

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方法の
検討とその応用

Infrared Thermometry Application to The Detection
of Void in The Subway Tunnel Lining Surface

2019年2月

川上 幸一

Koichi KAWAKAMI

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方法の
検討とその応用

Infrared Thermometry Application to The Detection
of Void in The Subway Tunnel Lining Surface

2019年2月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

川上 幸一

Koichi KAWAKAMI

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	我が国の鉄道構造物の現状	1
1.1.2	鉄道構造物におけるはく落事象	2
1.1.3	少子高齢化社会, 人口減少	3
1.2	研究の目的と概要	4
1.3	論文の構成と内容	6
第2章	既往の研究	9
2.1	地下鉄トンネルの変状	9
2.2	検査体系の変化	11
2.2.1	事後保全から予防保全への流れ	11
2.2.2	鉄道トンネルのコンクリートはく落事故	13
2.2.3	鉄道の維持管理標準	17
2.2.4	道路トンネルのコンクリートはく落事故と検査基準	20
2.2.5	新技術の導入	20
2.3	検査の機械化	21
2.3.1	目視検査の機械化	21
2.3.2	打音検査の機械化	23
2.4	赤外線法	25
2.4.1	測定原理	25
2.4.2	地上構造物の例	25
2.4.3	トンネル適用の問題点	26
2.5	まとめ	27
第3章	東京メトロのトンネル構造物と維持管理	30
3.1	東京メトロの構造物	30
3.2	東京メトロのトンネル維持管理概要	31

3.2.1	検査	31
3.2.2	通常全般検査と特別全般検査結果の比較.....	33
3.3	変状と措置	33
3.4	維持管理における ICT の活用	36
3.4.1	タブレットの活用.....	36
3.4.2	データの可視化.....	37
3.5	検査データの活用.....	38
3.5.1	ベイジアンネットワークによる理論的変状の観測確率 5).....	38
3.5.2	画像認識技術を利用したはく落要注意箇所 ⁶⁾ の自動抽出システム.....	40
3.6	東京メトロの維持管理まとめ.....	41
第4章	赤外線熱計測適用可能性における予備検討.....	43
4.1	予備検討の目的.....	43
4.2	検討概要	44
4.2.1	検討の流れ.....	44
4.2.2	検討対象箇所.....	45
4.3	赤外線サーモグラフィの仕様.....	47
4.4	計測範囲における打音検査.....	48
4.5	赤外線法計測.....	50
4.5.1	計測方法.....	50
4.5.2	計測データの特徴.....	50
4.5.3	変状部と健全部の温度差.....	53
4.5.4	コンクリート表面温度とトンネル内気温の関係.....	55
4.6	予備検討のまとめ.....	57
第5章	開削トンネルにおける赤外線法適用可能性の検討.....	59
5.1	検討概要	59
5.1.1	検討の流れ.....	59

5.1.2	対象箇所.....	59
5.2	トンネル坑内温度環境.....	60
5.3	浮きの検出が可能な温度環境の把握.....	62
5.3.1	浮きと判断する温度差.....	62
5.3.2	季節毎の赤外線法計測.....	62
5.3.3	赤外線法による定点計測.....	66
5.4	赤外線法で検出する浮きの条件.....	68
5.4.1	試験概要.....	68
5.4.2	検出可能な浮きの条件.....	69
5.5	浮きの検出が可能な時期と区間.....	71
5.6	開削トンネルにおける検討のまとめ.....	72
第6章	シールドトンネルにおける赤外線法適用可能性の検討.....	73
6.1	検討概要.....	73
6.2	トンネル坑内温度環境.....	74
6.2.1	月毎の温度環境.....	74
6.2.2	トンネル縦断方向および横断方向の温度環境.....	75
6.3	赤外線法計測.....	77
6.4	打音検査, 浮き部厚み計測.....	80
6.4.1	打音検査.....	80
6.4.2	浮き部厚み計測.....	81
6.5	赤外線法計測と打音検査との比較.....	82
6.6	評価.....	84
6.6.1	計測に適する時期.....	84
6.6.2	打音検査との比較における評価.....	85
6.7	シールドトンネルにおけるまとめ.....	87
第7章	浮きはく離箇所検出手法実用化の検討.....	89

7.1	検討概要	89
7.2	トンネル坑内の環境温度の予測.....	89
7.2.1	環境温度測定方法.....	89
7.2.2	環境温度測定結果.....	90
7.2.3	外気温と環境温度.....	91
7.3	全面打音および特別全般検査との比較.....	92
7.3.1	赤外線法による熱画像撮影.....	92
7.3.2	全面打音検査.....	93
7.3.3	全面打音，特別全般検査の比較.....	95
7.3.4	全面打音および特別全般検査との比較まとめ.....	97
7.4	過検出の低減方法について.....	98
7.4.1	過検出について.....	98
7.4.2	過検出低減方法について.....	100
7.5	浮きはく離箇所検出手法実用化の検討のまとめ.....	101
第8章	赤外線法の維持管理実務への導入.....	103
8.1	赤外線法導入のポイント.....	103
8.2	点検業務の運用方法.....	103
8.3	維持管理のICT活用における赤外線法の導入.....	105
8.3.1	現場における打音点検箇所確認ツール.....	105
8.3.2	検査データ活用との組み合わせ.....	105
8.4	維持管理実務におけるはく落予防の流れ.....	106
第9章	結論.....	107
9.1	本研究の結論.....	107
9.2	課題と今後の対策.....	111

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 我が国の鉄道構造物の現状

我が国では、高度経済成長期に整備したインフラが一斉に老朽化し、今後 20 年で、建設後 50 年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる見込みである。表 1-1-1 に、建設後 50 年以上経過する社会資本の割合を示す¹⁾。例えば、トンネルは、その割合が平成 25 年 3 月の 20%から、10 年後には 34%、20 年後には 50%と急増する。このように一斉に老朽化するインフラを戦略的に維持管理・更新することが求められている。

表 1-1-1 社会資本の老朽化の現状¹⁾

	2013 年	2023 年	2033 年
道路橋 [約 40 万橋 (橋長 2m 上の橋約 70 万のうち)]	約 18%	約 43%	約 67%
トンネル [約 1 万本]	約 20%	約 34%	約 50%
河川管理施設 (水門等) [約 1 万施設]	約 25%	約 43%	約 64%
下水道管きよ [総延長：約 45 万 km]	約 2%	約 9%	約 24%
港湾岸壁 [約 5 千施設 (水深-4.5m 以深)]	約 8%	約 32%	約 58%

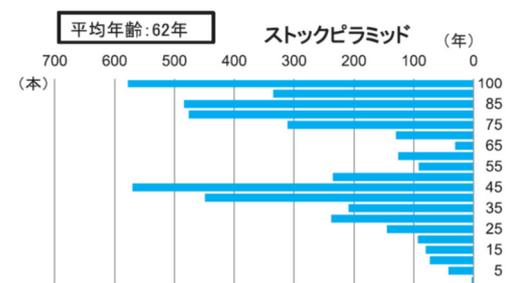
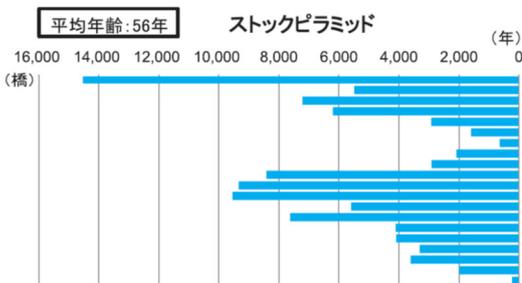
鉄道に目を向ければ、我が国の鉄道は、大量性、高速性及び定時性に優れた公共輸送機関として、通勤・通学を始めとする旅客輸送や貨物輸送において、大変重要な役割を担っており、輸送人員としては毎年度約 230 億人以上の輸送を支えている主要交通機関である。

鉄道施設のストック量は、明治 5 年の新橋・横浜間の開業以来、順次、整備され、現在は路線延長としては 25,000km を超えている。また、このうち橋りょう、トンネル数については、2012 年末時点で、全国において、橋りょうが約 100,000 橋、トンネルは約 5,000 本整備されている²⁾。

これら構造物については、その多くがやはり高度経済成長期に整備されたものであり、図 1-1-1 に示すとおり、建設後 50 年以上が経過している構造物の割合が橋りょうは約 50%、トンネルは約 60%と多くの割合を占めている状況である²⁾。この様な状況の中、鉄道構造物の維持管理は大変重要であり、各鉄道事業者は長寿命化等への取組を実施している。

橋りょう総数：102,293橋(1m以上)

トンネル総数：4,737本



注) 平均年齢は、建設年度が把握されている施設の平均

出典: 国土交通省調べ

図 1-1-1 鉄道施設のストック量²⁾

1.1.2 鉄道構造物におけるはく落事象

2012年度、2013年度に、全鉄軌道事業者(204事業者)における、トンネルや高架橋等からのコンクリート片等の剥離、落下(剥離した又は同時に落下したと推定されるコンクリート片等の重量の合計が概ね1kg以上となるもの)は、表1-1-2に示すとおりそれぞれ66件、47件であった³⁾。

表 1-1-2 コンクリート片、モルタル片のはく落数⁴⁾

	2012年度		2013年度	
	件数	事業者数	件数	事業者数
トンネル	34	5	18	7
橋梁	2	9	21	7
その他の構造物	10	4	8	5
合計	66	14	47	17

2012年12月の中央自動車道笹子トンネル事故や鉄道構造物のはく落事象を踏まえた「鉄道構造物の維持管理に関する基準の検証会議」⁴⁾によれば、これらのはく落事象において、橋梁のはく落事象については、公衆の安全に影響を及ぼすおそれのある箇所へのもの、トン

ネルのはく落事象の中には、列車の安全な運行に支障するおそれのある箇所へのものもあったことが報告されている。また、いずれのはく落事象の発生も、それぞれの構造物に対する直近の定期検査において、その発生の予兆を捉えることができなかったという課題も報告されている。

1.1.3 少子高齢化社会、人口減少

一方、少子高齢化の進行により、我が国の総人口は図 1-1-2 に示すとおり、2008 年の 12,808 万人をピークに減少に転じており、生産年齢人口（15～64 歳）も 1995 年の 8,717 万人をピークに減少に転じている。将来推計では、総人口は 2065 年には 8,808 万人にまで減少すると見込まれており、生産年齢人口は 2065 年には 4,529 万人にまで減少すると見込まれている⁵⁾。

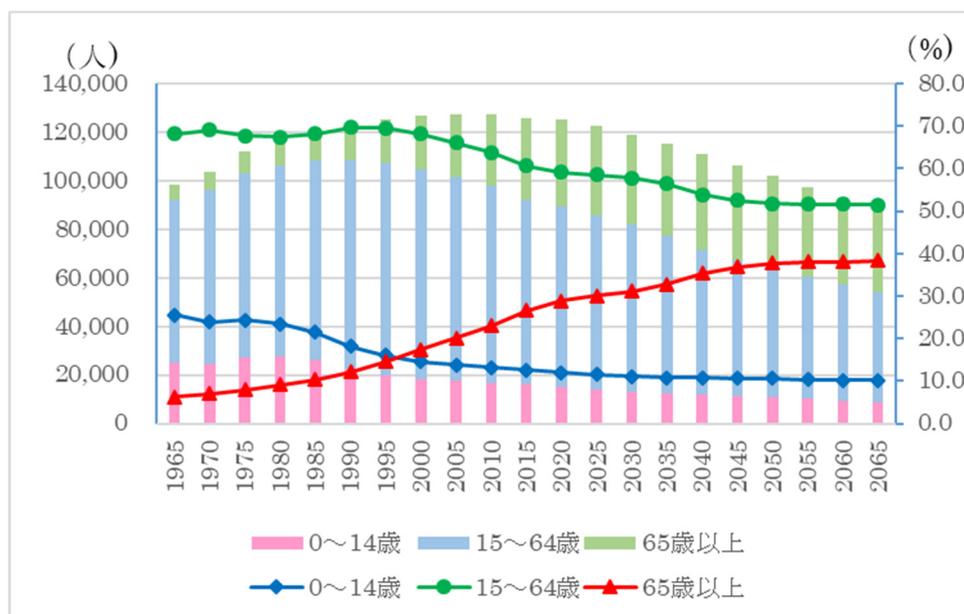


図 1-1-2 我が国の人口推移⁵⁾

これらのことから、中長期的には鉄道構造物の維持管理においては、技能労働者の担い手不足や、技術継承が懸念されている。このような人口減少に伴う供給制約や、担い手不足を克服するため、機械化や維持管理データの活用により、効率的かつ質の高い維持管理への変化が重要となる。特に、はく落事象については、その前段である浮きを検出する手法として、人による近接目視及び打音検査が主体となっており、非常に労力を要するという特徴があり、非接触・非破壊検査の開発等、検査業務における効率化が喫緊の課題となっている。

1.2 研究の目的と概要

地下鉄トンネルの維持管理においてコンクリートの「はく落」は、列車運行の安全を確保する上で大きな問題である。地下鉄トンネルにおける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。すなわち、はく落は「浮き」や「はく離」から進展して発生すると考えられるので、地下鉄トンネルの維持管理においては、はく落に至る前の「浮き・はく離」を正確に検知する技術が求められている。

特に、本研究で対象とする「浮き」は、鉄筋のかぶり不足の箇所等、コンクリート表面付近に存在し、ひび割れが確認できない、将来はく落の恐れのある空隙部をいう。また、「はく離」は、コンクリート表面に対して鋭角なひび割れで発生し、直角に近いひび割れでは生じない。このため「浮き・はく離」は、コンクリート表面のひび割れの目視のみでは、検出することが難しい(図 1-1-3)。このことから、現在、「浮き・はく離」の検出は、検査員による打音検査を主体に行われている。

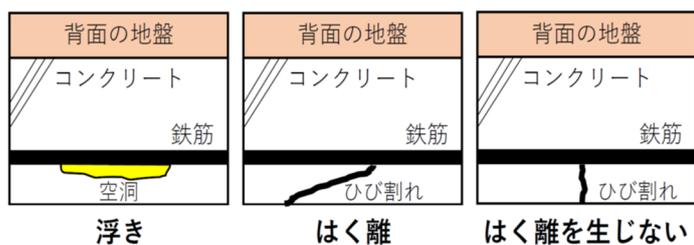


図 1-1-3 浮き・はく離の概念

しかし、打音検査においては、以下のような課題がある。

- ① 検査員が構造物を直接打音することから点検速度に限界がある。
- ② 高所作業車両や仮設足場が必要である。
- ③ 全面積の打音は非常に時間と手間を要することから、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。このため、検査員の経験や能力の違いで見落としや打音もれ等、結果にバラツキが生じる。
- ④ 結果についてデータ整理や図化作業が煩雑になる。

また、近い将来地下鉄トンネル構造物の経年増加により点検の必要性が高まる一方で、少子化・高齢化等により夜間の検査要員確保が課題となることが予測される中、的確さを保ったまま効率的なトンネル変状箇所の検出が今後必須となる。

以上のようなことから、本研究は地下鉄トンネル覆工コンクリートの赤外線熱計測と綿密な打音検査結果をもとに浮き・はく離を、非破壊・非接触で効率的に検出できる検査方法(以下、赤外線法)を検討するとともに、地下鉄トンネルの維持管理に確実に適用する方法について考察したものである。なお、打音検査場所を選定する際の目視では「はく離」は選定が可能であるが、「浮き」は選定が困難である。一方、赤外線法では「浮き」と「はく離」

を区別することが困難であり，赤外線法で検出された箇所は，実際に現地で目視及び打音検査で確認することを前提としているので，以後，本論文では簡単のために「浮き」と記述する．

1.3 論文の構成と内容

以下に、本論文の構成を示す。

第1章では、老朽化した社会資本インフラに対する効率的な維持管理の必要性、鉄道構造物におけるはく落事象、およびはく落の前段としての「浮き」検出における課題といった、研究の背景、研究の目的について述べる。

第2章では、既往の研究について、都市トンネルの変状、鉄道トンネルのコンクリートはく落事故を踏まえた検査体系の変化を前提として、検査方法の機械化の事例について述べる。さらに、赤外線法による浮きの検出についての研究事例について述べ、まだ研究されていない地下鉄トンネルにおける赤外線法の適用の課題について述べる。

第3章では、東京メトロのトンネル構造物の維持管理について説明する。構造物の概要や特徴を述べたあと、検査の体系と通常全般検査および特別全般検査の概要について述べる。また、将来、赤外線法による検出結果との組み合わせが期待される、検査データや修繕データの蓄積、データの可視化、データ解析等の維持管理のICT化の状況について述べる。

第4章では、予備検討として、実際に地下鉄トンネル内において赤外線法により、浮きの検出が可能であることと、また、季節による浮きの検出率の傾向について報告する。

第5章では、予備検討を踏まえて、開削トンネル約2kmの区間において、トンネル内の温度環境を計測した結果、また、選定した13地点において、打音検査の結果と赤外線法の結果を比較した結果について報告する。これにより明らかになった、赤外線法による浮きの検出が可能な温度環境について報告する。

第6章では、開削トンネルの結果を踏まえて、シールドトンネルにおいて、赤外線法による浮きの検出を行った結果について報告する。また、浮きのランクの概念を導入し、赤外線法により危険度の高いランクの浮きについては、殆ど検出が可能であることについて説明する。

第7章では、実務への適用を考慮して、まずは第5章で明らかになった、赤外線法による浮きの検出が可能な温度環境と外気温の関係を整理し、赤外線法の計測日の決定方法について報告する。また、開削トンネル約500m区間において実施した綿密な全面打音検査を行った結果と、特別全般検査および赤外線法による計測結果との比較について報告し、赤外線法の有効性について説明する。さらに、赤外線法において課題となる過検出の低減方法について説明する。

最後に、第8章では、第7章の結果を踏まえて、赤外線法について、トンネル維持管理の実務への適用方法について述べる。

図1-3-1に本研究の流れを示す。

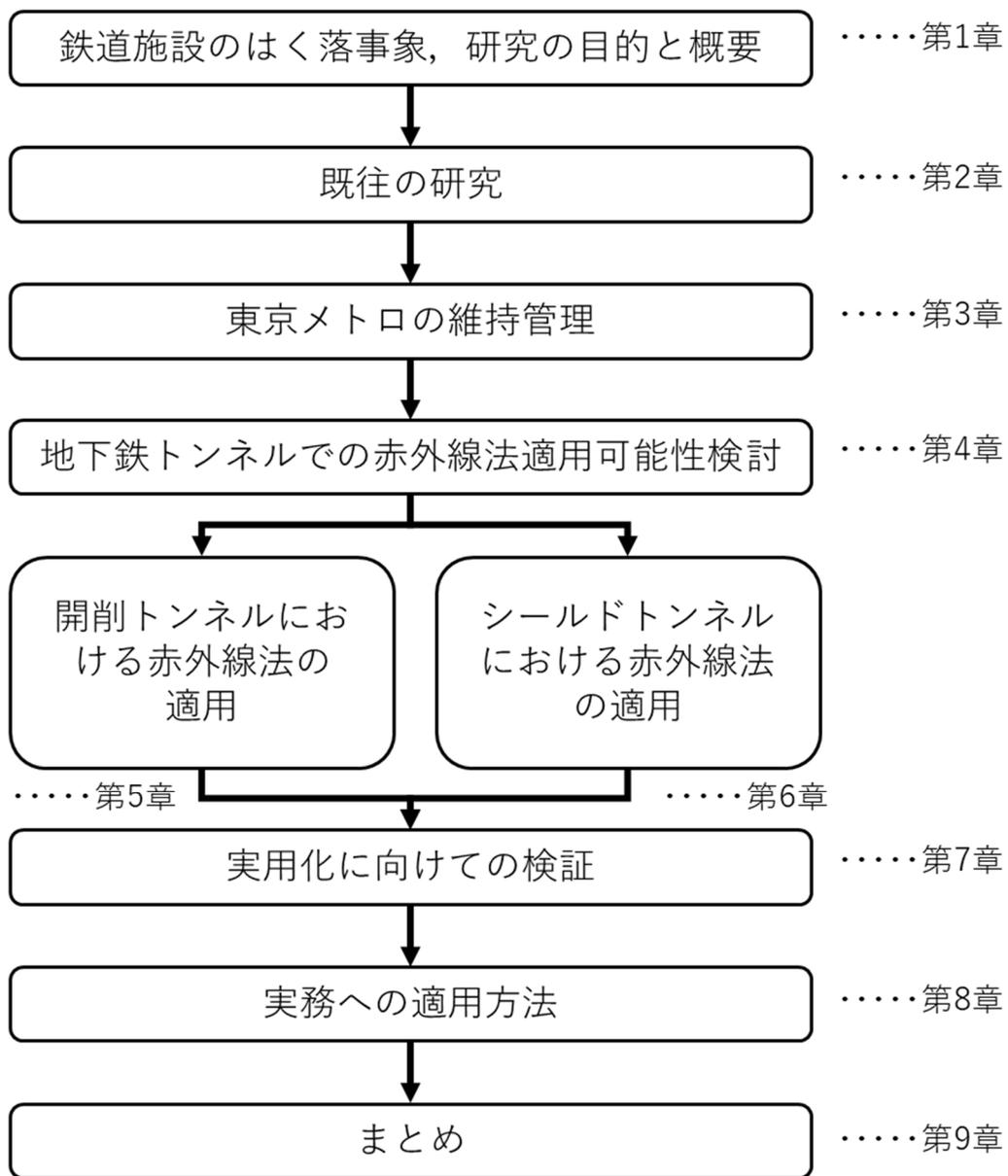


図 1-3-1 本研究の流れ

【第1章 参考文献】

- 1) 平成29年度国土交通白書，第1章第2節
- 2) 水野寿洋：鉄道構造物の維持管理に関する取り組みについて，建設マネジメント技術，2015年12月号，pp74-pp79
- 3) 国土交通省報道資料，鉄道構造物における剥落事象について，平成26年9月24日
- 4) 鉄道構造物の維持管理に関する基準の検証会議：鉄道構造物の維持管理に関する基準の検証について（とりまとめ），平成26年11月25日
- 5) 平成29年度国土交通白書，第1章第1節

第2章 既往の研究

2.1 地下鉄トンネルの変状

鉄道の最大の使命は、安全で安定した輸送を確保することである。そのため、地下鉄ではトンネルを健全に保つ必要がある。

健全でないトンネルとは、変状のあるトンネルのことである。一般的にトンネルの変状と呼ばれているものは、ひび割れ、目地切れ、剥離・はく落、変形・はらみ出し、漏水・有害水、材料劣化、鉄道における軌道狂い、汚損、土砂流入、つらら・側氷などがあげられる¹²⁾。

表 2-1-1 に、鉄道の維持管理標準に示されている鉄道トンネルの要求性能と性能項目の例を示す³⁾。維持管理では、これらトンネルの変状に対して、トンネルの要求性能が保たれるように、対策をとることが必要である。

表 2-1-1 鉄道トンネルの要求性能と性能項目³⁾

要求性能	性能項目	具体的な内容
安全性	① トンネル構造の安定性	トンネルが崩壊しないこと
	② 建築限界と覆工との離隔	建築限界を支障しないこと
	③ 路盤部の安定性	列車の安全な運行に支障するような路盤の隆起・沈下・移動が生じないこと
	④ はく落に対する安全性	列車の安全な運行に支障するようなコンクリート片、補修材等のはく落が生じないこと
	⑤ 漏水・凍結に対する安全性	列車の安全な運行に支障するような漏水、凍結が生じないこと
使用性	⑥ 漏水・凍結に対する使用性	漏水・凍結が坑内設備の機能に影響を及ぼさないこと
	⑦ 表面の汚れ	検査に著しく支障するような汚れがないこと
	⑧ 周辺環境に与える影響	周辺環境に有害な影響を与えないこと
復旧性	⑨ 災害時等の復旧性	復旧対策が必要となるような災害時の偶発的な作用を受けた場合でもトンネルが崩壊せず性能回復が容易に行えること

