きの抽出率は全体で52%であったが、撮影地点により28%～90%とばらついた。
- ④コンクリート表面温度がトンネル坑内の温度より

0.35℃以上高くなると浮きの抽出率が78%と高くなった。さらに浮きの大きさが10cm×10cm以上だと86%と更に高くなった。

⑤コンクリート表面温度がトンネル坑内大気温度より低い場合は抽出率が40%程度と低く、温度差が大きくなっても浮きの抽出率は変わらなかった。

⑥日較差が大きいと撮影可能日数（線路閉鎖時間内にコンクリート表面温度が大気温度より0.35℃以上高くなる日）が増加した。

⑦赤外線法では、豆板も浮きと判定したり、コールドジョイントによる浮きを検出できないという事象がみられた。

以上の結果から、赤外線法を維持管理の実務に適用するためには、トンネル坑内の温度環境を予め把握し適切な時期に検査を行うこと、外気の流入が少ない箇所は温度環境を改善するために強制換気等の措置を行うこと等が重要であると考えられる。

また、例えば時速15kmで撮影をすれば、東京メトロの場合、3日程度で1路線の計測を終えることが可能であり、もっとも抽出率の良い時期を見つけておけば実用化に近づくと考えられる。

今回の研究では、3月～9月の夏季におけるトンネル坑内の温度環境、トンネル構造や土かぶり等の環境が異なる他区間における温度環境、浮きの状態と温度差の定量的な相関性および誤認する可能性のある変状（豆板やコールドジョイントに起因する浮き）に対する処置等については結論が得られなかった。今後も、これらについては継続して検討していく必要がある。

これらの課題を解決することで実務に適用できる可能性が更に高くなると考えられる。

5. まとめ

鉄道トンネル坑内においてコンクリートの浮きを赤外線法により非破壊・非接触で効率的に検査する方法を検討するために地下鉄営業線内において種々の検討を実施した。

その結果、今回計測を行った期間では、トンネル坑内の温度環境の変化により、赤外線法が可能である時期や区間があることがわかった。

今後は、他条件（夏季期間、構造、区間）での検証等を継続的に行い技術を確立したいと考えている。

参考文献

- 1) 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，国土交通省鉄道局監修，丸善，2007
- 2) 例えば，橋本，明石，川西：橋種別の熱的環境と部材内の熱流を考慮した赤外線サーモグラフィ法の留意点，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1,pp.2041～2046，2009
- 3) 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，No.1,pp.1847～1852，2011
- 4) 鳥取，宮田，長田，栗田：赤外線サーモグラフィ法による鉄道コンクリート構造物の非破壊検査，非破壊検査，Vol.51，No.3，pp.134～138，2002.3
- 5) 西林，小柳，渡邊，宮川 編：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，2009年10月20日