この対策は、変状の原因に応じて、劣化・はく落対策工、漏水・凍結対策工、外力対策工などが行われる。山岳部のトンネルでは、土圧や地すべりなどの外力や環境による変状事例が多く報告されており¹⁾、これらに対する研究が鉄道総研等で数多く行われてきた⁴⁾⁵⁾。

一方、都市部のトンネルでは、外力による変状事例は近接施工、地盤沈下によるものが僅かに報告されているのみで⁶⁾⁷⁾⁸⁾問題になっているのは、主に塩害や中性化などの環境による材料劣化に起因する変状である。図 2-1-1 から図 2-1-7 に鉄道総研が行った地下鉄トンネルの変状のアンケート調査結果を示す⁹⁾。調査対象は、主に 1985 年以前に築造された 121 工区のシールドトンネルである。ほとんどのトンネルで、ひび割れや漏水がある事、塩害や裏込め注入不足、乾燥収縮、鉄筋かぶり不足による変状が多い事、対策としては、止水、表面

被覆，防錆処理などのはく落対策が多い事がわかる．地下鉄トンネルは，RC コンクリート構造物の箱型トンネルとシールドトンネルがほとんどであり¹⁰⁾，発生頻度が多く，車両の安全安定運行上の課題になっているのが，漏水や塩害による内部鉄筋の腐食によるかぶりコンクリートのはく落である¹¹⁾．

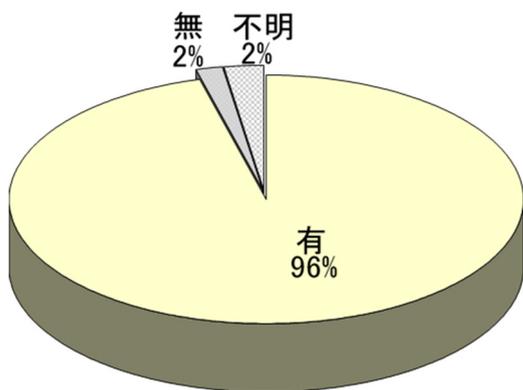


図 2-1-1 ひび割れの発生状況⁹⁾

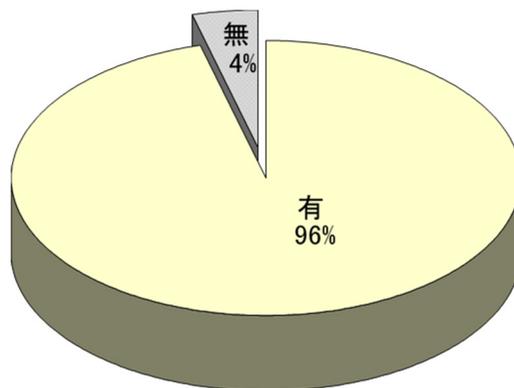


図 2-1-2 漏水の発生状況⁹⁾

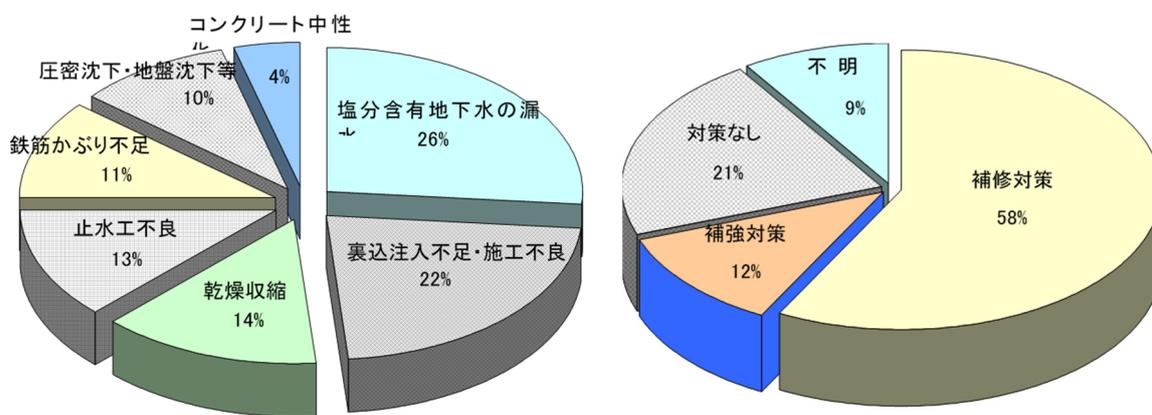


図 2-1-3 変状原因⁹⁾

図 2-1-4 補強・補修対策の実施状況⁹⁾

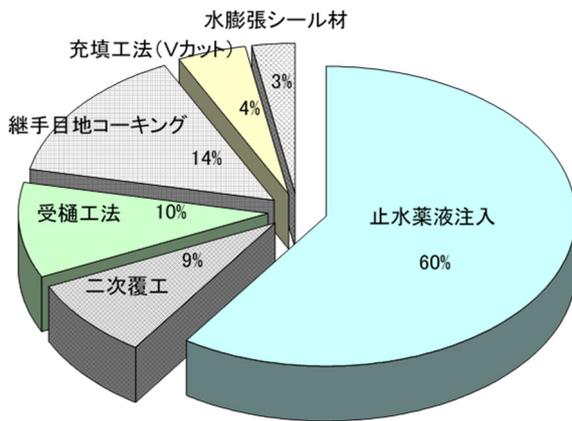


図 2-1-5 止水処理の状況⁹⁾

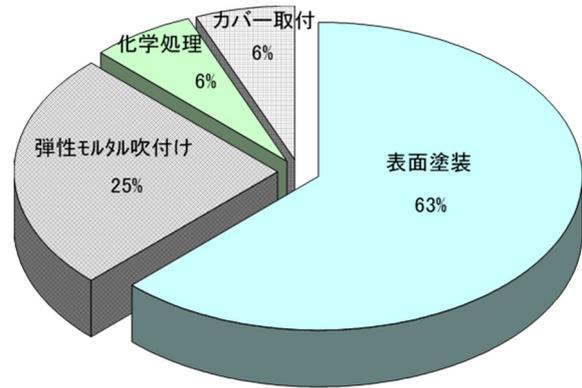


図 2-1-6 防錆処理の状況⁹⁾

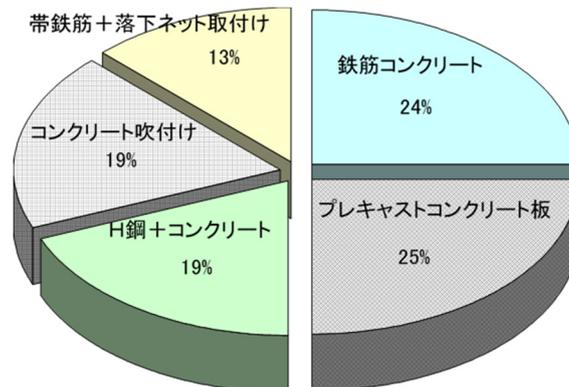


図 2-1-7 補強対策の状況⁹⁾

2.2 検査体系の変化

2.2.1 事後保全から予防保全への流れ

トンネルの検査体系の変化について述べる。

維持管理の考え方には、以下の3種類¹²⁾がある。

- ① 構造物の機能低下をそのまま放置し、機能を失う前に取り替える。
- ② 構造物の機能低下が進行した時点で補修を行い、機能の復元を図る。(事後保全)。
- ③ 構造物の機能低下前あるいは低下の初期段階で補修を行い、機能の復元を図る。(予防保全)。

鉄道の1965年(昭和40年)頃以前の維持管理の体系は、何か問題が発生してから対処する、いわゆる事後保全であった。但し、昔は橋梁での橋守(はしもり)の様に、対象の構造物の近くに住み日々その構造物の世話をする担当の工夫がいた。しかし、戦争中や戦後に維持管理を行わなくなり、構造物が荒廃したことから事故が多発するようになった。このよ

うなことから、先輩技術者たちの努力の末、1965年（昭和40年）頃を境に事後保全から予防・事後を組み合わせた効率的な保全に変わり、自然災害等による事故が急激に減少した（図2-2-1）¹³⁾。1973年（昭和48年）には、取替え標準¹⁴⁾が制定された。この体系は、現在の維持管理の体系であり、事前に定期的に検査を行って健全度判定を行い、弱点箇所や変状箇所を抽出し詳細な検査を行い、必要な場合は措置（監視、補修・補強等）を行うといったものである。図2-2-2¹⁵⁾に、建造物の経年劣化の概念を示す。

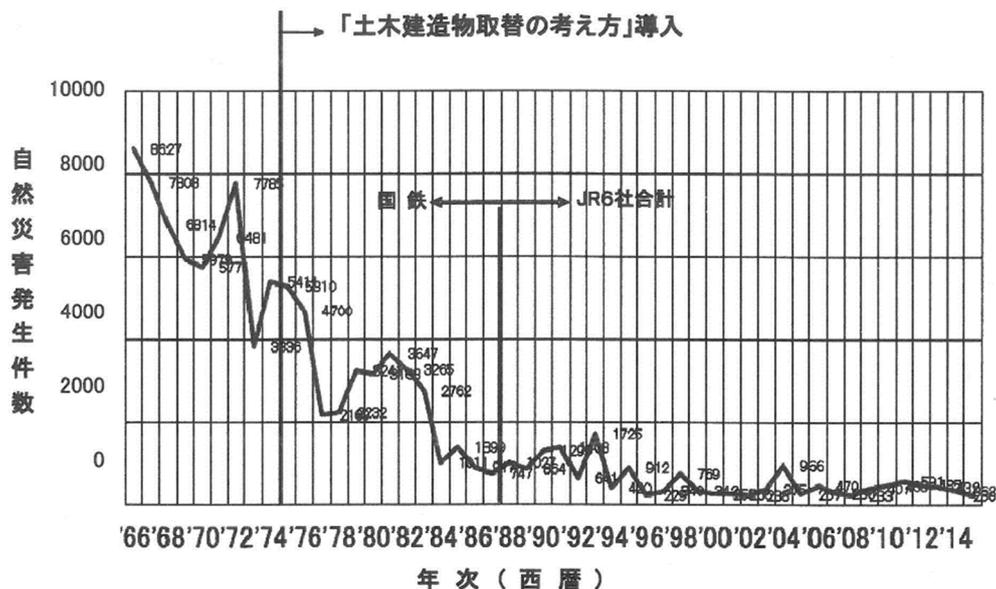


図2-2-1 鉄道全般における自然災害発生件数の推移¹³⁾

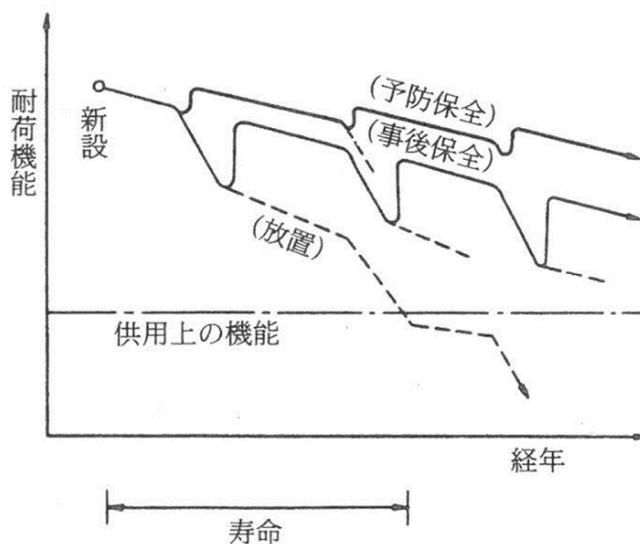


図2-2-2 建造物の経年劣化の概念図¹⁵⁾

2.2.2 鉄道トンネルのコンクリートはく落事故

① 山陽新幹線福岡トンネル事故

1999年に鉄道で大きなはく落事故が発生し、そのメカニズムや点検方法の研究が進められた¹⁶⁾。1999年6月27日に発生した山陽新幹線福岡トンネルのはく落事故では、事故現場の架線が破損したほか、「ひかり351号」の9号車の屋根が幅50cm、長さ10mに渡ってめくれ、10号車、12号車のパンタグラフが破損。11-12号車は数箇所の陥没が確認された。調査の結果、トンネル天井部にあったコンクリートの一部分(2m×50cm×50cm)が落下し、架線を切断するとともに車両を直撃して停電したものと判明した(写真2-2-1、図2-2-3)。トンネル内のコンクリートが落下した原因は、福岡トンネルの施工不良によってできたコールドジョイントの劣化が早く、ひび割れが発生していき、さらに新幹線の高速走行の衝撃でコンクリート塊の劣化が進行、最終的に落下したと推定された。

この重大事故に対して、直ちに、トンネル安全問題検討会が旧運輸省内に設置され、原因究明や対応策が検討された。



写真 2-2-1 福岡トンネルのはく落跡¹⁷⁾

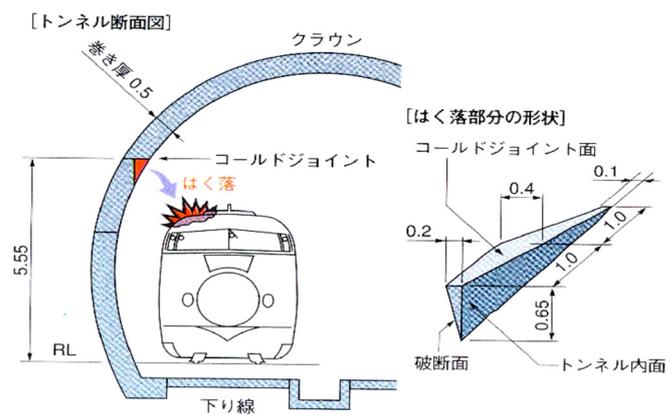


図 2-2-3 福岡トンネルのはく落事故¹⁷⁾

② 山陽新幹線北九州トンネル事故

1999年10月9日山陽新幹線北九州トンネルで、コンクリート塊（横334cm、縦40cm、厚さ15cm、総重量226kg）が線路わきに落下しているのが見つかった。北九州トンネルはアーチ部のコンクリート覆工を施工した後、側壁の型枠とアーチコンクリートの間に突起状の打ち込み櫛を設けて側壁コンクリートを逆打ちして施工されたが、この突起が、撤去されずに残されていた。側壁の沈下等の理由から、突起部と側壁本体との間にひび割れが発生し、長期に渡る漏水・温度変化・列車振動などによりひび割れが進展し、はく落したと推定されている（写真2-2-2、写真2-2-3、図2-2-4）。問題になったのは、福岡トンネルの事故後、JR西日本で同様のはく落が起これりそうな箇所を見つけるため徹底した調査を行ったが見つけられなかったことであった。



写真2-2-2 北九州トンネルのはく落跡¹⁷⁾ 写真2-2-3 北九州トンネルのはく落コンクリート¹⁷⁾

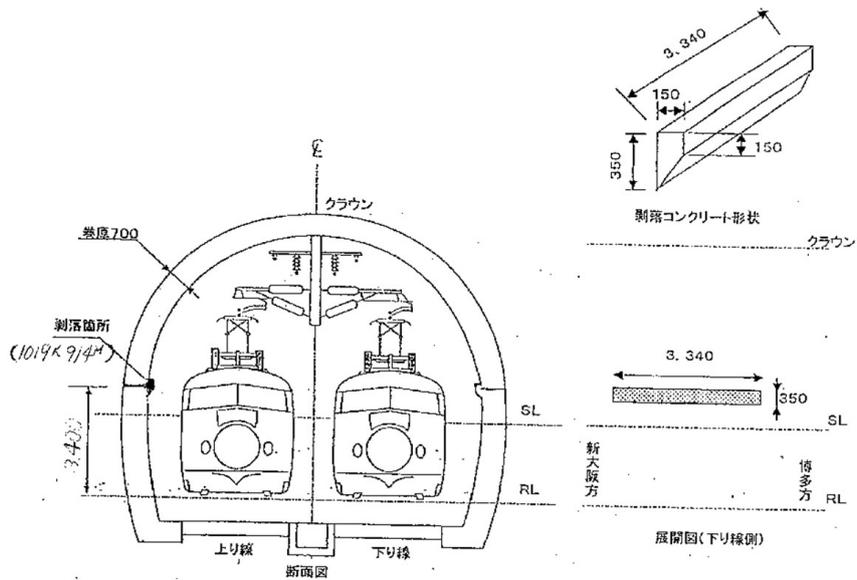


図2-2-4 北九州トンネルのはく落事故¹⁷⁾

③ JR 北海道室蘭トンネル礼文浜トンネル事故

1999年11月28日に発生したJR北海道室蘭線礼文浜トンネルのはく落事故では、トンネル天端から約2トンのコンクリート塊が線路上に落下し、貨物列車が乗り上げて脱輪した。この落下跡は円錐状のはく落跡があり、周辺には、ほぼ円形および放射状の亀裂があった(写真2-2-4, 図2-2-5)。この事故より前に、鉄道総研では山岳トンネル無筋覆工の模型実験で押し抜き剪断破壊の実験を行っていたが、亀裂等ほぼ同じ実験結果が見られたことから、外力による典型的な「押し抜き剪断破壊」によるものと判断された(写真2-2-5, 写真2-2-6, 写真2-2-7, 図2-2-6)。まず、覆工コンクリートの打設後、比較的早い時期に上部の地山が緩み、アーチ天端付近の突出した岩塊より局所的な地圧が覆工に作用した。次に、この地圧の作用により、突出岩塊を中心とした放射状のひび割れが生じた後、押し抜きせん断破壊が生じて破壊面が形成された。さらに、列車振動や凍結融解の繰り返し等により、破壊面の先端部に徐々にひび割れが進展した。最終的には、はく落塊を支えていた部分に自重により新たな破壊面が生じて落下したと推定された。



写真2-2-4 礼文浜トンネルのはく落跡¹⁷⁾

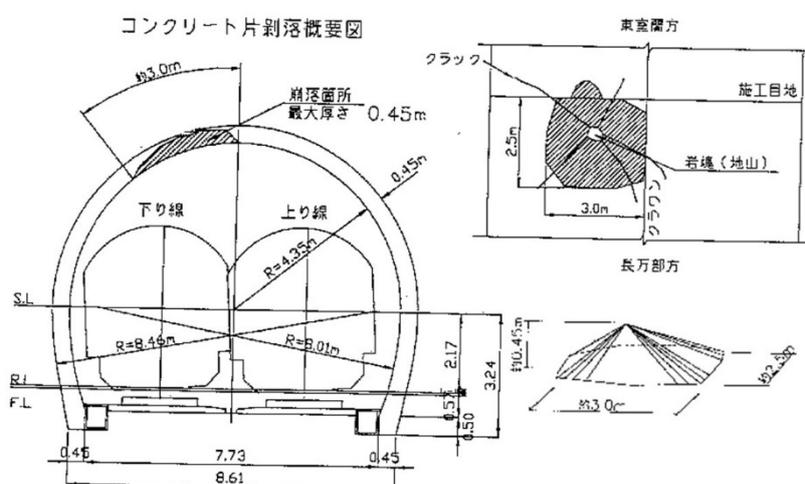


図2-2-5 礼文浜トンネルのはく落事故¹⁷⁾

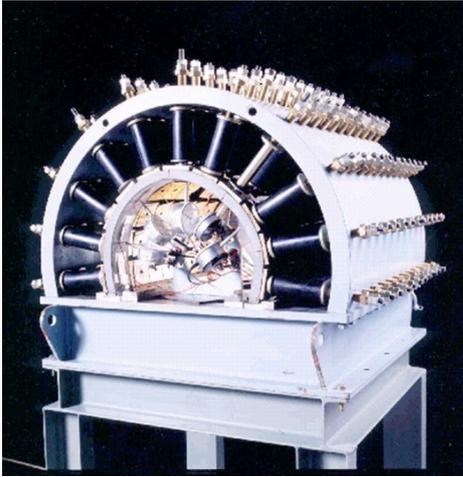


写真 2-2-5 トンネル覆工模型試験機



写真 2-2-6 押抜きせん断されたトンネル覆工

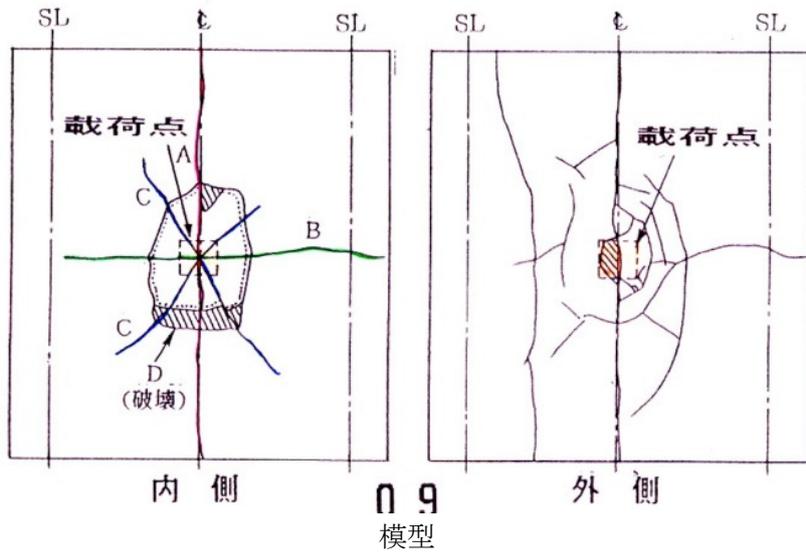


図 2-2-6 トンネル覆工模型試験結果 (ひび割れスケッチ)



写真 2-2-7 礼文浜トンネルのはく落箇所付近のひび割れ状況

1999年12月「運輸技術審議会鉄道部会技術基準検討会中間とりまとめ」¹⁷⁾が出され、「機能の確認のために最低限確保すべき検査の周期は、過去の実績や経験等を勘案し、国が一定の基準を示すことが必要」とされた。

2000年2月には、トンネル安全問題検討会報告書¹⁷⁾がまとめられ、トンネル保守管理マニュアルが制定された。このマニュアルで、以下の点が示された。

- 1 検査周期が2年以内、
- 2 詳細検査は近接目視と打音で新幹線で10年以内、在来線で20年以内、
- 3 判定方法等の規定

2.2.3 鉄道の維持管理標準

はく落事故の後、鉄道において、維持管理方法が議論され、現在行われている検査体系が国土交通省により基準化された³⁾。

維持管理標準は、鉄道施設等の検査方法や検査周期など維持管理に関する技術基準で、国土交通省において2007年（平成19年）2月から施行され、すべての鉄道事業者が同じ体系で維持管理を行う事になった。維持管理標準では、以下の方針で構造物維持管理が体系化されている。

1. 列車運行と旅客公衆の安全性を確保するための性能照査型の体系を構築する、
2. 幅広い技術レベルからなる全ての鉄道事業者に適用できる体系とする、
3. すべての構造物に共通する体系とする、
4. これまでの維持管理体系を大きく変更しない。

維持管理標準は、コンクリート構造物、鋼・合成構造物、基礎・抗土圧構造物、土構造物（盛土・切土）、トンネルの5編に分れ、それぞれ、総則、維持管理の基本、初回検査、全般検査、個別検査、随時検査、措置、記録、付属資料といった構成になっている。内容としては、

1. 維持管理の性能規定化
2. 検査の区分
3. 検査の周期
4. 検査員
5. 調査項目と方法
6. 健全度判定
7. 措置
8. 記録

の考え方と方法が記載されている。

構造物では、経年とともに低下する本体あるいは部材の性能を継続して必要な水準以上に留めなければならない。そのため、設計・施工時の配慮のほか適切な維持管理を行うこと

が極めて重要になる。すなわち、「設計・施工のみならず維持管理を含めて供用中の構造物の性能をある水準以上に確保する」ことが性能規定型の体系の基本的な考え方である。この性能を、安全性、使用性、復旧性の3つに区分し、例えば、トンネルでは、安全性は、「列車が安全に走行するとともに落下物等により周辺の人命が脅かされないための性能」、について取り扱うことにし、また、使用性、復旧性については必要に応じて適宜設定することにし、表 2-1-1 に示す性能項目に整理されている。

実際の維持管理は、構造物の検査の周期、方法等を定めた維持管理計画に基づいて、一般に図 2-2-7,2-2-8 に示す手順で行う。

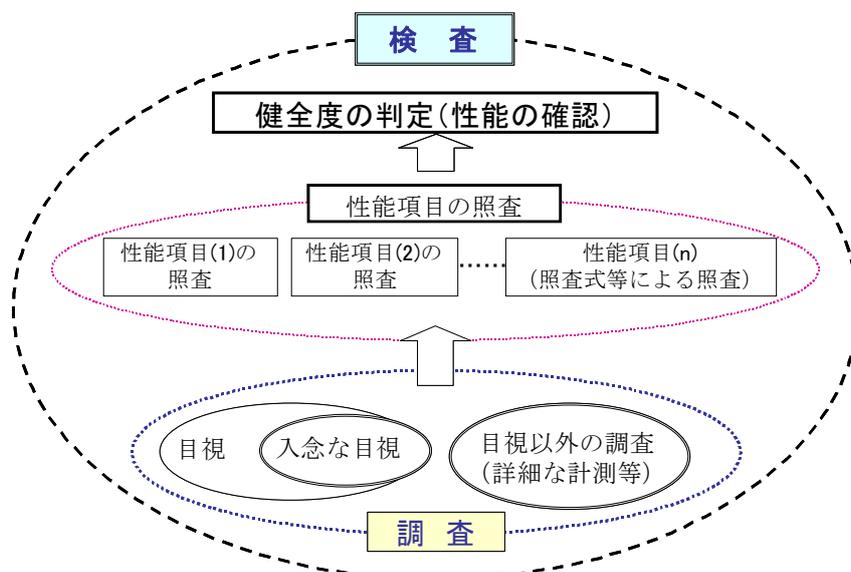
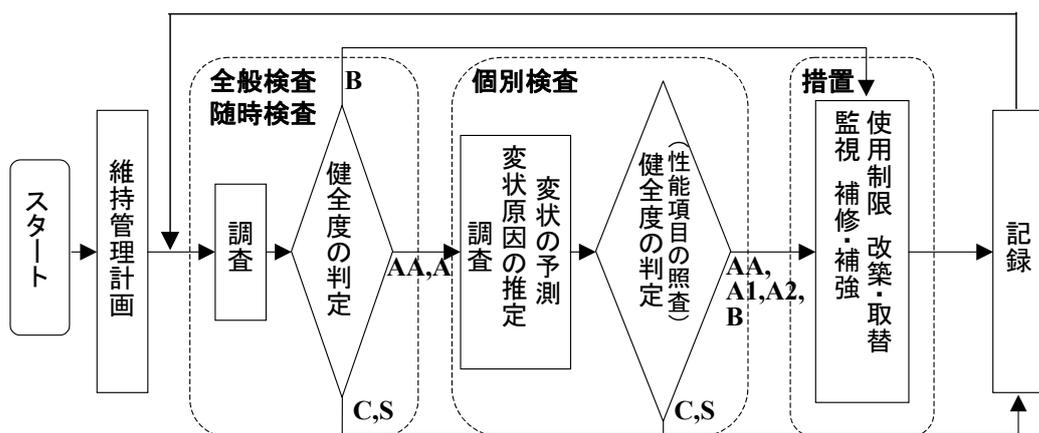


図 2-2-7 検査における性能の確認の考え方³⁾



※ アルファベット:健全度 (表 3-3 参照)

図 2-2-8 鉄道構造物の維持管理の流れ³⁾

検査は、初回検査、全般検査（通常全般検査、特別全般検査）、随時検査に区分され（表 2-2-1）、全般検査で健全度の全体把握と共に個別検査や措置の要否を判定する（表 2-2-2、表 2-2-3）。この検査では、外力・劣化・漏水等による機能障害に対する検査とともに、トンネルや高架橋では、はく落に対する検査も行うが、その手順は次のとおりである。

1. 全体の目視検査を行った上で必要な箇所の打音検査を行う。
2. 打音検査で「濁音」が生じる場合は、可能な範囲で叩き落とす。
3. はく落に対する判定（ α （要対策）、 β （要注意）、 γ （問題なし）の3つに区分されている）を行い、 α に判定されたものについてははく落対策工を施す。

表 2-2-1 鉄道トンネルにおける検査区分³⁾

検査区分	内 容
初回検査	初期状態の把握を目的に新設時等の供用開始前に実施する検査。至近距離からの目視と打音。
全般検査	健全度の全体把握と共に個別検査や措置の要否を判定するための定期的な検査。
通常全般検査	2年毎に実施。目視と打音主体。
特別全般検査	トンネルでは新幹線 10 年、在来線 20 年毎に実施。至近距離からの目視と打音。
個別検査	全般検査、随時検査で「健全度 A」の場合に実施する検査で、変状程度および性能の把握、変状原因の推定、措置の要否や時期、方法等の精査を行う。
随時検査	地震や大雨等で変状が発生した場合など必要な場合に実施。

表 2-2-2 鉄道トンネルにおける健全度判定区分³⁾（1）はく落以外の安全性に対する判定

健全度	運転保安，旅客および公衆などの安全に対する影響	変状の程度	措置等
A	AA 脅かす	重大	緊急に措置
	A1 早晚脅かす。異常外力の作用時危険	進行中の変状等。性能低下も進行	早急に措置
	A2 将来脅かす	性能低下の恐れがある変状等	必要な時期に措置
B	進行すれば健全度 A になる	進行すれば健全度 A になる	必要に応じて監視等の措置
C	現状では影響なし	軽微	次回検査時に必要に応じて重点的調査
S	影響なし	なし	なし

表 2-2-3 鉄道トンネルにおける健全度判定区分³⁾ (2) はく落に対する判定

健全度	変状の状態
α	近い将来、安全性を脅かすはく落が生じる恐れがあるもの
β	当面、安全性を脅かすはく落が生じる恐れがないが、将来健全度 α になる恐れのあるもの
γ	変状が認められるものの、安全性を脅かすはく落が生じる恐れがないもの

2.2.4 道路トンネルのコンクリートはく落事故と検査基準

2012年(平成24年)12月2日に中央自動車道上り線笹子トンネルで天井板のコンクリート板が約130mの区間にわたって落下し、走行中の車複数台が巻き込まれて9名の方が死亡した。この事故では、トンネルの構造部材ではない天井板が崩落したことで、これまで注目度が薄かった懸架設備の健全性やあと施工アンカーの安全性の評価が重要であることが指摘された。その後、天井板の撤去、接着系アンカーおよび部分接着工法の禁止、鋼板接着工法等の落下懸念工法の見直しが行われている。この後、道路トンネルの点検に関して、2013年(平成25年)6月の道路法が改正され、近接目視により5年に1回の頻度を基本として定期点検を行い、その結果に基づいて健全性の診断を行い、その結果を、I(健全)～IV(緊急措置段階)の4段階で分類することとなった。このような定期点検を行うにあたり、主として要領や参考図書等が出された^{18) 19) 20)}。

2.2.5 新技術の導入

鉄道構造物等維持管理標準では、トンネル覆工の点検(全般検査)は、目視主体で必要に応じて打音検査をすることになっている。しかし、技術の発展に応じて新しい技術も取り込める様に、特別全般検査の調査方法の記述箇所の解説に「なお、近年、機械的な手法を用いた新たな調査方法が開発されているが、入念な目視や人手による打音調査と同等かそれ以上の精度を有することが確認されている場合は、その手法を目視や打音調査に変えて用いてよい」と記述されている。このことから、点検の機械化について様々な研究開発が進められてきた。機械化が目標とするメリットは以下のものと考えられる。

- ① 人による検査結果のバラツキがなくなる
- ② 短時間で検査ができる
- ③ 結果が正確である
- ④ 直接デジタルデータにできる

2.3 検査の機械化

2.3.1 目視検査の機械化

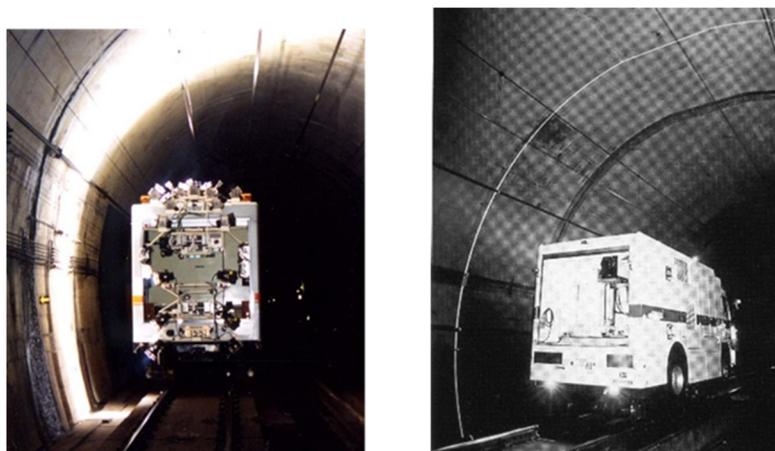
目視検査は、目視で覆工表面の状態を観察し、検査者の知識・経験・技術や視覚・聴覚等によって健全性を判定する。検査結果は、一般的に変状展開図として整理され、ひび割れや漏水の箇所、規模等を特定、記録するのに用いられている。目視検査は比較的簡易に長い区間を大量に検査できる利点があるが、検査結果の数量化が難しく、また、検査者の知識・経験による個人差や検査時の環境に結果が左右されるといった欠点がある。そこで、目視検査・スケッチの機械化が進められてきた。すなわち、今後の維持管理作業の省力化や無人化も目的として、覆工表面の鮮明な映像を連続的に撮影し、画像処理を行うことで変状展開図を作成し、ひび割れ等の変状の自動抽出や健全度判定を行う技術が研究開発されてきた。

表 2-3-1 覆工表面を連続的に撮影・記録するシステム等の例³⁾

手 法	概 要	主な仕様	適用実績
ラインセンサカメラ (連続走査画像)	走行しながら壁面を走査して画像を得、 連続走査画像から展開図を作成	15km/h(単線) 27km/h(複線、片側) 幅 1mm のクラック検出	JR 東海(トンネラス) ・1999 年度から稼働 ・在来線
		10km/h 幅 1mm のクラック検出	JR 北海道 ・2002 年度～稼働
		10km/h 程度 0.5～1mm の解像度 ※上記よりも簡易な撮影システム	鉄道総研 (トンネルスキャナ) ・2004 年度から稼働 ・民鉄等
レーザー	レーザービームで全周をスキャンし画像処理を 施して連続壁面画像を得、展開図を作成	4～7km/h 以下 幅 0.5mm のクラック検出	JR 東日本 ・2000 年度から稼働 ・新幹線・在来線
		2.8～17km/h 幅 0.5mm のクラック検出	JR 西日本(SATUZO) ・2001 年度から稼働 ・新幹線・在来線
スリットカメラ	走行速度とフィルムの送り速度を同調したカメラにより連続壁面写真を得る	30-40km/h 幅 1mm 以下の解像度	JR 西日本 ・1995～1997 年度に神戸支社にて実施 ・新幹線
パノラマカメラ	パノラマカメラによりトンネル輪切り方向に撮影したものを画像処理により繋ぎ合せ、連続壁面展開図を作成	1 晩で 1km 幅 0.2～0.3mm のクラックも検出可能	近鉄 ・1991 年度から稼働
マルチパス方式 レーザー※	マルチパス方式のレーザーで全周をスキャンし、 覆工コンクリートの表面状況と内部状況を 3 次元的に捉える。	最高 3.5km/h	JR 東日本 ・2004 年度から稼働 ・新幹線

1980 年代にパノラマカメラやスリットカメラが実務に活用された。その後、2000 年前後には前述のラインセンサカメラやレーザー等による撮影・記録システムが実用化された(表 2-3-1)。例えば、鉄道総研で開発した「連続走査画像撮影システム」(写真 2-3-1 a)は、複数のカメラで分割して撮影したトンネル覆工の画像から、ひずみ等を補正して重ね合わせ、トンネル延長方向および横断面方向に切れ目のない鮮明な一枚の展開画像(写真 2-3-2)を作成するもので、JR 東海と JR 北海道ですでに実用化されている²¹⁾。最近は、レーザーによる三次元点群データでの管理も最近行われるようになってきた(写真 2-3-3)撮影画像の精度については、画像撮影画角は最近 10 年間で 2.5mm/pix から 1.5mm/pix に改善され、より小さなひび割れを認識できるように開発が進められている。一方、走行速度については、70km/h でも十分な撮影精度を確保できるようになってきた。

また，変状展開図作成ツールの開発，ひび割れや浮き・はく離を抽出する画像処理アルゴリズムの開発・実用化の研究も行われている²²⁾。



(a)ラインセンサカメラ

(JR 東海, 北海道)

(b)レーザー

(JR 東日本, 西日本)

写真 2-3-1 覆工の自動撮影システムの例²¹⁾



写真 2-3-2 覆工展開画像の例 (ラインセンサカメラ)²¹⁾



写真 2-3-3 レーザーによる三次元点群データシステム

2.3.2 打音検査の機械化

浮き・はく離，空洞のような覆工内部の欠陥の調査については，打音検査が標準的に用いられてきた．しかし，その判定には検査者の個人差が出やすく，客観的な診断の観点で問題がある．このようなことから，近年では打音検査を機械的に行うシステムが研究開発されてきている．具体的には，電磁波（レーダ），打撃音，レーザー光，超音波，衝撃弾性波，音響打撃波，熱赤外線等によるトンネル覆工の非破壊検査法が研究開発されてきた（図 2-3-1,2-3-2,2-3-3,写真 2-3-4,2-3-5）．

この中で電磁波（レーダ）については，無筋のトンネル覆工の厚さや背面空洞の存在を探索する手法として多くの採用実績が確認されており，複数のレーダを搭載した覆工検査車を活用することでコンクリート内部の欠陥（ひび割れや剥離）を立体的に抽出することが可能となっている．

今後の課題としては，照明，電車線や信号ケーブル，漏水防止工等の添架物が存在しても能率的に検査できる手法の開発が求められている．

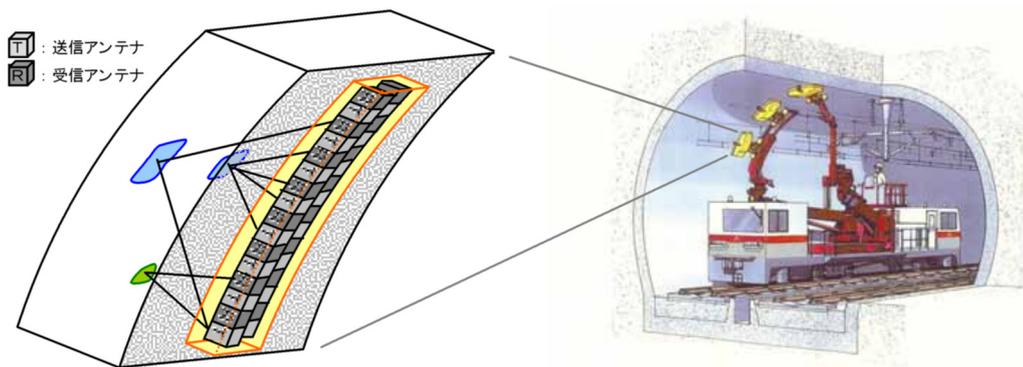


図 2-3-1 マルチパス方式レーダ（電磁波）を搭載したトンネル覆工検査車²¹⁾

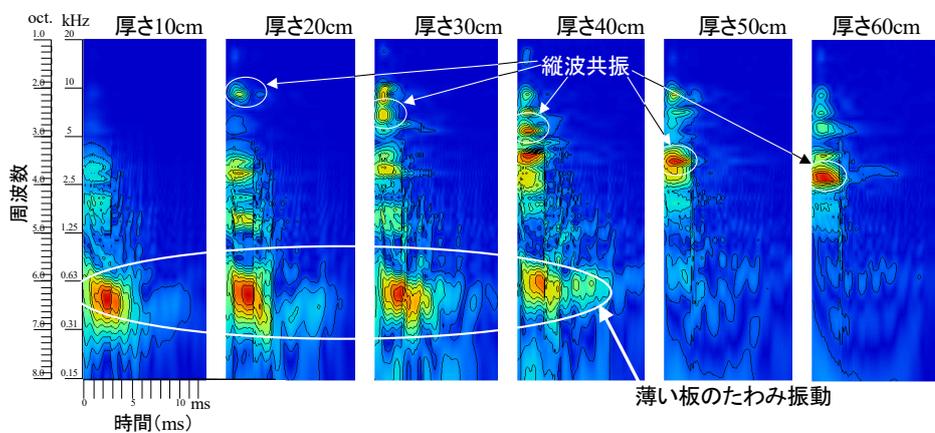


図 2-3-2 ウェブレット解析結果

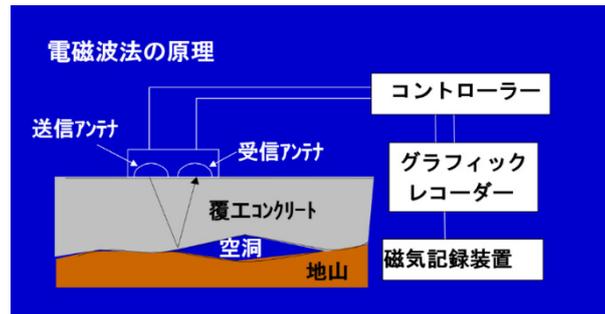


図 2-3-3 電磁波法の原理²³⁾

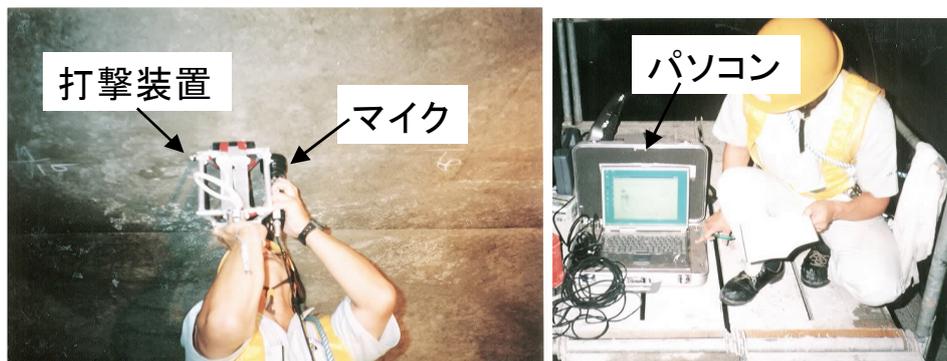


写真 2-3-4 打音検査の機械化



写真 2-3-5 電磁波レーダによる空洞検査装置 (JR 東日本)²³⁾

2.4 赤外線法

2.4.1 測定原理

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2-4-1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²⁴⁾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）、温度に合わせて輝度を256階調グレー表示に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、検出波長域の光の強さから温度を推定している。被写体の分光放射率を ϵ とすると、反射率は $(1-\epsilon)$ で表される。赤外線熱画像は、図2-4-2に示すように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場合があり、同時にデジタルカメラを用いて可視画像も撮影する場合がある。

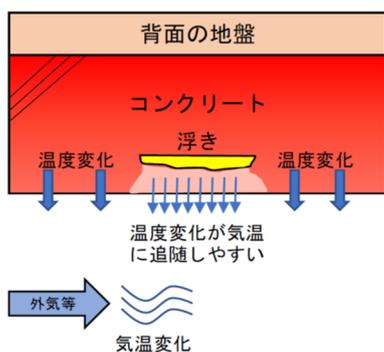


図 2-4-1 浮きの測定原理図

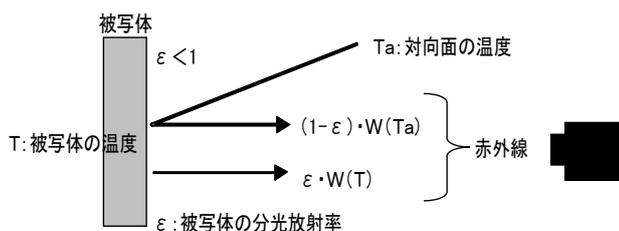


図 2-4-2 赤外線カメラの測定イメージ

2.4.2 地上構造物の例

地上構造物は日射の影響を受け、構造物が暖められやすいことから、赤外線カメラで撮影をすることにより、浮き部分として周囲より高温部分を検出する方法が開発されてきた。日射を主体とした気象条件を加熱とした、パッシブ法に加えて、「キセノンアークランプ」を

用いた加熱装置により、高架橋を加熱し赤外線カメラで撮影する方法も研究されている²⁵⁾。このキセノンアークランプは、照射距離が長く、高架橋の計測に適しているが、一方で照射範囲が小さく、何度も往復をして計測をしなければならないという短所があった。

これに対し、強制過熱をしないパッシブ法を用いての高架橋の赤外線計測では、コンクリート部材厚が比較的薄い箱桁橋、鋼橋のコンクリート床版に着目し、橋種別において日射量の影響によるコンクリート部材内部の温度分布の関係等を整理し、赤外線パッシブ法を現地で実施する場合に適した調査時間帯や、留意点に足しする研究も行われている。また、30cm未満の部材厚では、日射が計測対象面に直接照らされるときには、浮き・はく離部は高温で検出され、逆に裏側から照らされるときには低温で検出されることを明らかにしている²⁶⁾。

2.4.3 トンネル適用の問題点

地下鉄トンネルにおいては、過去にハロゲンランプや遠赤外線照射を用いたトンネル検査装置を開発し、コンクリートの浮き・はく離を検出し、赤外線アクティブ法と可視画像の組合せにより赤外線アクティブ法による浮き検出精度を高める取り組みが行われている²⁷⁾。

しかし、地下鉄トンネルにおける赤外線アクティブ法は、加熱・冷却に時間を要するため、検査速度が 2km/h、かつ測定幅が 2m/回と非効率であり、更に設備が大型になる(図 2-4-3)ため、検査費用及び維持管理費用が高額であった。これらの理由により、現在はトンネル検査車を用いた赤外線アクティブ法による検査は実施されていない。

トンネルにおいては、これまで日射の影響を受けないため、赤外線パッシブ法による浮きの検出は困難とされていた。これに対し、地上部高速道路トンネルの覆工コンクリートにおいて、量子型カメラを用いて計測を実施した後、打音検査の結果と比較し、その有効性を検証している事例があった²⁸⁾²⁹⁾。

地上トンネルでの有効性が検証された例はあるが、地下鉄トンネル内では、一日の気温変化が期待できる地上の構造物とは異なり、更に一日の気温変化が少ない³⁰⁾。このため、地下鉄トンネルでは、赤外線パッシブ法での計測には適していないと考えられていた。従って、通常全般検査、及び特別全般検査の結果と比較をし、赤外線パッシブ法の精度を検証した事例も無かった。

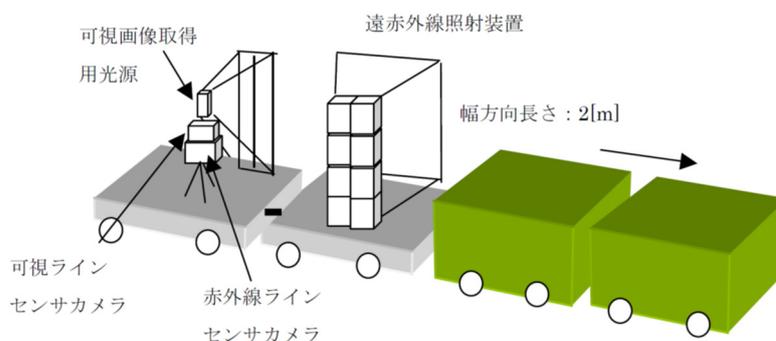


図 2-4-3 アクティブ法によるトンネル検査装置概念図²³⁾

2.5 まとめ

目視や打音検査に代わる様々な技術の開発は行われている。しかし、地下鉄トンネルで問題になっている覆工の内部の浮き・はく離を見つける技術としては、以下の様な問題がある。

- ① 打撃音，レーザー光，超音波，衝撃弾性波，音響打撃波などの技術は検査速度が遅い。
- ② 電磁波（レーダ）では，空洞と鉄筋の区別がつけにくい。

そこで，どちらの欠点もカバーできるものとして地下鉄トンネルにおける赤外線法の適用が期待されるが，これまで以下の様な課題があり，研究が進められてこなかった。

- ① アクティブ法は，強制的に加熱が出来ることから，浮き部の検出が期待できるが，設備が大掛かりとなり，検査効率に課題があり，実用化が困難である。
- ② パッシブ法においては，外気の影響を受けやすい地上トンネルでは有効性が検証された例があるが，外気の影響が少なく一日の気温の変化が少ない地下鉄トンネルで適用された事例が無い。

しかし，地下鉄トンネルでは，日中の列車運行による発熱等によりトンネル坑内温度が上昇し，列車運行が終了した後は，トンネル坑内温度が下がるという特徴がある³⁰⁾。このトンネル坑内気温の変化を利用し，近年性能が向上した赤外線カメラにより，トンネル覆工表面の微小な温度変化を捉えて浮きを検出することが可能であると考えられる。

さらに，赤外線パッシブ法では，強制過熱を行わないため，計測に要する時間が短く，軌道上を走行撮影する比較的簡易な装置を用いることで夜間の線路閉鎖時間内（終電から始発までの送電が停止されている時間帯，以下，「線閉時間」）に効率的に検査を行うことが可能であると考えれば，維持管理への実用化が期待できる。

このことから，赤外線パッシブ法（以下，「赤外線法」）による，維持管理実務への適用可能性について研究を行うこととする。

【第2章 参考文献】

- 1) 鉄道総研：トンネル補修・補強マニュアル，鉄道総合技術研究所，2007.1
- 2) 土木学会：トンネルの維持管理，トンネルライブラリー第14号，p18，土木学会，2005.7.
- 3) 国土交通省，鉄道総研：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，鉄道総合技術研究所，P11，2007.1.
- 4) 鉄道総研：変状トンネル対策工設計マニュアル，鉄道総合技術研究所，1998.2.
- 5) 鉄道総研：トンネル補修・補強マニュアル，鉄道総合技術研究所，2007.1
- 6) 地盤工学会：近接施工，地盤工学・実務シリーズ28，丸善，2011.1.
- 7) 鉄道総研：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル，鉄道総合技術研究所，2007.1.
- 8) 有泉毅，五十嵐寛昌，金子俊輔，永谷英基，山崎剛，日下部治：周辺地盤の圧密沈下に伴う既設シールドトンネル作用荷重の変化メカニズム，土木学会論文集，No.750/III-65，pp.115-134，2003.
- 9) 鉄道総研：都市トンネルの変状対策（変状の傾向／対策事例），鉄道総研教育講座 トンネル維持管理の基本テキスト，鉄道総合技術研究所，pp.6-1-10～6-1-13，2002.10.
- 10) 東京地下鉄株式会社ハンドブック，2017.4.
- 11) 鉄道技術推進センター：トンネルの補修材の耐久性に関する調査研究報告書，公益財団法人鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター，2013.3.
- 12) 村上温，野口達雄監修：鉄道構造物の維持管理，日本鉄道施設協会，pp.39，1998.9.
- 13) 太田直之，杉山友康：災害の推移と今後の防災，日本鉄道施設協会誌，Vol.47，No.6，2009.6.
- 14) 日本国有鉄道施設局土木課：土木構造物取替の考え方，日本鉄道施設協会，1974.3.
- 15) 岡田清監修：鉄道事例にみる土木構造物の診断，山海堂，1990.10.
- 16) 小島芳之，野城一栄，朝倉俊弘，小山幸則：鉄道トンネルの覆工剥落事故と原因推定，トンネルと地下，土木工学社，Vol.31，No.9，pp.63-70，2000.9.
- 17) トンネル安全問題検討会：トンネル安全問題検討会報告書事故の原因推定と今後の保守管理のあり方，運輸省鉄道局，2000.2.
- 18) 国土交通省 道路局：道路トンネル定期点検要領，2014.6.
- 19) 国土交通省 道路局 国道・防災課：道路トンネル定期点検要領，2014.6.
- 20) （公社）日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】，2015.6.
- 21) 小西真治：鉄道構造物のメンテナンス技術に関する研究開発の現状と展望，土木学会論文集F 研究展望，Vol.64，pp.369-380，2008.10.
- 22) 小西真治，寺島善宏：都市トンネルの最新建設技術及び維持管理技術，地盤工学会誌 Vol.66，No.2，pp.10-13，2018.2.
- 23) 浅田章一，内藤孝和，鈴木尊：在来線トンネル覆工検査車の要素技術開発，第20回鉄道技術連合シンポジウム論文集，S2-2-5，pp.37-40，2013.12.
- 24) 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, pp134~138, 2002.3
- 25) 田中寿志, 鳥取誠一, 仁平達也: アクティブ赤外線法によるコンクリートのはく離検知, RTRI REPORT Col.19, No.12, 2005.12
 - 26) 橋本和明, 明石行雄, 川西弘一: 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.
 - 27) 栗田耕一, 岡井隆, 柳沢有一郎, 鳥取誠一: 赤外線照射を用いたアクティブ赤外線法における可視画像と赤外線画像取得方法, 土木学会第 58 回年次講演会, pp. 679-680, 2003.
 - 28) 黒須秀明, 間満明, 前田近邦, 新井正典, 塚田芳則, 清水俊吾: 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 回年次講演会, pp.525-526, 2012
 - 29) 清水俊吾, 新井正典, 塚田芳則, 内間満明, 黒須秀明, 前田近邦: 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 回年次講演会, pp.525-526, 2012
 - 30) 斎藤寛之: 地下鉄トンネル内温度の予測と検証, 鉄道総研第 264(266)回月例発表会, pp.1-4, 2013

第3章 東京メトロのトンネル構造物と維持管理

3.1 東京メトロの構造物

東京メトロは、9路線、総営業延長 195.1 km（うち、トンネル延長 166.8 km）の構造物を保有し、日本の首都東京の都市機能を支える重要な社会資本を形成している（表 3-1-1）。これらの構造物は建設後の経過年数 10 年程度の副都心線から、経過年数 90 年以上の銀座線まで様々な年代に建設されている（図 3-1-1）。これら構造物のうちトンネルは、多種多様な構造、環境下に存在している。例えば構造形式では、開削トンネル、潜函トンネル、シールドトンネル等、多様な構造形式を有している。トンネル周辺環境では、感潮河川域（海の潮の干満を受ける河川域）の下や、一般に軟弱地盤が多いと言われる沖積地盤に位置するトンネルもあり、塩害劣化の兆候、地盤の圧密沈下、都市開発に伴うトンネル直近での工事等に起因するひび割れが発生している箇所がある等のほか、経年による中性化を起因とした劣化の兆候が見られる箇所もあり、様々な変状（コンクリート表面に生じるひび割れ、漏水、はく離等）が多数存在する。

表 3-1-1 東京メトロの保有する構造物

路線名	構造物延長	トンネル延長	うちシールド	全通年次
銀座線	14,053m	14,053m		1939年
丸ノ内線	27,976m	25,798m	231m	1962年
日比谷線	20,676m	17,342m		1964年
東西線	31,438m	17,071m	1,691m	1969年
千代田線	24,995m	19,057m	3,720m	1979年
有楽町線	29,340m	26,445m	8,957m	1988年
半蔵門線	16,846m	16,846m	12,131m	2003年
南北線	21,445m	21,445m	16,078m	2000年
副都心線	8,760m	8,760m	6,585m	2008年
計	195,944m	166,817m	49,393m	-

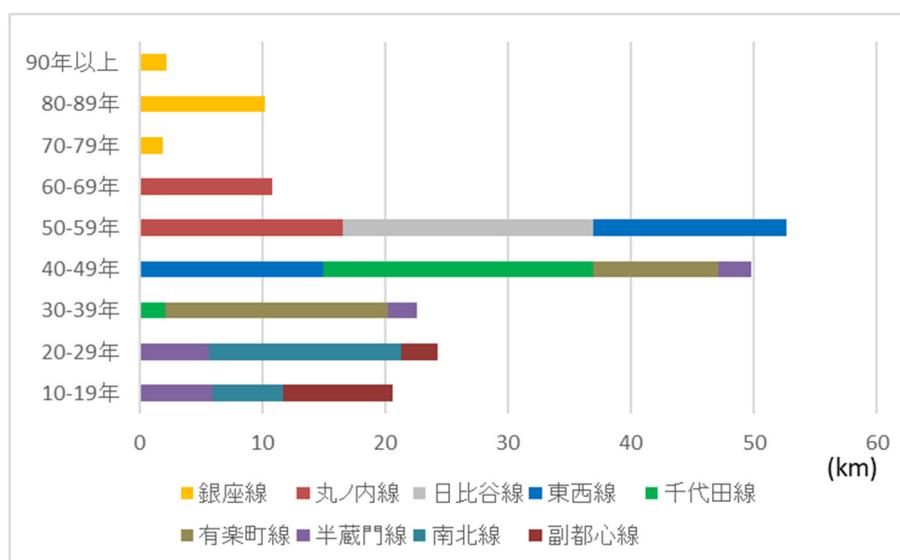


図 3-1-1 東京メトロの構造物の経年状況（地上構造物含む）

3.2 東京メトロのトンネル維持管理概要

3.2.1 検査

トンネルの維持管理は、日常の線路巡回のほか、国土交通省通達「鉄道構造物等維持管理標準」に基づき、表 2-2-1 に示す鉄道トンネルにおける検査区分に準じて実施している。全般検査では目視及び必要箇所のハンマーによる打音により、劣化進行等に起因する各種変状（コンクリート表面に生じるひび割れ、漏水、浮きなど）の抽出と、その進展性を確認している。

通常全般検査（写真 3-2-1）は 2 年毎に行う。道床上からの目視及び必要箇所のハンマーによる打音により、劣化進行等に起因する各種変状の抽出と、その進展性を確認している。トンネル内において、変状の発生・進展が与える悪影響としては、まず、漏水によるコンクリート中の鉄筋腐食が挙げられる。鉄筋が腐食すると、その膨脹圧でコンクリート表面に浮きが発生し、はく落に繋がることで、電車の安全・安定運行を支障する可能性がある。また、漏水がレールにかかると電食等のレール損傷の発生や、信号施設などにかかると故障等を起こすこともある。一方、鉄筋が腐食膨脹した場合や、トンネルが過大な外力などにより万が一大きく変形した場合には、ひび割れが発生することがあり、これを放置すると更に変状が進行し構造物の耐力低下に繋がる。

よって、検査では、漏水・ひび割れ・浮きなどの変状の発見と進展性の確認と共に、構造物の状態やはく落危険性、施設物への影響を考慮した表 2-2-2 鉄道トンネルにおける健全度判定区分と同等の健全度判定を行っている。



写真 3-2-1 通常全般検査の状況

特別全般検査（写真 3-2-2）は 20 年毎に行う。高所作業車を用い、道床上からでは接近できないトンネル上床や側壁上部について、近接目視及び必要箇所のハンマーによる打音を実施している。これにより、検査や判定の精度を高め、その結果をもって通常全般検査により、変状の進行を確認する目的である。

全般検査の結果、詳細な調査が必要な箇所については、個別検査として各種機器を用いた調査・計測を実施し、原因推定・劣化進行予測等を出来るだけ高い精度で行うこともある。

なお、これらの検査は、地下鉄の営業終了後から営業を開始するまでの約3時間の間で行う（東京メトロは複々線構造ではないため）よって、通常全般検査は3か月／路線、特別全般検査は1年／路線の日数を要する。



写真 3-2-2 特別全般検査の状況

また、通常全般検査、特別全般検査、個別検査に加え、東京メトロでは、浮き個所のコンクリートはく落予防として、万が一はく落した場合、安全性を脅かす可能性のある側壁上部と上床部を対象に4年に1度の打音点検を実施している。打音点検は1路線あたり側壁部で約40日、上床部で約125日を要する。図3-2-1に比較を示す。

	通常全般検査	特別全般検査	打音点検
目的	・ひび割れ、漏水等の変状1つずつに対して、発生及び、進行状況を確認・記録する。		・剥離・剥落等防止のため、危険個所の叩き落としを行う。
対象範囲			
検査内容	・目視、必要により打音 ・変状撮影・記録 ・健全度の確認	・近接目視、打音 ・変状撮影・記録 ・健全度の確認	・近接目視、打音、触診 ・変状撮影・記録 (叩き落とし実施個所のみ)
作業者	・3人／組	・9人／組	・6人／組
期間	・約3か月／路線	・約1年／路線	・上床：約125日／路線 ・側壁：約40日／路線
周期	・2年	・20年	・4年

図 3-2-1 通常全般検査・特別全般検査・打音点検比較図

3.2.2 通常全般検査と特別全般検査結果の比較

検査は2012年度より銀座線から始め、2013年度は丸ノ内線、2014年度は日比谷線、2015年度は東西線、2016年度は千代田線、2017年度は有楽町線と6路線の特別全般検査を実施した。

銀座線における通常全般検査と特別全般検査の結果を比較したものを図3-2-1に示す。通常全般検査では、浮き92箇所、はく離427箇所の変状検知箇所について管理していたところに対しての特別全般検査を実施したところ、軽微なものを含めて、新たに浮き1735箇所、はく離1675箇所が確認された¹⁾(図3-2-2)。また、特別全般検査では、ひび割れ、漏水、ジャンカ(豆板)に比較して、浮き・はく離の増加数が多いことこのことから、近接目視及び打音検査を実施する特別全般検査が、浮きの検出には有効であることが分かる。

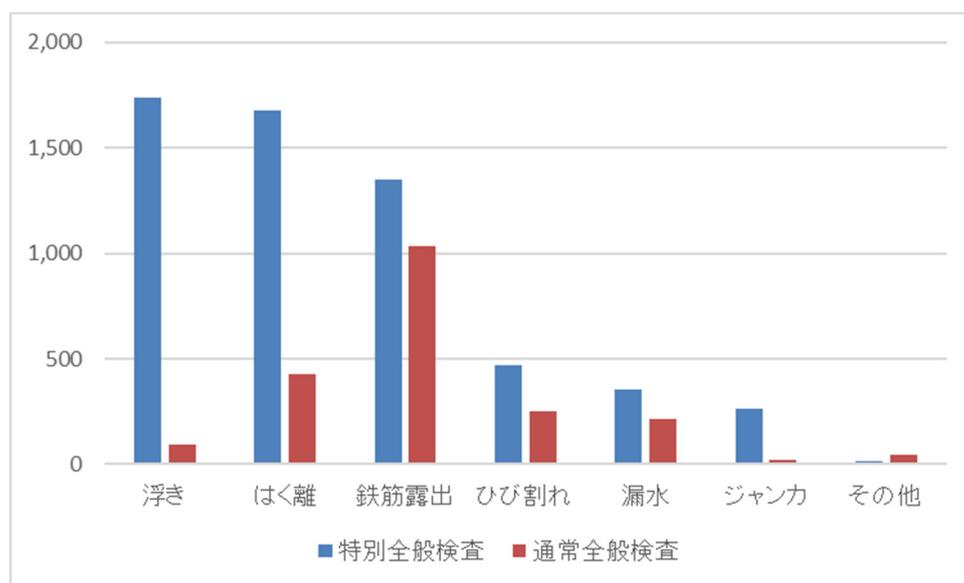


図3-2-2 銀座線通常全般検査と特別全般検査結果比較¹⁾

3.3 変状と措置

構造物の劣化プロセスを図3-3-1に示す。検査はOUTPUTである変状を観測することであり、それを変状の種類とランクに応じて措置(補修等)を行う必要がある。適切な措置を継続することで構造物の長寿命化が図られると考えている。

しかし、現状の補修計画は、ひび割れ、はく離等、既に発生している変状に対する事後保全を中心としたものであり、変状が進行する前に発生させる原因(力学的要因、化学的要因)を調査し、対策の立案を行う予防保全を実現することも維持管理の効率化の一環として課題となっている。

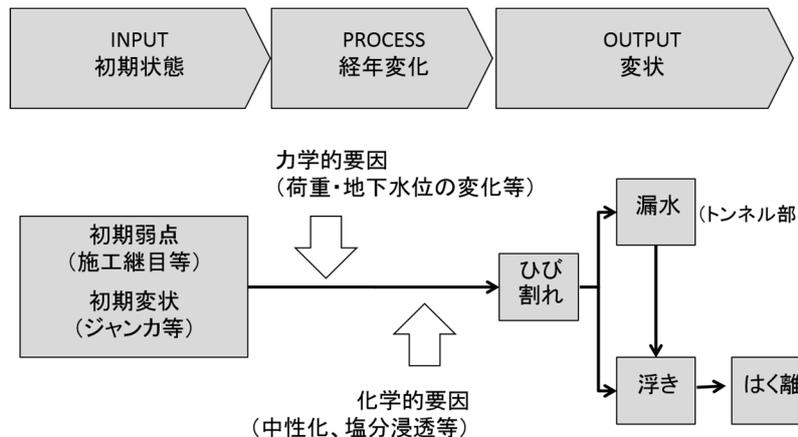


図 3-3-1 変状プロセス図

特に、中性化と漏水の関係については、はく落を生じる重要なプロセスの1つであるのでここで述べておくこととする。中性化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し、コンクリートのpHが低下することで鉄筋を腐食から保護する膜が消失するもので、そこに酸素と水が供給されることで鉄筋腐食が生じる。

トンネル内は、一般的な箇所では含水率が極めて低いことが分かっている。また、中性化による鉄筋腐食は、塩化物イオン濃度がなく、コンクリートの含水率が3.1%以下の時には、鉄筋の腐食速度は著しく遅いことが明らかになっているため、トンネル内で中性化が進行していても鉄筋の腐食速度は極めて低いと考えられる。しかし、中性化が進行し、かつ漏水が発生している箇所では、含水率が高く、鉄筋の腐食速度が大きくなると考えられる。これらは、実際にはつり出した鉄筋の観察結果とも符合している(写真3-3-1)²⁾。また、コンクリートの含水率から腐食速度を算出するとともに、ひび割れ発生腐食量と現在の腐食量を設定することで、ひび割れ発生までの期間を算出した結果、漏水がない箇所では中性化は鉄筋位置まで到達してから100年以上が経っても、ひび割れが発生しないが、漏水がある箇所では、中性化の到達から10年程度でコンクリートにひび割れが発生する恐れがある(図3-3-2)²⁾。



写真 3-3-1 鉄筋腐食状況の比較²⁾

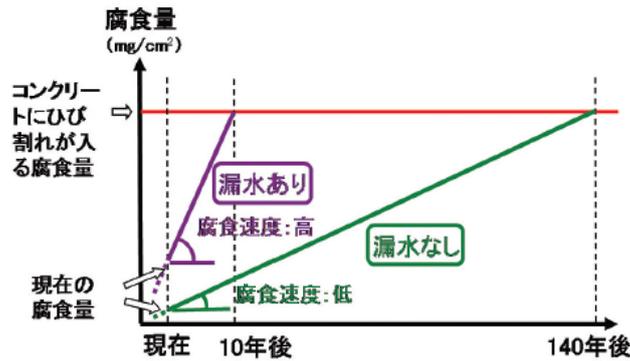


図 3-3-2 中性化によるひび割れ発生予測の概念²⁾

漏水やひび割れが確認できる箇所は、浮きである可能性が高く、打音検査すべき個所として判断できるが、実際は、ひび割れ幅が微小なため検査者には確認できない場合や、表面に漏水が確認できない場合の浮きもあることから、コンクリートのはく落事象が発生しているという課題がある。

また、実際に浮きのある箇所は、範囲が狭い場合は、浮いているコンクリートをはつり落とし、鉄筋が錆びている場合は錆を落とした後に防錆処理を施し、断面修復を実施している。過去に実施した断面修復箇所は、再劣化を生じ浮きやはく落に繋がることもあるので、検査時には特に留意が必要である。浮き部をはつり落とし、断面修復後のかぶりが 10mm 以上確保できない場合は、鉄筋の防錆処理を施し、はつり落としたままにしている。また、10mm 以上確保できる箇所については断面修復まで行うこととしている。断面修復法王は、40mm 未満、40mm 以上 60mm 未満、60mm を超える場合それぞれ、方法が異なるが、図 3-3-3 に 60mm を超える場合の断面修復方法について例として示す。

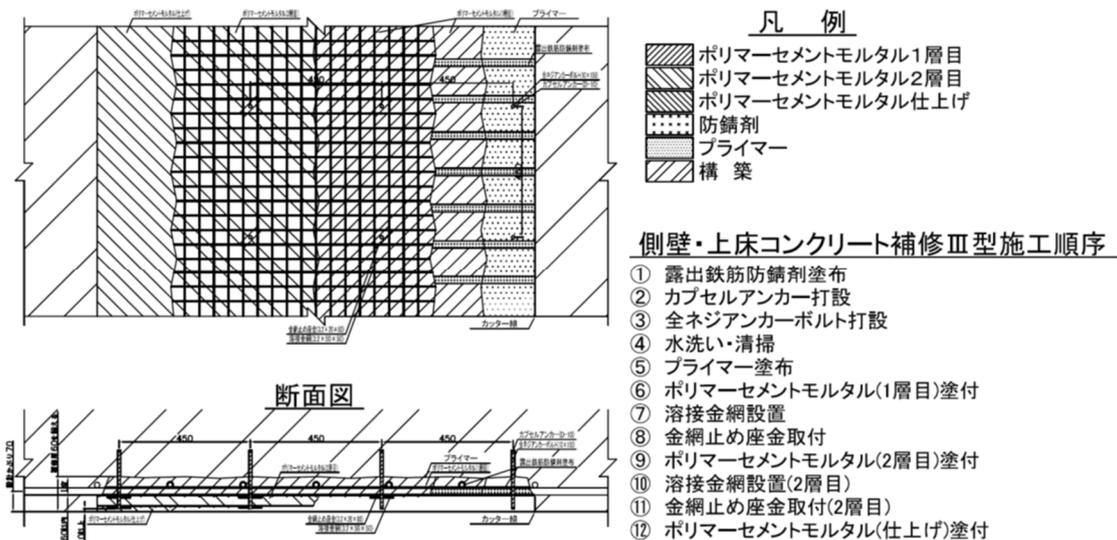


図 3-3-3 構築コンクリート補修工³⁾

また、漏水箇所は、鉄道施設（信号設備やレール）に影響しない箇所は、そのまま経過観察をすることがあるが、特に中性化の懸念される箇所では止水工事を実施している。止水工事は、新規の漏水に対しては「Uカット注入方式（図 3-3-4）」を、既施工箇所や比較的規模の大きな漏水補修については「Vカット・構築補修型注入方式（図 3-3-5）」にて施工を行っている。いその状況に応じ止水工事を実施している。当該工法は 1987 年から用いているが、一部の補修箇所において部分的な再漏水は確認されているものの、止水効果は比較的良好で、また目地材の落下等、大きな不具合は生じていない。



図 3-3-4 Uカット・注入方式³⁾

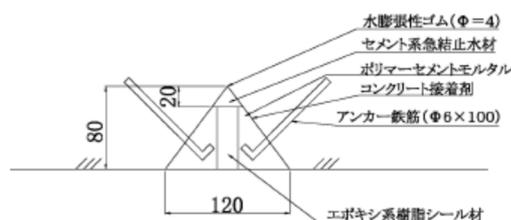


図 3-3-5 Vカット構築補修型注入方式³⁾

3.4 維持管理におけるICTの活用

検査については、モバイル端末（以下、「タブレット」という）の活用による検査結果管理の効率化（野帳へ記入し、表計算ソフトや管理システムへの入力ステップの効率化及び、誤入力の解消）、検査結果を分かり易く共有するための可視化、蓄積されたデータを統計分析することによる維持管理の質向上を目的として、ICT化されている。

3.4.1 タブレットの活用

特別全般検査では、通常全般検査より多くの変状を観察している。特別全般検査の後は、2年に1度の通常全般検査でこれら変状の進行状況を監理していくが、夜間の線閉時間内に全て確認し、新たな変状を観測した場合に確実に記録しなければならない。また、検査後の事務作業負担（データ入力や調書作成）も増えてくる。

このことから、検査用アプリケーションソフトを開発し、軽量のタブレットを検査に導入している。アプリケーションソフトの検査画面を写真 3-4-1 に示す。一つ一つの変状に対して前回の検査記録（写真、キロ程、部位、変状、ランク等）が表示され、変状を確認した後、タッチパネルの特性を生かし、迅速に記録できる様にしている。また変状の写真撮影は、撮影画面に前回の写真を小ウインドウで表示させ、前回写真と比較しながら同じ角度で撮影できるように工夫している。

さらに、これと併せて、効率化のためにタブレットで自動的に位置情報を取得できるよう、東西線においては 10m 毎に位置情報発信装置（Beacon）を設置している（写真 3-4-2）。これは、地下鉄トンネル内では地上のように GPS が利用できないためである。



写真 3-4-1 アプリケーション画面



写真 3-4-2 位置情報発信装置設置状況

3.4.2 データの可視化

蓄積されたデータは、分かり易いように可視化される。地下鉄トンネル内に、どの様に変状が分布しているのかは、これまで検査経験の多いベテランの暗黙知であったが、可視化することにより、誰にでも変状の分布状況を確認できるようになった。図 3-4-1 に変状分布状況の画面を示す。また、3.3 で述べたとおり中性化は、それ自体は浮きを生じさせることは無いが、漏水箇所と合わさる事により鉄筋を腐食させ、浮きを生じさせることから、中性化の進行が見られる箇所は速やかに止水工事を実施することが望ましい。このため、中性化の進行状況と漏水箇所を同時に確認できるような可視化も実施している（図 3-4-2）。

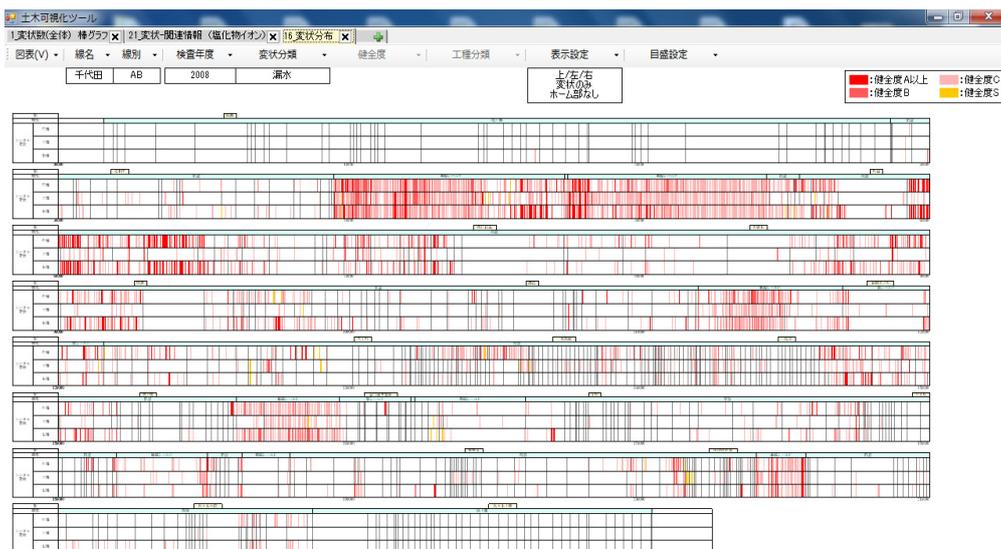


図 3-4-1 変状分布状況可視化画面

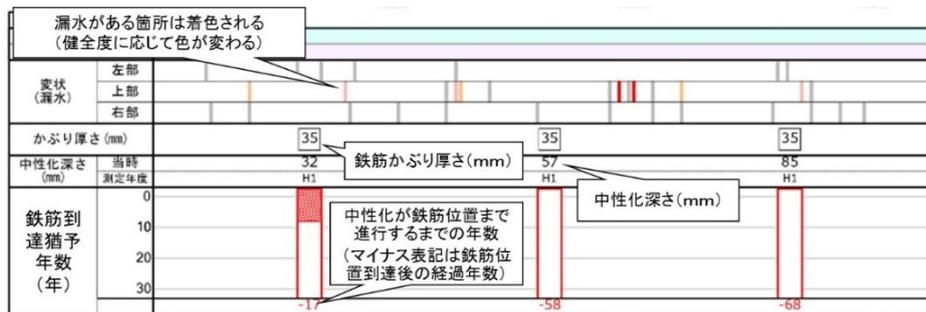


図 3-4-2 漏水と中性化の状況確認画面

3.5 検査データの活用

検査で得られたデータを解析し、維持管理に活用している。例えば、トンネル 5m 区間毎の健全度を数値で表した「維持管理指標 θ^4 」や、検査における見逃しのリスクを定量化するために「ベイジアンネットワークによる理論的変状の観測確率⁵⁾」を活用している。また、可視画像撮影により得られた画像データから、画像認識技術を利用してはく落要注意箇所の自動抽出の研究⁶⁾を行っている。ここでは、浮きに特に関係のある、ベイジアンネットワークによる理論的変状の観測確率、および画像認識技術の活用について述べる。

3.5.1 ベイジアンネットワークによる理論的変状の観測確率⁵⁾

蓄積されたデータを解析し、維持管理に生かす試みを行っている。その一つがベイジアンネットワークによる変状の観測確率の計算である。信号検出理論を用いると、検査結果と実際の変状の有無との関係は図 3-5-1 のように示せ、検査員による判定と実際の状況の結果に相違のある二箇所が不確実であると捉えることができる。ここで、「ミス」は検査員が変状なしと判断したにもかかわらず実際には変状があった場合のことであり、「フォールス・アラーム」は検査員が変状ありと判断したにもかかわらず実際には変状がなかった場合のことである。これらに着目して因果関係の分析を行っている。

ベイジアンネットワークとは、変数間の条件付き確率を効率的に計算する確率推論のモデルである。例えば、鋼材劣化と漏水という二つの事象を考えたときに、「鋼材劣化が発生した箇所において漏水も発生する」ときの条件付き確率と、「漏水が発生した箇所において鋼材劣化も発生する」ときの条件付き確率では、後者の方が事象の発生として因果関係が強いと判断できる。この計算を変数間の組み合わせにおいて効率的に行うのがベイジアンネットワークである。また、漏水が発生した後に初期変状が発生する等の工学での理論上ありえない因果関係には禁則のための制約をかけている。図 3-5-2 に変状間の因果関係モデルを、図 3-5-2 に銀座線における浮きが観測されなかったキロ程における浮きの観測確率の例を示す。

		実際の変状	
		あり	なし
検査で観測した変状	あり	ヒット (的中)	フォールス・アラーム (誤警報)
	なし	ミス (見逃し)	コレクト・リジェクション (正しく棄却)

図 3-5-1 検査結果と実際の変状の有無との関係⁴⁾

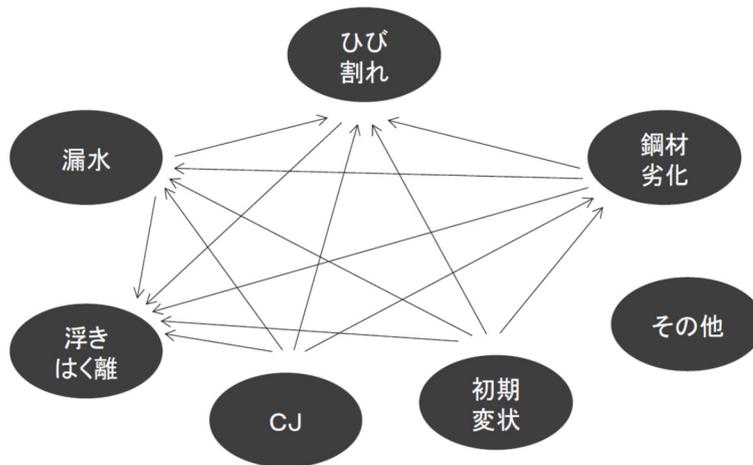


図 3-5-2 銀座線における変状間の因果関係モデル例 (CJはコールドジョイント)

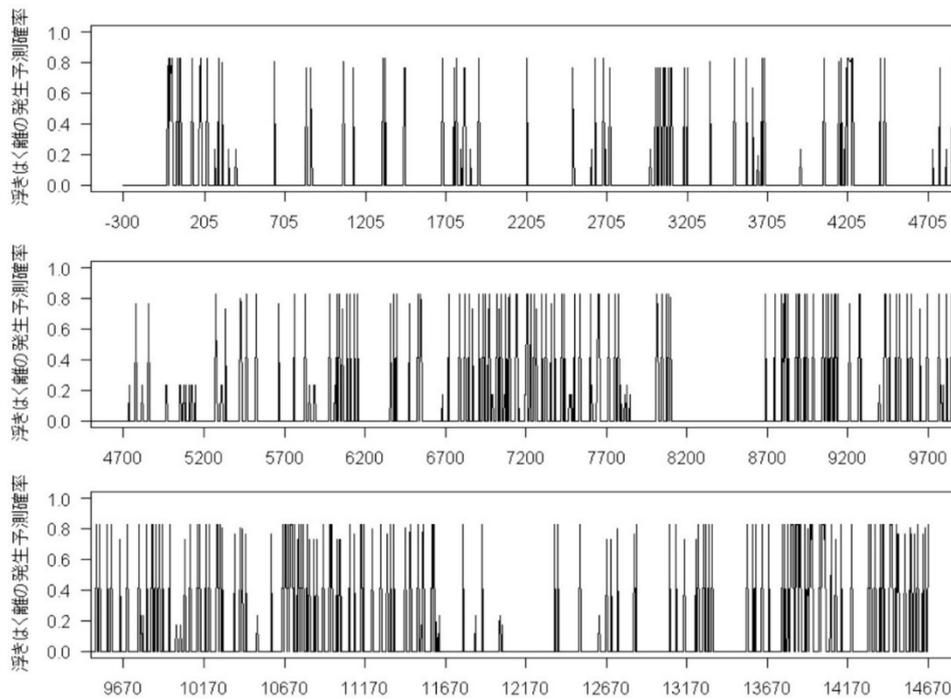


図 3-5-3 浮きが観測されなかったキロ程における浮きの観測確率

3.5.2 画像認識技術を利用したはく落要注意箇所自動抽出システム⁶⁾

東京メトロでは全路線の可視画像データとその展開図を保有しており（図 3-5-4）、その可視画像データについて、画像認識技術を利用してひび割れや補修跡等の変状の形状を考慮して、ある変状箇所と同様の箇所を自動抽出できるシステムを研究開発している

具体的には変状パターンおよび変状組合せを自動的に分類するプログラムを構築し、この機能を用いて、過去の検査結果より特定したコンクリートの浮きが生じやすい変状のパターンを自動抽出するものである。変状のパターンを図 3-5-5 に示す。このうち複合交差変状、複合非交差変状について自動抽出するものであり、その結果の例を図 3-5-6 に示す。

このシステムでは例えば複合交差変状では特別全般検査での浮き 340 箇所中 334 箇所の検出が可能であるが、自動検出箇所が 32,635 箇所と過検出が約 100 倍あり、過検出を減らす仕組みを研究中である。

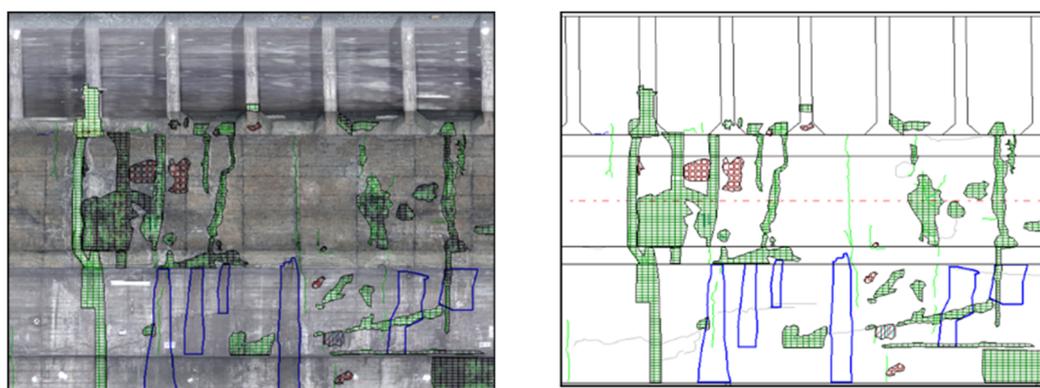


図 3-5-4 可視画像データと展開図⁵⁾

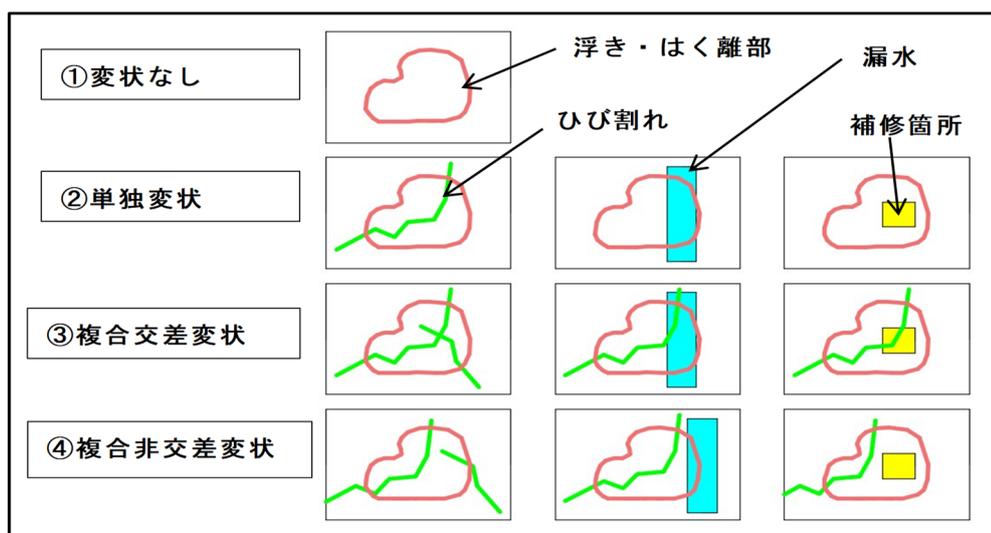


図 3-5-5 変状パターン⁵⁾

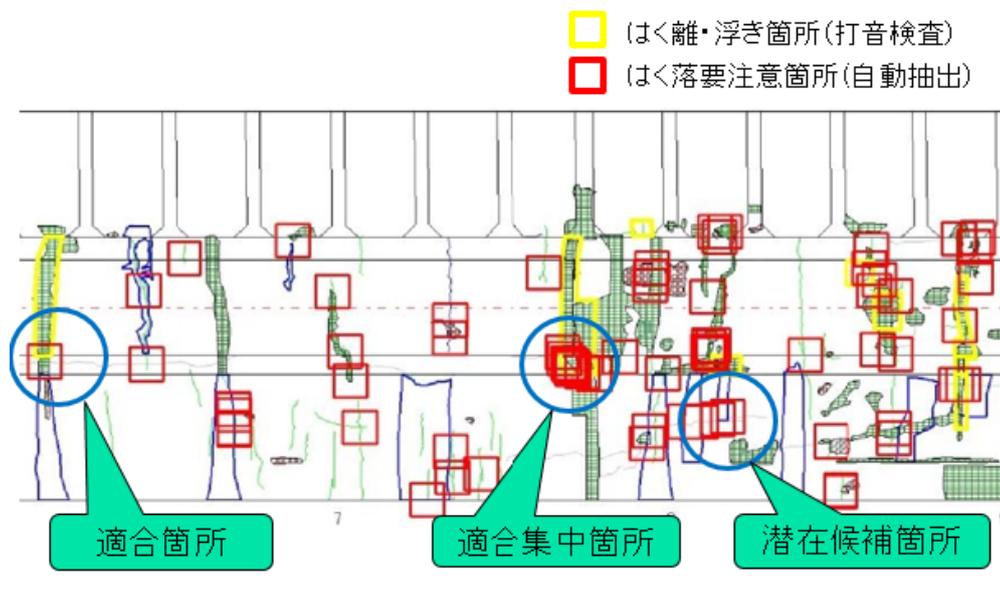


図 3-5-6 自動抽出結果の一例⁵⁾

3.6 東京メトロの維持管理まとめ

鉄道構造物等維持管理標準に基づき実施される特別全般検査は、目視を主体とした通常全般検査と比較し、近接目視及び打音検査を実施するため、浮きを検出するのに非常に有効である。しかし、打音検査はトンネルコンクリート表面を全て打音しているわけではなく、検査員の経験や判断により選定した箇所を打音している。全面を打音することは非常に手間を要し、夜間の線閉時間での検査を考慮すれば現実的ではない。

特別全般検査においても、浮きを見逃している可能性があり、検査者の経験以外に打音箇所をより効率的かつ正確に選定する必要がある。このことから、ベイジアンネットワークによる浮きの観測確率や、画像認識技術を利用し、浮き（はく落要注意箇所）の選定を実施しているが、これらは、過去の検査データに基づき算出・抽出するものである。

これに対し、赤外線法は実際に浮いている箇所を表面の温度差により計測するものであるため、その有効性を検証することは重要な方法の一つと考えられる。また、ICTの技術を活用し、将来、浮きの観測確率や画像認識による抽出箇所のデータと組み合わせることで、更に効率的かつ正確な打音箇所の選定が可能であると考えられる。従って、次章から赤外線法の有効性を検証していく。

【第3章 参考文献】

- 1) 榎谷祐輝, 新川洋之, 高橋泰広, 阿部正和, 小西真治: 近接目視・打音を中心とした特別全般検査による知見, 第23回トンネル工学研究発表会, pp. 363-366, 2013.
- 2) 諸橋由治, 大泉政彦, 川上幸一: 東京メトロにおける維持管理(中性化と塩害に対して), 基礎工, 2014年7月号, pp.75-78
- 3) 東京地下鉄株式会社, 保守工事標準図集
- 4) 川上幸一, 小西真治, 三浦孝智, 篠崎真澄, 福中公輔: 地下鉄トンネルの全般検査データによる維持管理指標の研究(報告), 土木学会トンネル工学報告集, 第25巻, IV-1, 2015.11
- 5) 川上幸一, 小西真治, 篠崎真澄, 福中公輔: ベイジアンネットワークによる地下鉄トンネルの変状観測確率の検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第21巻, pp. 123-126, 2016.
- 6) 篠原秀明, 小西真治, 川上幸一, 三浦孝智, 田口真澄, 村田利文, 石川雄章: 画像認識技術を利用したはく落要注意箇所の自動抽出システムの開発, 第26回トンネル工学研究発表会, 報告III-2

第4章 赤外線熱計測適用可能性における予備検討

4.1 予備検討の目的

先にも述べているように、地下鉄トンネル内は一日の気温の変化量が地上に比べて極めて小さいため、赤外線法の適法が困難と考えられていた。このことから、詳細な検討の前段階として、実施に浮き部を変温部として確認が出来るかの調査検討を実施した。

地下鉄トンネルにおいて赤外線法適用の可能性を検討するためには、には以下の要件が必要であると考えた。

- ① 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こと。
- ② 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）を把握していること。
- ③ 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こと。

上記3点を確認するため、予備検討においては、既存の浮き部を赤外線法で撮影をし、変温部として確認が出来ること、更に赤外線法により浮き部検出出来る条件を確認した。

具体的には、実際に路線および条件の異なる3つの区間において各区間2箇所ずつ、打音検査に基づき検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た。また、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。更に、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調査・分析した。これらの結果から赤外線法の有効性を確認した。

4.2 検討概要

4.2.1 検討の流れ

予備検討は、図 4-1-1に示す手順で検討を進めた。まず、打音検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（2013年9月、11月、2014年1月）で、定点からの赤外線計測を実施した。最後に打音検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。

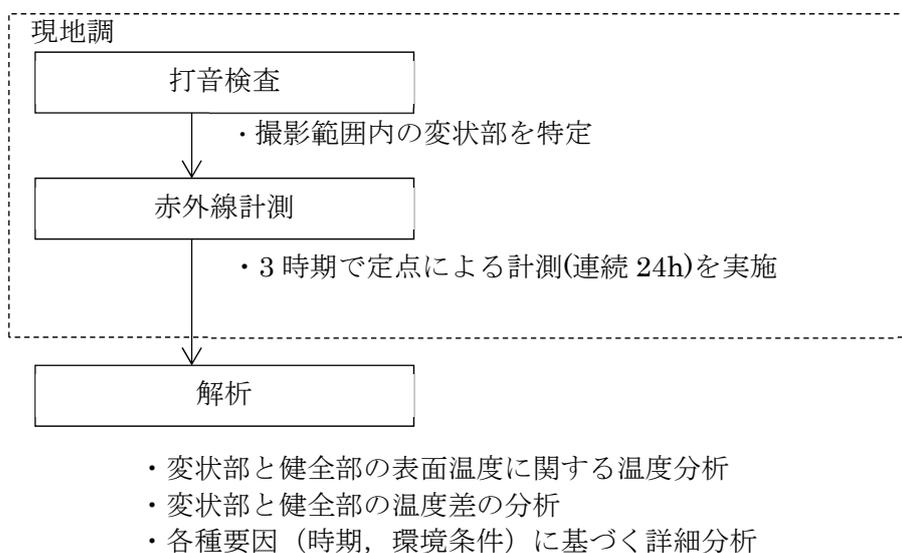


図 4-1-1 予備検討の流れ

4.2.2 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. 予備検討では, 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)を検討箇所とした. 選定した区間の特徴を表4-2-1に示す. また, それぞれの概要図を図4-2-1, 4-2-2, 4-2-3, 4-2-4に示す.

表4-2-1 計測区間

区間名	計測区間	条件
区間 A	古い路線の開削トンネル A線①10k616m 付近 側壁～上床 ②10k623m 付近 側壁～上床	換気口から 20m 土被り 3.3～4.1m
区間 B	区間 A とは違う路線の開削トンネル A線①14k842m 付近 側壁～上床 ②14k943m 付近 側壁～上床	換気口から 300m 土被り 6.45m
区間 C	区間 B と同じ路線の開削トンネル A線③23k075m 付近 側壁 ④23k075m 付近 上床	換気口から 250m 土被り深い 7.65m



図 4-2-1 区間 A 計測平面図および断面図

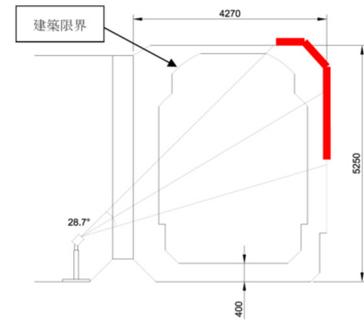
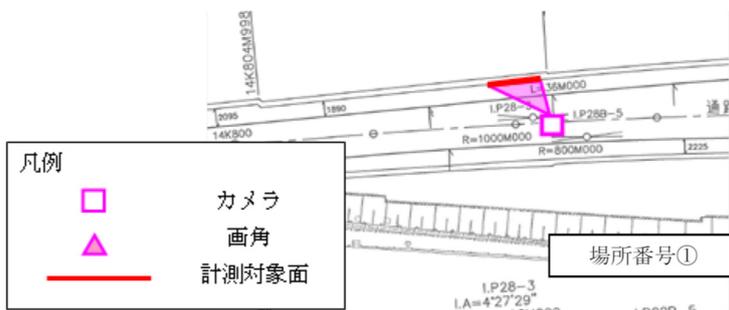


図 4-2-2 区間 B 計測平面および断面図 (場所番号①)

び断面図 (場所番号①)

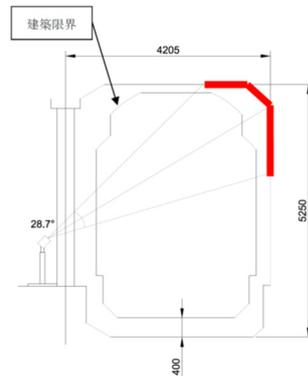
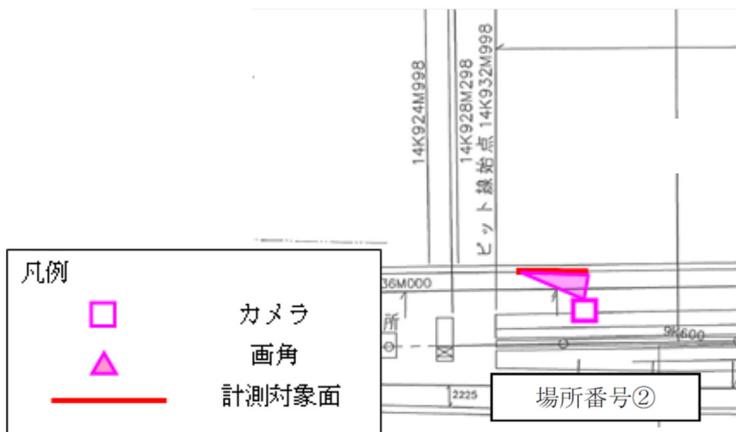


図 4-2-3 区間 B 計測平面および断面図 (場所番号②)

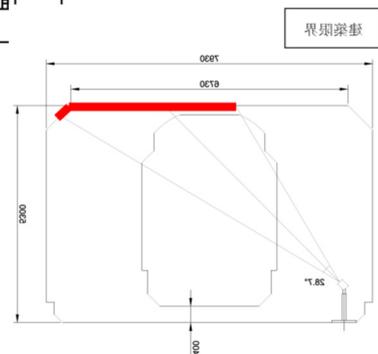
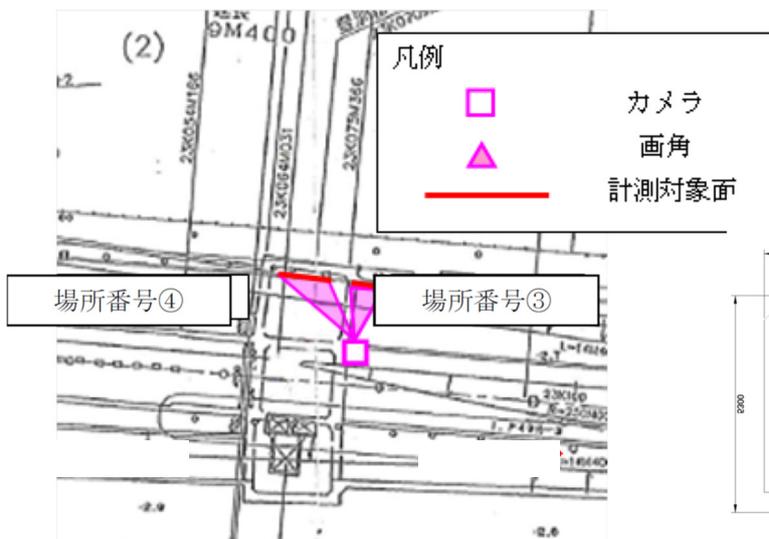


図 4-2-4 区間 C 計測平面図および断面図

4.3 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¹⁾。

一般に測定波長が短波長帯の量子型カメラは、太陽反射や日なたと日陰の混在によるノイズの影響を受けやすいことから夜間撮影で用いられる傾向にあること、長波長帯の熱型カメラに比較して検出精度が高い傾向にある²⁾。

一日の気温変化が期待できる地上の構造物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³⁾。そのため、微小な温度変化を捉えなければならないことから、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^{4) 5)} 量子型を使用することとした。詳細な仕様を表 4-3-1 に示す。

以降、この後の全ての検討において、同型の赤外線カメラを使用する。

表4-3-1 赤外線サーモグラフィカメラ仕様

電子シャッター速度	$9\mu\text{m}\sim$
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

4.4 計測範囲における打音検査

赤外線計測を実施する前に、各区間で打音検査を実施した。打音検査は赤外線カメラの計測範囲全体に対して実施し、変状の位置、形状、寸法について記録を行った。また、打音検査時には、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。

打音検査の結果、確認された浮きの内訳を表4-4-1に示し、その箇所を写真4-4-1、4-4-2、4-4-3に示す。

表4-4-1 打音検査による浮きの内訳

計測場所	部位・部材	位置(高さ)	浮き数
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



写真4-4-1 区間A変状の様子



写真4-4-2 区間B変状の様子



写真4-4-3 区間C変状の様子

4.5 赤外線法計測

4.5.1 計測方法

赤外線計測は、打音検査を実施した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写真4-5-1に示す。



写真4-5-1 計測機器外観図

4.5.2 計測データの特徴

写真4-5-2に区間Aの打音検査により確認された変状と、赤外線法での計測画像（白黒スケール）を示す。変状部が温度差として確認できることが分かる。

赤外線法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。変状部は打音検査によって確認された変状範囲（表4-4-2）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（写真4-5-3）。

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4-5-1、図4-5-2、図4-5-3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。これにより夜間 1:00～4:00 頃の通電されていない時間帯（以下、「線閉時間」）の間で、赤外線法による計測が有効である可能性があることが分かる。

時期の変化では、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、明確な差が見られ冬期の方が計測に適している可能性が高いと考えられる。

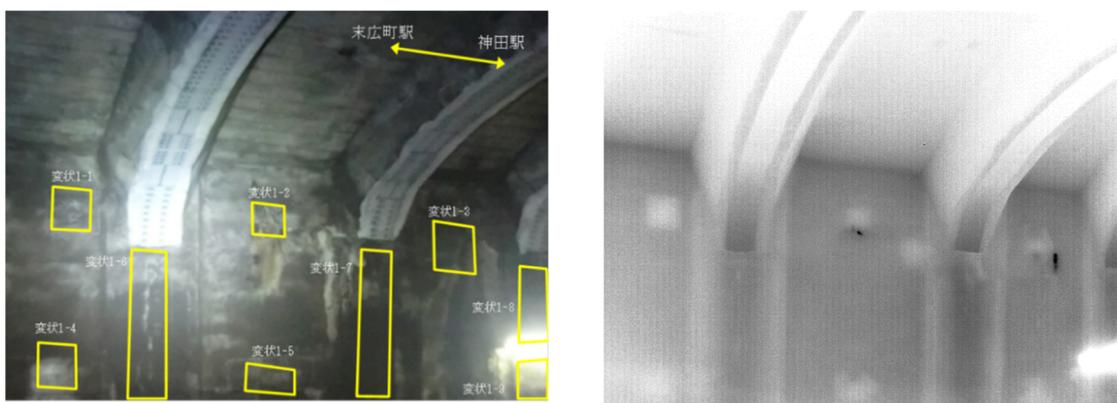


写真 4-5-2 打音検査と赤外線画像の比較

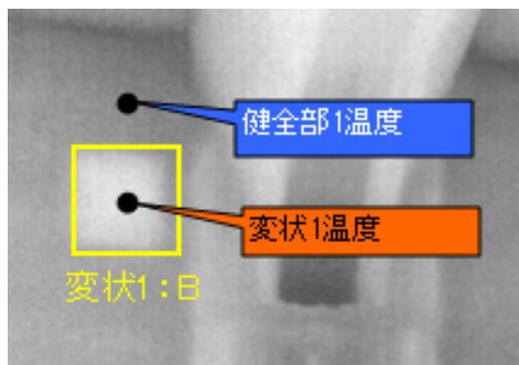


写真 4-5-3 変状（浮き）部と健全部の温度推移

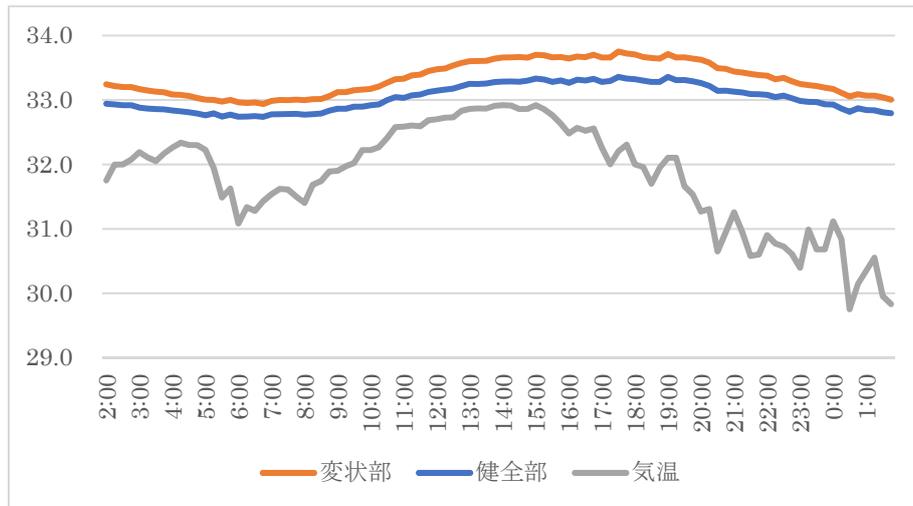


図 4-5-1 区間 A 温度推移 (9 月)

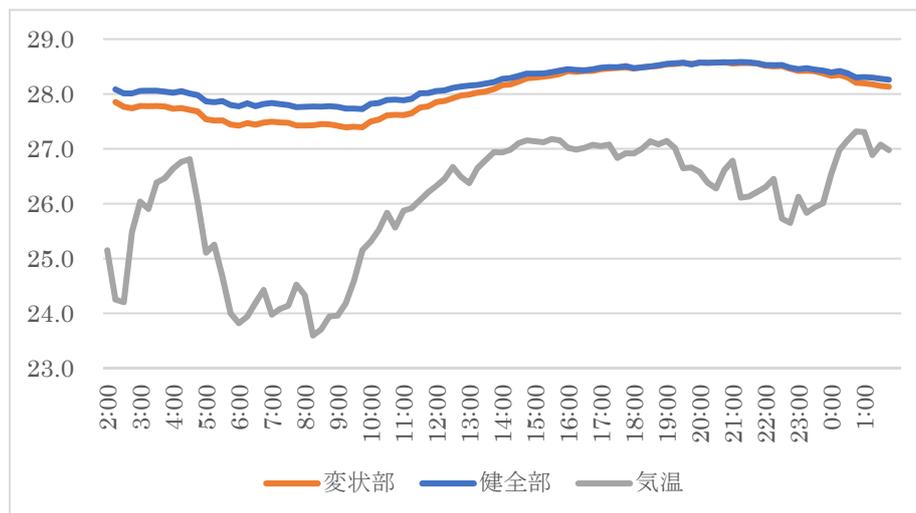


図 4-5-2 区間 A 温度推移 (11 月)

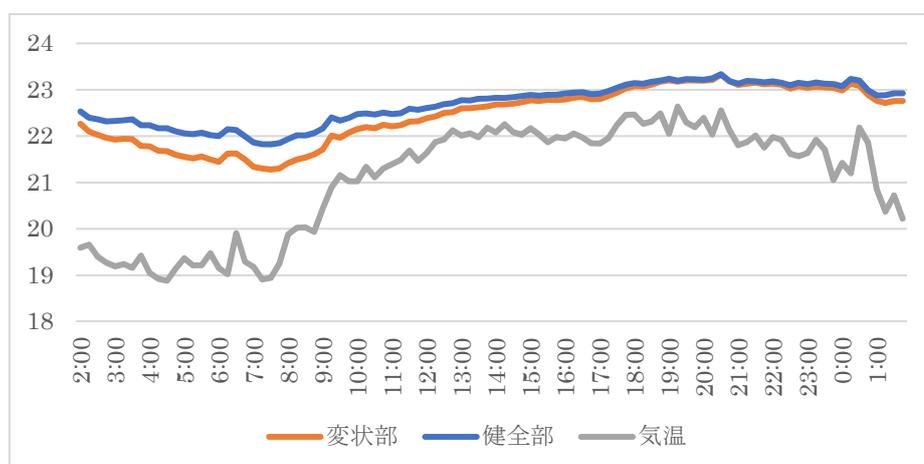


図 4-5-3 区間 A 温度推移 (1 月)

4.5.3 変状部と健全部の温度差

次に、変個々の変状箇所についての温度差を整理した（表 4-5-1）。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℃、11 月が 0.07℃、1 月が 0.1℃となっており、全体の温度差の平均は 0.1℃であった。

実際の運用を想定した場合、線閉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 4-5-3 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℃～0.42℃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、小さくすれば検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℃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 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ートの上部に位置しており、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。

表 4-5-1 1:00~4:00 における健全部と変状部の平均温度差

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

4.5.4 コンクリート表面温度とトンネル内気温の関係

トンネルにおける一般的に想定される熱収支モデルの模式図を図 4-5-4 に示す。熱収支モデルが成立する場合、トンネル内気温がコンクリート表面温度より高い場合、健全部より変状部の方が高温となり、逆の場合は変状部の方が低温となる。またトンネル内気温と側壁温度の間の温度差が大きいほど、変状部と健全部の間に温度差が発生する。

一般的な熱収支モデルに沿っているかどうかは、トンネル内気温とコンクリート表面温度（健全部温度）の差と、変状部と健全部の温度差の動きで確認することができる。

線閉時間帯（1:00～4:00）に計測したデータについて箇所、部位・部材、高さに基づき、変状部と健全部の温度差の関連性について確認した。7 地点の温度差分布図を図 4-5-5 から図 4-5-11 に示す。このグラフ上で右肩上がりの直線となれば一般的な熱収支モデルに沿っていると見え、そうでない場合は異なる動きをすると言える。

概ね、熱収支モデルに沿っているものの、区間 A かまち部については、異なる特性を示している。これは、壁面の直下に鉄があることが原因ではないかと推察される。

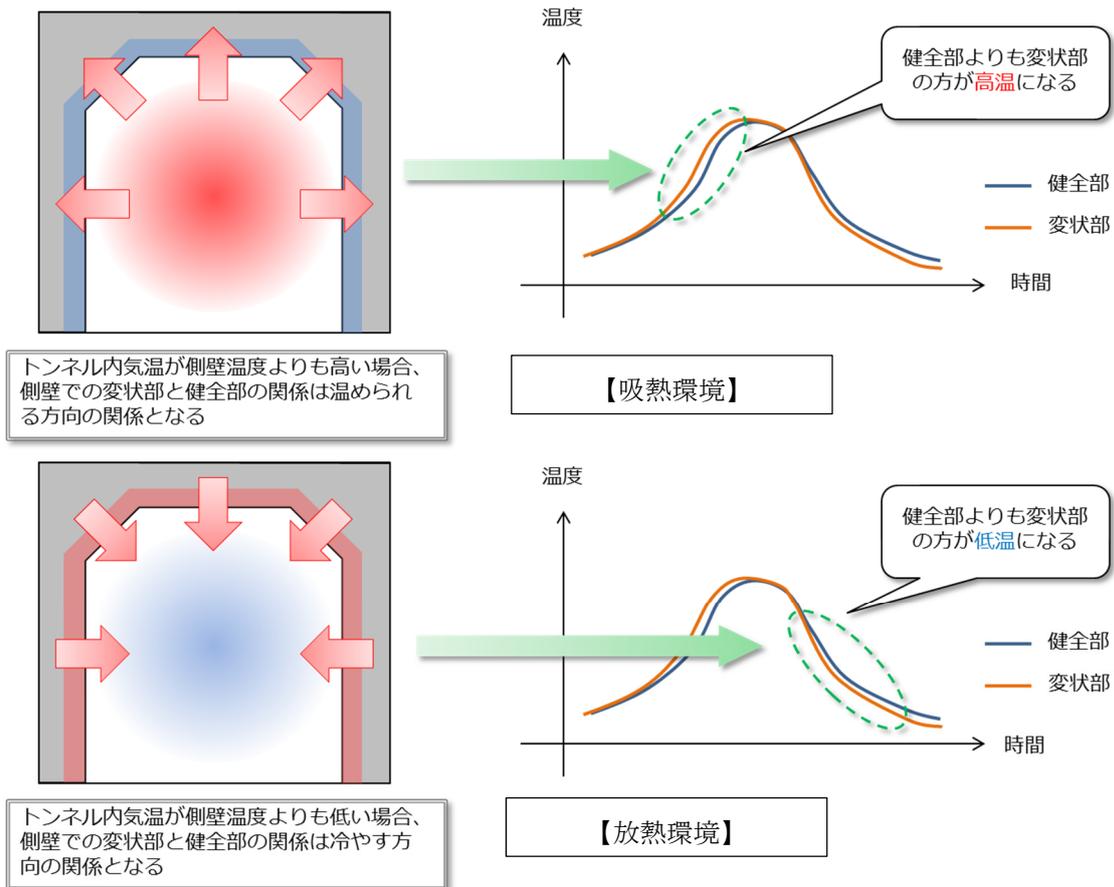


図4-5-4 トンネル熱収支モデルの模式図

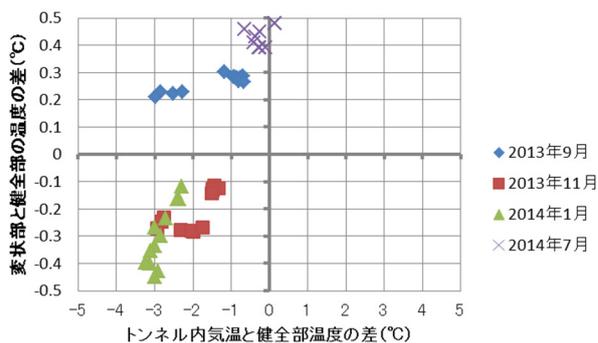


図 4-5-5 区間 A 側壁部

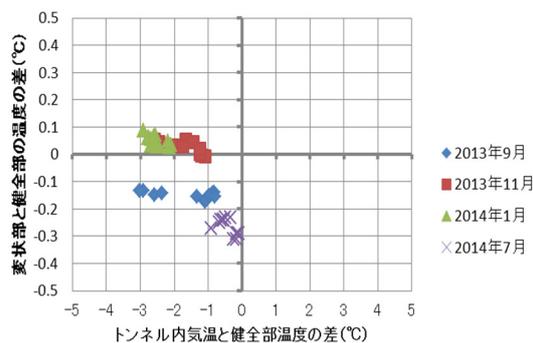


図 4-5-6 区間 A 側壁かまち部

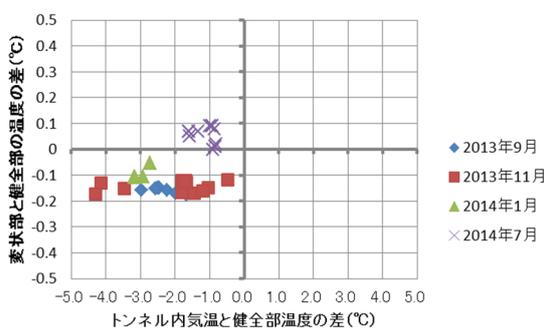


図 4-5-7 区間 A 上床かまち部

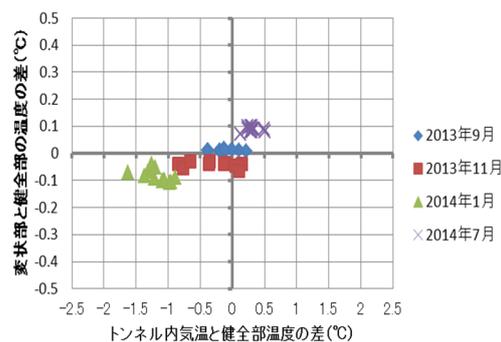


図 4-5-8 区間 B ハンチ部

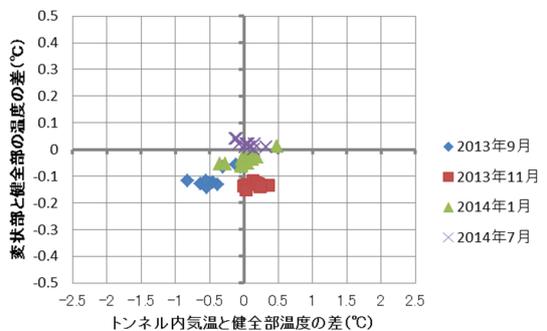


図 4-5-9 区間 B 側壁部

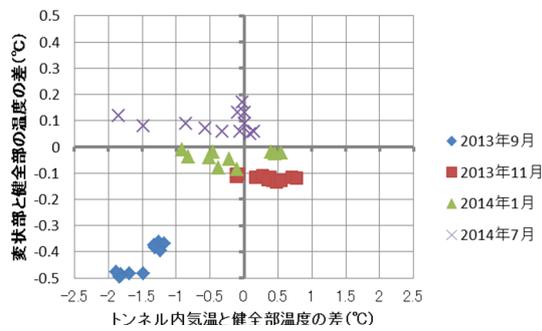


図 4-5-10 区間 C 側壁部

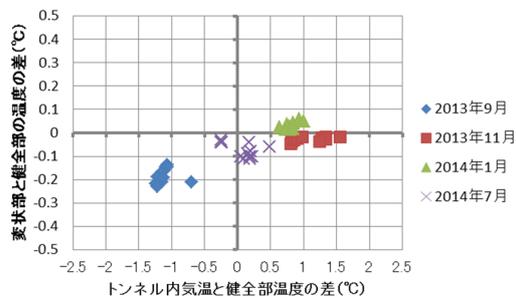


図 4-5-11 区間 C 上床部

4.6 予備検討のまとめ

予備検討では、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 地下鉄トンネル内で赤外線法により変状を、温度差として検出することが出来る。
- ② 地下鉄トンネル内の変状部と健全部間の温度差は時期により異なる。
- ③ 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。
- ④ トンネル内気温と健全部の温度の差が大きい程、健全部と変状部の温度差が大きく、変状の検出率が高いと考えられる。
- ⑤ 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った。

ここでは、赤外線法が適用できる可能性と、大まかな傾向を把握できた。実用化に向けては、更に詳細に以下の4点について検討を行う必要があると考えた。

- ① 浮きの検出が可能な温度環境
- ② 浮きと判断する健全部との温度差の閾値
- ③ 検出可能な浮きの特性
- ④ 実用化に向けての更なる課題

【第4章 参考文献】

- 1) 中村繁貴, 高谷哲, 前田良文, 山本貴士, 宮川豊章: 赤外線サーモグラフィによるかぶりコンクリートはく落予測手法, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 69, No. 4, pp. 450-461, 2013.
- 2) 橋本和明, 明石行雄, 川西弘一: 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) 斎藤寛之: 地下鉄トンネル内温度の予測と検証, 鉄道総研第 264 (266)回月例発表会, pp. 1-4, 2013.
- 4) 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.
- 5) 谷川邦廣: 赤外線撮像技術の変遷, 電気学会誌, Vol.119, No.6, 1999.

第5章 開削トンネルにおける赤外線法適用可能性の検討

5.1 検討概要

5.1.1 検討の流れ

予備検討では、地下鉄トンネル内において、赤外線法で変状部を温度変化として計測できることが分かった。但し、区間、部位、季節等により、赤外線法での検出にバラツキがある。このことから、実用化に向けて、赤外線法に最も適した環境条件と検出できる浮きの特性を把握し、実用化に向けての課題とその解決方法を検討する必要がある。

詳細検討では、上記の事を確認するために、次の手順で検討を行った。

- ① 検討対象全線の赤外線法計測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し、トンネル坑内の温度環境の変化を分析し把握した。
- ② 選定地点における線閉時間内における季節毎の赤外線法計測および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。

また、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、詳細検討ではデジタルカメラを用いて可視画像も同画角にて計測を行った。

5.1.2 対象箇所

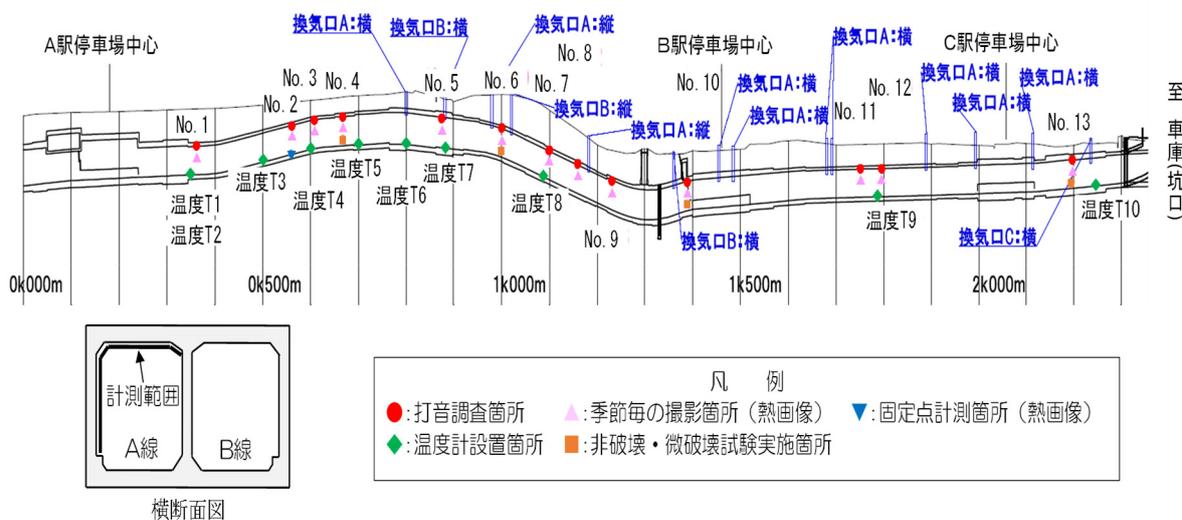


図5-1-1 対象構造の縦断および横断面図

詳細検討の対象は、比較的古い路線の停車場から地上まで約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とした。対象構造物の縦断および横断面図を図5-1-1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。

5.2 トンネル坑内温度環境

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。

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関係があると考えられるため、表5-2-1に示す箇所に温度計を設置した。T1からT5までは、換気口と駅との間を一定間隔で計測し、それぞれからの距離による温度環境の違いを把握する為である。T6からT8およびT10は、それぞれ換気口または坑口付近であり外気温の影響を受ける箇所、T9は換気口と換気口の間であり外気の影響を受けにくい箇所であるためである。

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1.5m～2.0m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5-2-1に示す。

表5-2-1 温度計設置箇所

No.	距離	位置	設置地点の選定理由
T1	0k350m	左中柱	換気口、駅からの距離による違いを比較するため
T2	0k350m	右中柱	
T3	0k500m	左側壁	
T4	0k600m	左側壁	
T5	0k700m	左側壁	
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

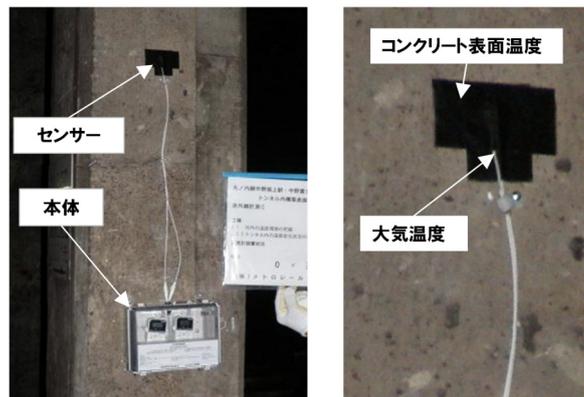


写真5-2-1 中柱に設置した温度計の状況

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5-2-1に示す。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のほうが日較差は大きく、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月が最も大きかったが、その他の地点では、2月が最も大きかった。

トンネル坑内の気温は、地点により一様ではないこと、また季節により一様でないことから、赤外線法による浮きの検出率にはバラツキがあることが予想される。

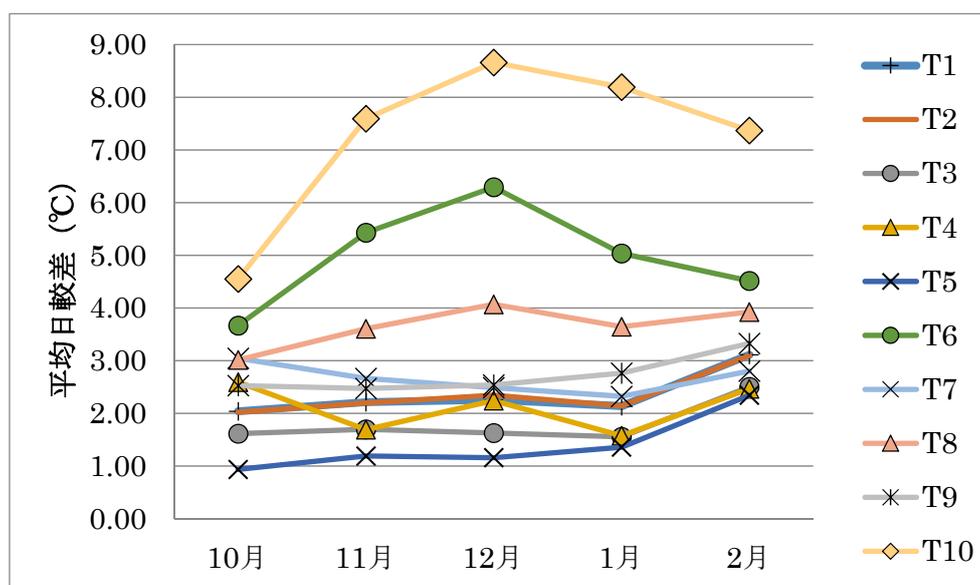


図5-2-1 各地点の月平均日較差

5.3 浮きの検出が可能な温度環境の把握

5.3.1 浮きと判断する温度差

予備検討(4.5.3変状部と健全部の温度差)において、浮き部と健全部の最小温度差が0.03℃であったこと、また、既往の研究¹⁾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)を、閾値として検討を実施した。

5.3.2 季節毎の赤外線法計測

(1)計測地点の選定

先ず、9月27日に、対象区間の上床を全て赤外線法により計測を実施し、温度差から浮きを確認できると見込まれる13地点を選出し、表5-3-1に示す箇所を打音検査および赤外線法計測の地点とした。

表5-3-1 季節毎の赤外線法計測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				

(2)計測概要

トンネル坑内は外気の流出入があるため、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、外気の流出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、赤外線法で浮きが発見された箇所を含む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。

計測は、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。

(3)打音検査との比較概要

選定した13地点において打音検査を行い赤外線法により検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、熱画像から検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検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検出率は、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、写真5-3-1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音①、打音②、打診③を整合した浮きと判定し、重なっていない打音A、打音B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。

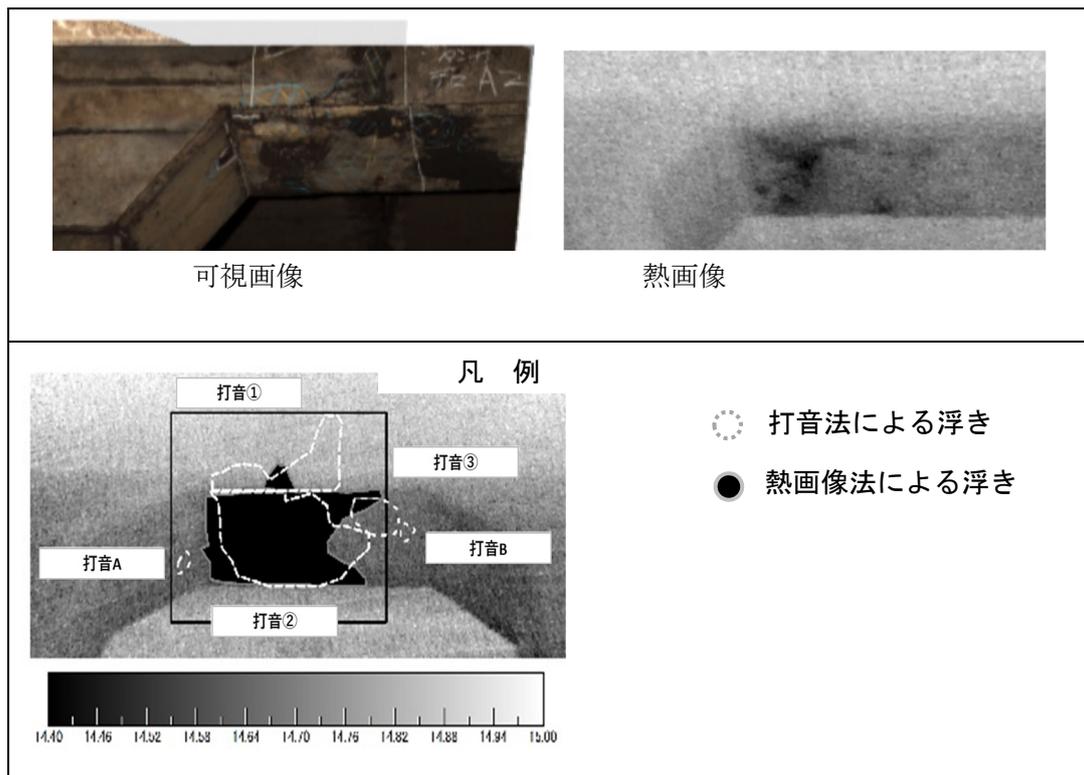


写真5-3-1 打音法との比較例

(4)計測結果

代表例として、No.13地点における各季節で計測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写真5-3-2に示す。この結果、赤外線法では計測する時期によって、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。

	熱画像	検出した浮き
2013/10/18 撮影		
2013/11/19 撮影		
2014/2/10 撮影		
	可視画像	凡例
2013/10/18 撮影		■ : 赤外線法 ○ : 打音法

写真5-3-2 各季節の熱画像と浮きの比較事例(No.13)

次に検討地点毎の打音法に対する赤外線法の浮き検出率を図5-3-1に示す。打音法に対する赤外線法の浮き検出率(%)は、全体で52%であったが、計測地点によって28~90%とばらつきがある事がわかった。検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、検出率が高くなったと想定される。

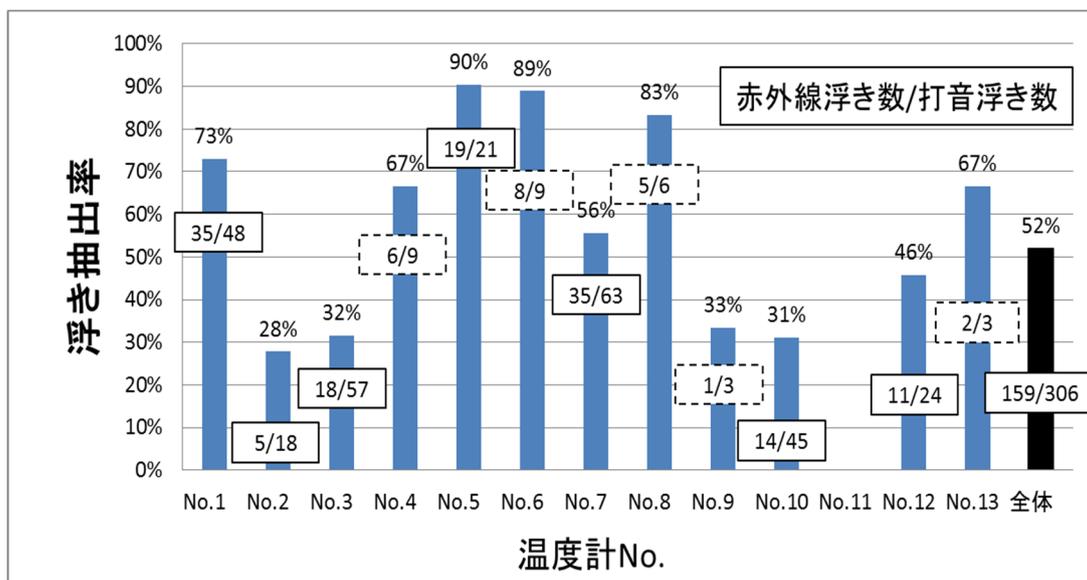


図5-3-1 調査地点毎の打音法に対する赤外線法の検出率

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（以下、「環境温度」）が、浮きの検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計測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検出率を算出した。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検出率を図5-3-2に示す。比較に当たっては、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（吸熱環境）、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（放熱環境）、③コンクリート表面がトンネル坑内大気温度より高く（放熱環境）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吸熱環境の場合は、検出率は40%程度と低く、温度差が大きい範囲でも検出率に大きな変化が見られなかった。
- ②放熱環境の場合は、検出率は比較的高く、温度差が大きくなるほど検出率も高くなり温度差が0.35℃を超えると検出率は76%となった。
- ③放熱環境かつ浮きの大きさが10cm×10cm以上とした場合は、さらに検出率が高くなり、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、放熱環境、かつ環境温度が大きくかつ浮きの大きさが大きいほど検出率が高くなることが明らかになった。

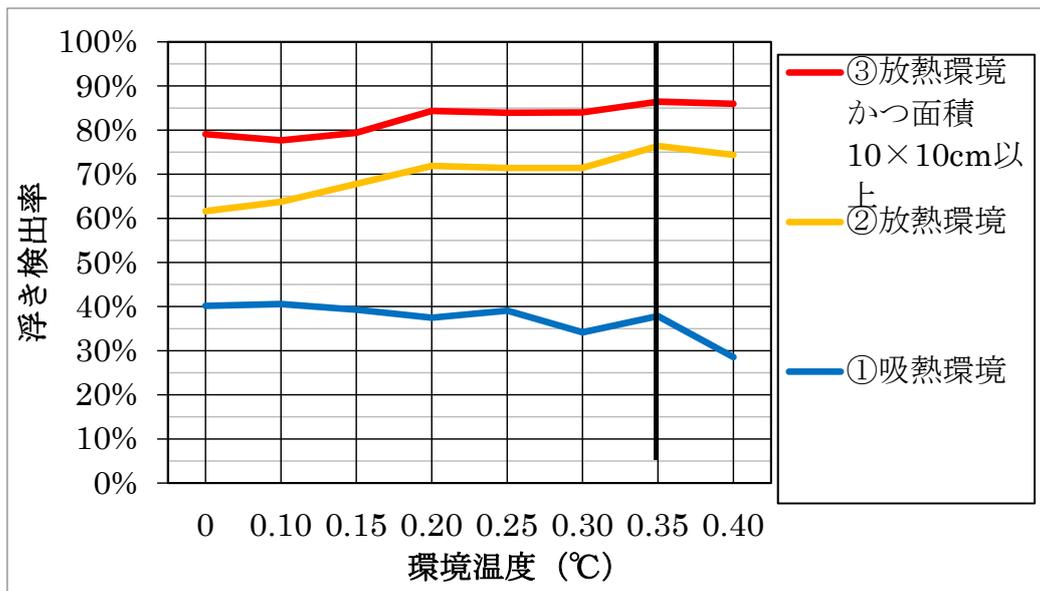


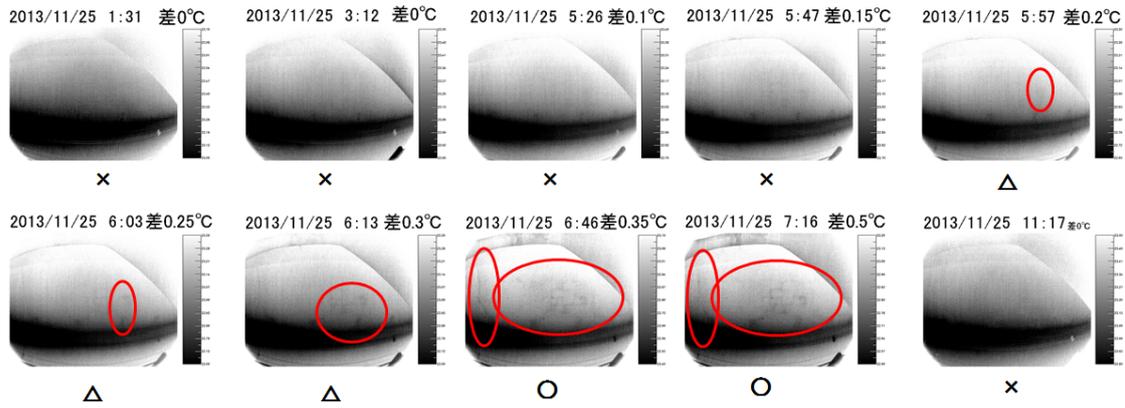
図5-3-2 環境温度による浮きの検出率

5.3.3 赤外線法による定点計測

計測は線閉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日間の定点連続計測を行った。計測は、赤外線カメラを線路運行に支障のない箇所固定し、上床版、ハンチおよび側壁の一部を視準した。計測間隔は、1分に設定し自動計測した。熱画像の撮影画角は、4.1×3.1mとした。計測は自動で5日間行い、6日目に計測を停止し、機材を撤去した。

写真5-3-2に2013年11月25日に0 k 556m付近で定点計測を行った時の環境温度が0～0.5°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程度高くなると検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。

当該箇所の打音検査の結果および2013年11月25日午前7時16分に計測した熱画像からの浮きの検出例を写真5-3-3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検討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5-3-7に示す。



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

写真5-3-2 環境温度0°C～0.5°Cまでの熱画像例



■ 熱画像から検出した浮き [---] 打音検査による浮き ▨ 表面に見られる豆板 □ 打音検査の範囲

写真5-3-3 定点計測地点の打音調査結果および熱画像による浮き検出例

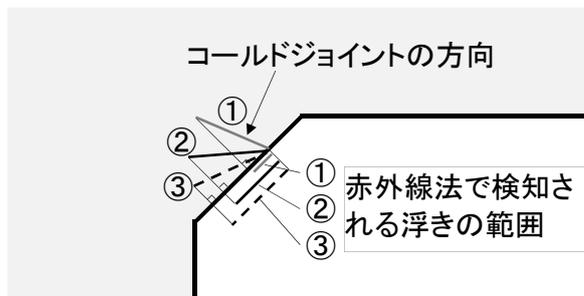


図5-3-3 コールドジョイントによる浮きのイメージ

5.4 赤外線法で検出する浮きの条件

5.4.1 試験概要

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、季節毎の赤外線法計測地点から、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の4地点から、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。（写真5-4-1）

(1)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めた

(2)内視鏡試験

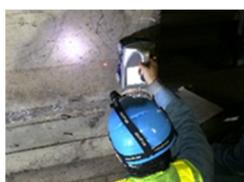
熱画像で変温部と確認された箇所について、ドリル削孔を行い、孔内に内視鏡を挿入し画像撮影を行った。撮影画像から、浮きの深さや内部の状況（豆板の深さ等）の確認を行った。

(3)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5-4-1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。



レーダー試験



内視鏡試験（豆板画像）



弾性波試験

写真5-4-1 各試験概要

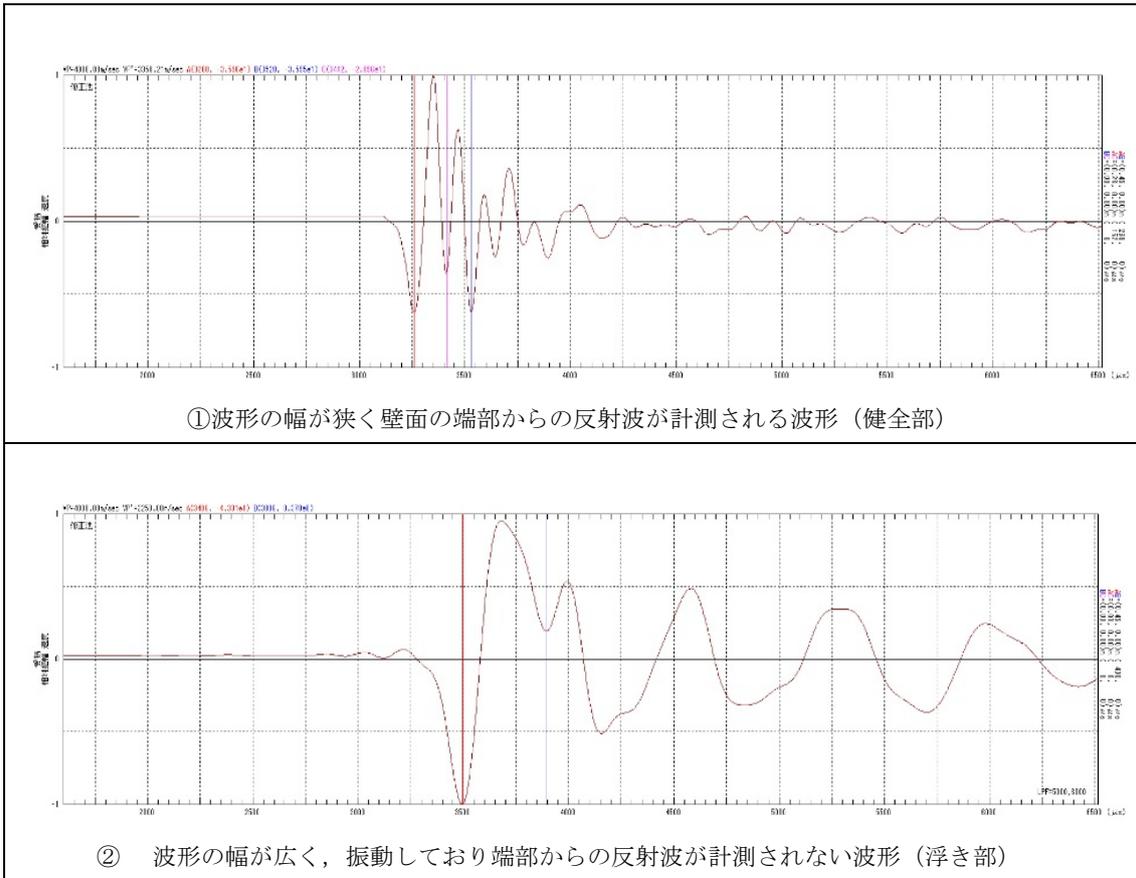


図5-4-1 弾性波試験における健全部と浮き部の波形の例

5.4.2 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5-4-1、写真5-4-2に示す。

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2～16mm、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17～102mmであった。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.

また, ③, ④, ⑨, ⑩のように, 浮き深さが小さい方が, 打音と一致する傾向にあることが分かる.

表5-4-1 打音検査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(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			
	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			
	浮き部と健全部温度差(t2)	0.09	0.08~0.10		0.1			0.12			
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
電磁波レーザー試験	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

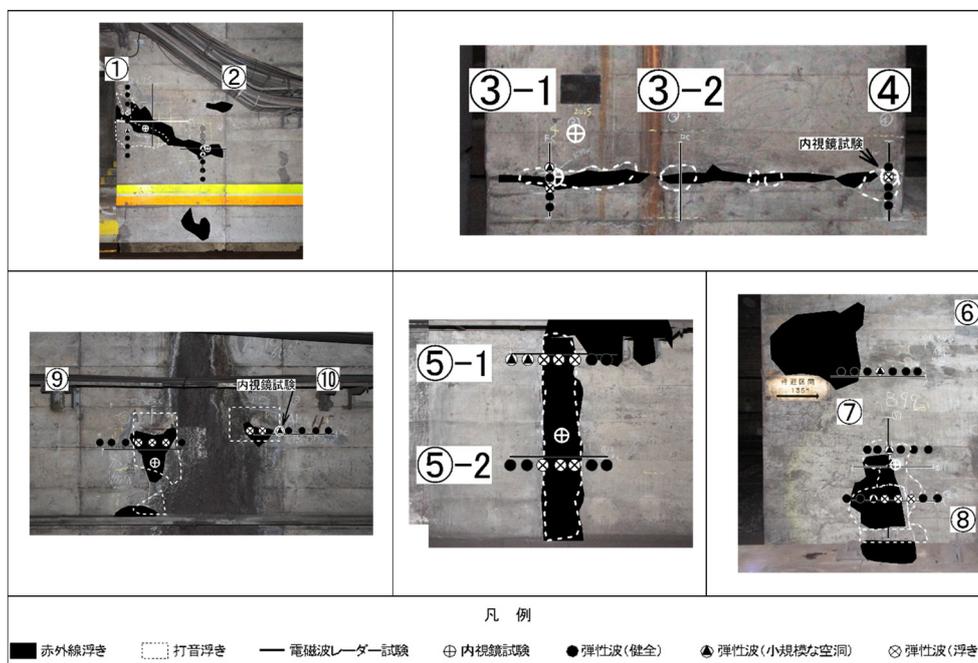


写真5-4-2 打音検査との比較および微破壊・非破壊試験結果概要

5.5 浮きの検出が可能な時期と区間

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℃以上高くなる環境条件では、浮きの検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（線閉時間帯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℃以上高くなる日を計測可能日とし、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計測可能日数を集計した。計測可能日数の地点ごとの集計結果を表5-5-1に示す。

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月で計測可能日の割合が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月で計測可能日の割合が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%程度の区間と考えられる。
- ③12月で計測可能日の割合が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月で計測可能日の割合が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、計測可能日の割合が80%以上となる区間は12月と比べて減少したが、計測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月の計測可能日の割合が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においても計測可能日が見られる。
- ⑥全体としては、日較差が大きくなると、計測可能日も増加する傾向にあった。
- ⑦計測可能な日数の割合が低いT4、T5の周辺は、浮き検出率も低い（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。

表5-5-1 撮影可能な日数の集計

月	測定日数	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
		350	350	500	600	700	800	881	1084	1780	2236
2013年10月	28	8	14	24	3	0	-	-	-	-	-
	26	-	-	-	-	-	21	26	19	8	25
		29%	50%	86%	11%	0%	81%	100%	73%	31%	96%
2013年11月	30	16	19	30	1	0	15	30	29	17	30
		53%	63%	100%	3%	0%	50%	100%	97%	57%	100%
2013年12月	31	27	26	31	8	0	23	30	30	28	31
		87%	84%	100%	26%	0%	74%	97%	97%	90%	100%
2014年1月	31	20	24	29	7	2	12	30	30	27	31
		65%	77%	94%	23%	6%	39%	97%	97%	87%	100%
2014年2月	24	12	14	20	6	2	5	24	24	23	24
		50%	58%	83%	25%	8%	21%	100%	100%	96%	100%

5.6 開削トンネルにおける検討のまとめ

開削トンネルにおける赤外線法適用可能性の検討において明らかになった事項を以下にまとめる。

(1) 赤外線法による浮きの検出について

- ① 打音法に対する赤外線法の浮きの検出率は全体で52%であったが、撮影地点により28%～90%とばらついた。
- ② 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検出率が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。
- ③ 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検出率は変わらなかった。
- ④ 赤外線法では、豆板も変温部として検出され、コールドジョイントによる浮きは検出できないという事象がみられた。

(2) トンネル内温度環境について

- 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 日較差が大きいと撮影可能日数（線閉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。

以上の結果から、赤外線法は有効であるが、地点や季節により検出が困難な場合があることが分かった。

これらの事から、第6章において

- ① シールドトンネルにおいても、赤外線法の適用可能性を検討する。
- ② 浮きのランクの概念を導入し、ランク毎の検出率を検討する。
- ③ 実用化に向けて更なる課題を抽出する。

その後7章において

- ① 予め環境温度が放熱環境かつ0.35℃を超える期間を特定する方法を検討する。
- ② 特別全般検査の結果と比較し、赤外線法の有効性を実証する。

その上で、実務への適用方法を提案することとする。

【第5章 参考文献】

- 1) 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

第6章 シールドトンネルにおける赤外線法適用可能性の検討

6.1 検討概要

第4章，第5章における検討により，開削トンネルにおいては，トンネル坑内の温度環境によって，赤外線法の適用が可能である時期や区間があることが明らかとなった．次に，シールドトンネル区間においても，同様に赤外線法の適用が可能であるかを検討する為に，運河の下を通過する，ある駐車場の端から約100mのシールドトンネル単線区間を対象として検討を実施した．検討区間の起点側は鉄筋コンクリート造の駅駐車場である．検討区間の構造は，二次覆工省略型のシールド工法で施工された内空5,800mmの中子型セグメントであり，赤外線熱計測範囲はシールド上部の半円とした．

検討区間の概要および，熱計測範囲を図6-1-1，6-1-2に示す．

検討手順を以下に示す．

- ① 検討対象区間の坑内気温，コンクリート表面温度を連続測定し，トンネル坑内の温度環境の変化を分析し，計測に適する時期を把握する．
- ② 検討対象区間において線閉時間内に季節毎の赤外線熱計測を行い，浮きを検出する．
- ③ 検討対象区間において打音検査を行い，赤外線熱計測により検出した浮きの検出精度を評価する．
- ④ 今後の維持管理実務へ適用するための課題や今後の方針を検討する．

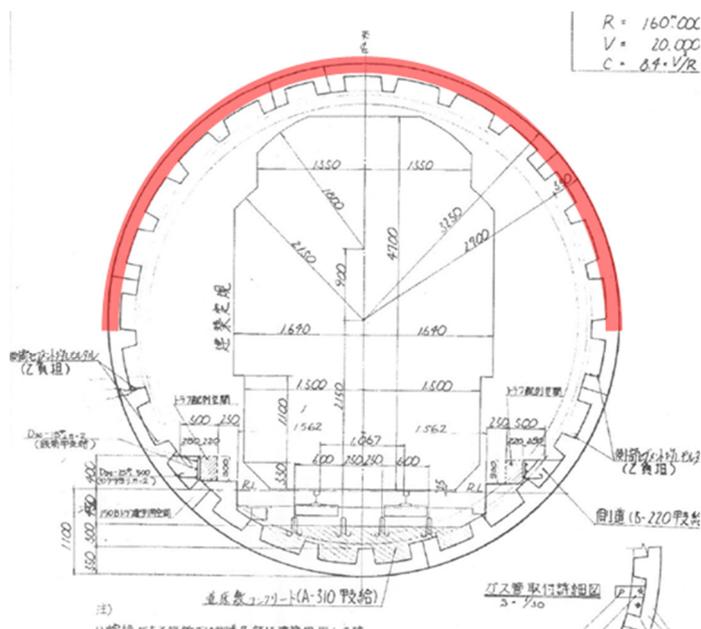


図6-1-1 赤外線計測範囲（横断面図）

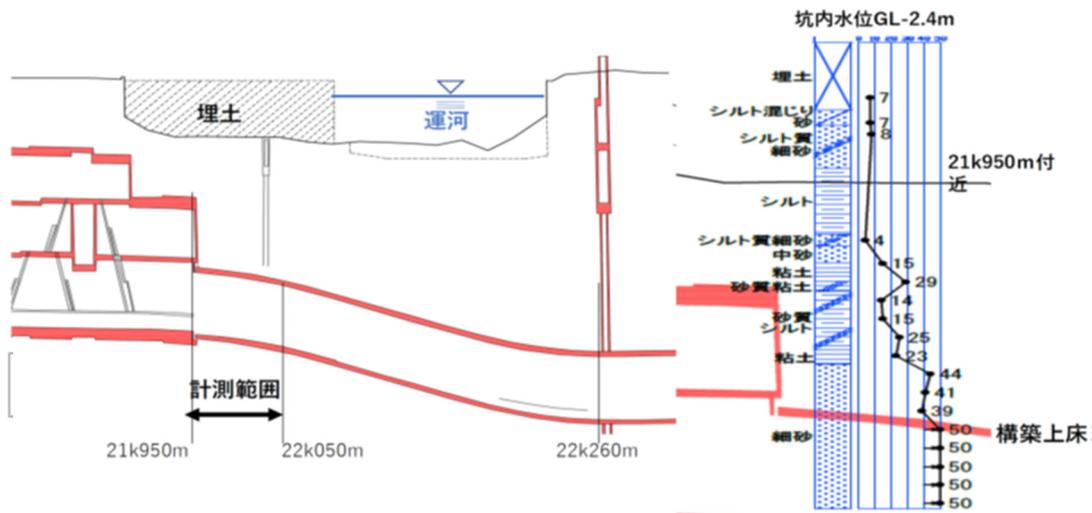


図6-1-2 赤外線計測範囲（縦断面図）

6.2 トンネル坑内温度環境

6.2.1 月毎の温度環境

トンネル坑内の長期にわたる温度環境の変化を把握するために坑内大気温度、コンクリート表面温度の測定を行った。

測定期間は、2014年7月16日～2015年2月28日、写真6-1-2に示す計測範囲のほぼ中間地点付近、軌道面から約1.5mの高さに固定式小型温度計（自動記録）を設置し、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を測定した。温度計の状況を図6-2-1に示す。

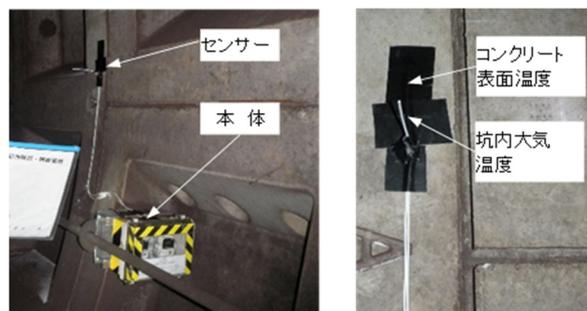


写真6-2-1 温度計設置状況

中子型セグメントは鉄筋コンクリート構造であり浮きの生じる個所は表層のかぶり部分であること、熱伝導率も5章における開削トンネルと同等と考えられることから、測定箇所が温度差 0.35°C 以上の放熱環境となっていれば、浮きの検出率が高くなると考えられたため、実務における計測可能な時間帯（線閉時間帯1:00～4:00）で、温度差 0.35°C 以上の放熱環境となる日を計測可能日とし、トンネル坑内に設置した温度計の測定結果から、月毎の撮影可能日数を集計した。その結果、撮影可能日は、7月～9月が27%～31%と低く、11月～1月は

84%~90%と高くなった。月毎の計測可能日の割合を図6-2-1に示す。

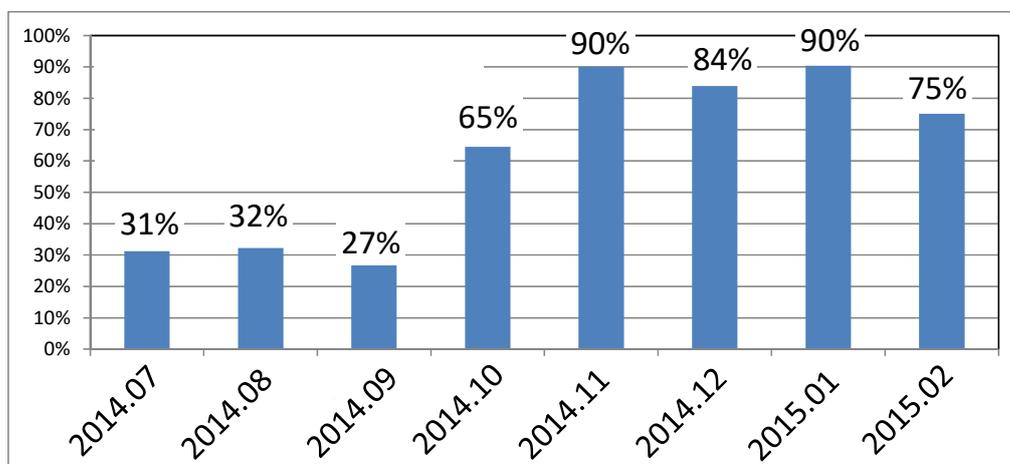


図 6-2-1 月毎の計測可能日の割合

6.2.2 トンネル縦断方向および横断方向の温度環境

トンネル縦断方向および横断方向の温度環境の変化を把握するために、赤外線熱計測で計測した熱画像からトンネル縦断方向および横断方向の坑内大気温度とコンクリート表面温度を計測した。計測箇所は、縦断方向はトンネル天井付近、横断方向は29k951m付近の左右側壁および天井付近とした。

ここで、坑内大気温度は熱伝導率が高い金属部分の温度とした。これは、大気温度とした金属（鉄）部分は熱伝導率が高いため坑内大気温度が変化した場合でも短時間でその温度と平衡状態に近くなり、また、選定箇所は錆や汚れが付着しているため放射率もコンクリートに近く、放射率の違いによる温度値や人体などからの反射の影響もコンクリートと同等と考えたからである。

赤外線法による坑内大気温度の測定結果を写真6-2-2に示す。また、熱計測時のコンクリート表面温度について、固定式小型温度計と熱画像による計測結果の比較を表-6-2-1に示す。大気温度、コンクリート表面温度ともに若干の誤差はあるものの近い値になっている。よって、実際の気温と熱画像から測定した温度では誤差はあるものの、金属部分の温度を便宜的に坑内大気温度とした本手法は妥当であると判断した。

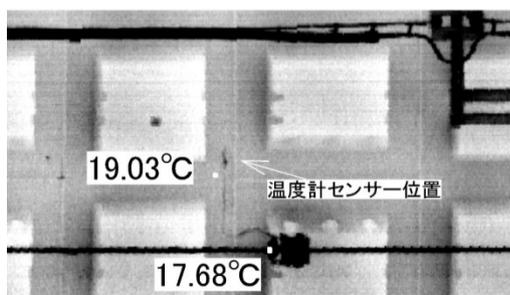


写真6-2-2 赤外線熱計測による坑内大気温度の測定結果

表6-2-1 赤外線熱計測時の坑内大気温度と表面温度の比較 (°C)

	①トンネル坑内 大気温度	②コンクリート 表面温度	温度差 (①-②)
温度計	17.60	19.20	-1.60
熱画像	17.68	19.03	-1.35
誤差	-0.08	0.17	-0.25

29k951m付近の横断方向の温度環境を図6-2-2に、熱画像から計測した縦断方向の坑内の温度環境を図6-2-3にそれぞれ示す。トンネル縦断方向の坑内大気温度とコンクリート表面の温度環境は、放熱環境であったが、その温度差は起点側の1.0°Cから終点側の0.5°Cと、終点に向かうほど小さくなった。

また、トンネル横断方向の坑内大気温度とコンクリート表面の温度環境は、側壁部、天井部それぞれ放熱環境であったが、その温度差は側壁部の1.98°C～2.09°Cに対して天井部は1.26°Cであり、天井部の方が0.72°C～0.83°C小さくなる結果となった。

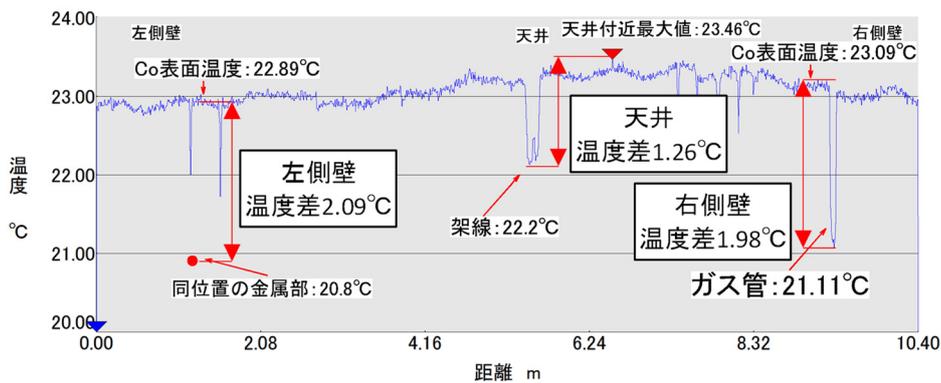


図6-2-2 横断方向の坑内大気温度とコンクリート表面温度

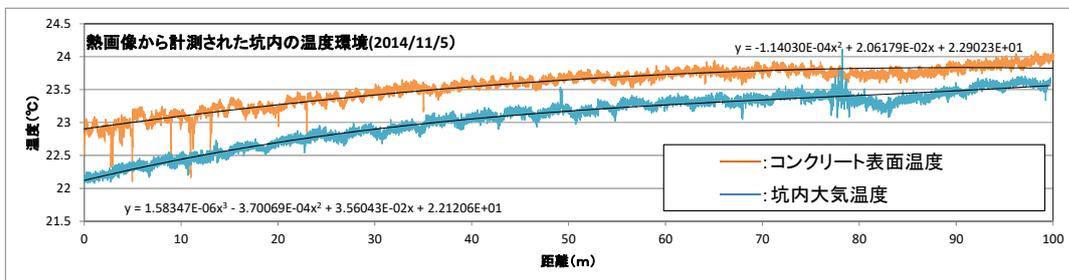


図6-2-3 縦断方向の坑内大気温度とコンクリート表面温度

6.3 赤外線法計測

赤外線熱計測に適した時期や、浮きの検出精度を把握するために、季節毎（8月，11月，1月）の移動計測を行った。計測装置の概要を図6-3-1，写真6-3-1にそれぞれ示す。

計測は，保線作業用の軽便トロに，回転雲台付きの撮影架台に固定した赤外線カメラおよびデジタルカメラを搭載し，軌道上を移動しながら対象範囲全体の熱画像および可視画像を撮影した。

使用した赤外線カメラのレンズは，広角レンズ（13mm）で撮影画角は約4.2×2.8m，解像度は7mm／画素程度とした。また，可視画像の画角も約4.2×2.8mとし，解像度は0.75mm／画素程度とした。周長方向のカメラ回転角度を変更して4回の分割撮影により対象範囲全面を計測した。

計測した赤外線熱画像から，これまでの研究を参考として約5cm×5cm以上の範囲でコンクリート表面温度が周囲に比べて0.03℃～0.1℃以上低温もしくは高温となっている変温部を浮きとして検出した。ただし，可視画像から豆板や漏水等の浮き以外と判断される変温部は除いた。

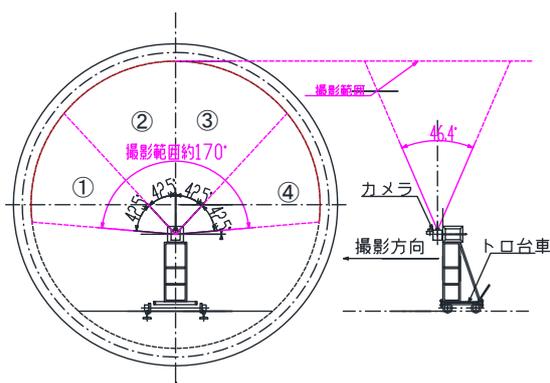


図6-3-1 計測装置概要

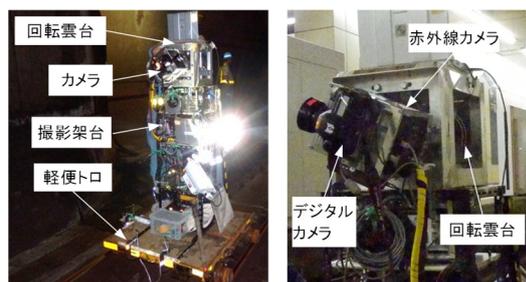
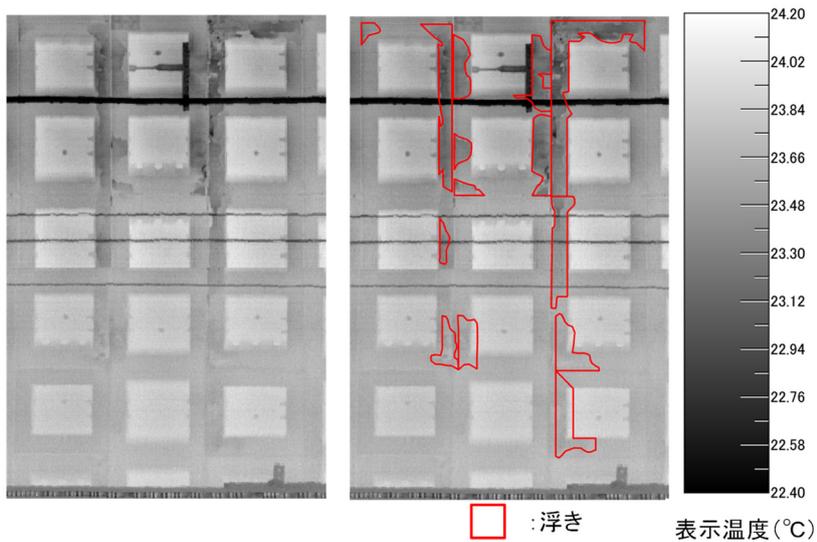


写真6-3-1計測装置概要

得られた熱画像および可視画像から，それぞれ浮きを検出した。現地での調査日数はそれぞれ1日であった。浮きの検出例を写真6-3-2に，損傷部位を表6-3-1に示す。浮きを検出するにあたって，熱画像による変温部を可視画像で確認すると健全と考えられる部分も存在することが分かった。これは，中子型セグメントは凹凸やセグメント間の段差があること，遊離石灰などの析出物が付着していることなどから，健全部においても一様な温度変化が起こらないため温度のムラが生じたことが原因と考えられた。

よって，現地の状況を確認し，損傷部位や形状等，次の条件にあてはまる変温部については，ノイズとして判断することとした。

- ① 損傷部位が表6-3-1に示す1，3，5の位置にあり，かつ大きさが0.01m²以下の場合。
- ② 損傷部位が表6-3-1に示す1，3，5の位置にあり，かつ幅が5cm以下の場合。
- ③ 析出物のある範囲において変温部が析出物の範囲と一致するもの（写真6-3-3）。



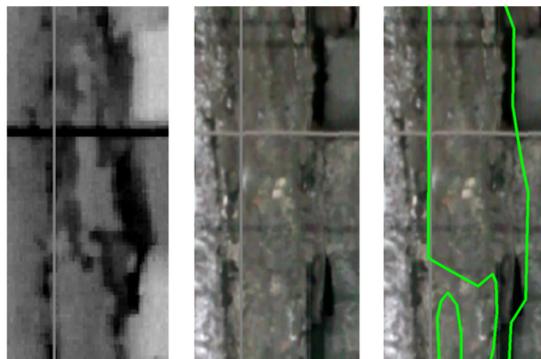
熱画像

浮きの検出

写真6-3-2 浮きの検出例

表6-3-1 損傷部位

概要図	部位	
	1	主桁上面端部
	2	主桁上面隅角部
	3	背板上面
	4	注入孔付近
	5	主桁, 縦リブ側面
	6	継手ボルト付近



熱画像

可視画像

変温部の範囲

写真6-3-3 析出部分のみに変温部があるもの

固定式小型温度計によるそれぞれの計測日の撮影時間帯の温度環境を表6-3-2に、それぞれの計測日の温度環境の変化を図6-3-2、図6-3-3、図6-3-4に示す。

1回目の計測日は、平均0.06℃の吸熱環境で坑内大気温度とコンクリート表面の温度差が非常に小さい環境であった。他方、2回目、3回目は、平均1.72℃、1.51℃の放熱環境で、坑内大気温度とコンクリート表面の温度差が0.35℃を上回る放熱環境であり、好条件であった。

表6-3-2 それぞれの計測日の撮影時間帯の温度環境

計測日	温度差 (坑内大気-コンクリート表面)	浮き検出温度差 (変温部-健全部)
1回目 2014年8月19日	最大+0.08℃、最小+0.06℃ 平均+0.06℃(吸熱環境)	+0.05℃~+0.5℃ 変温部が高い
2回目 2014年11月4日	最大-1.90℃、最小-1.38℃ 平均-1.72℃(放熱環境)	-0.02℃~-0.60℃ 変温部が低い
3回目 2015年1月13日	最大-1.56℃、最小-1.40℃ 平均-1.51℃(放熱環境)	-0.01℃~-1.62℃ 変温部が低い

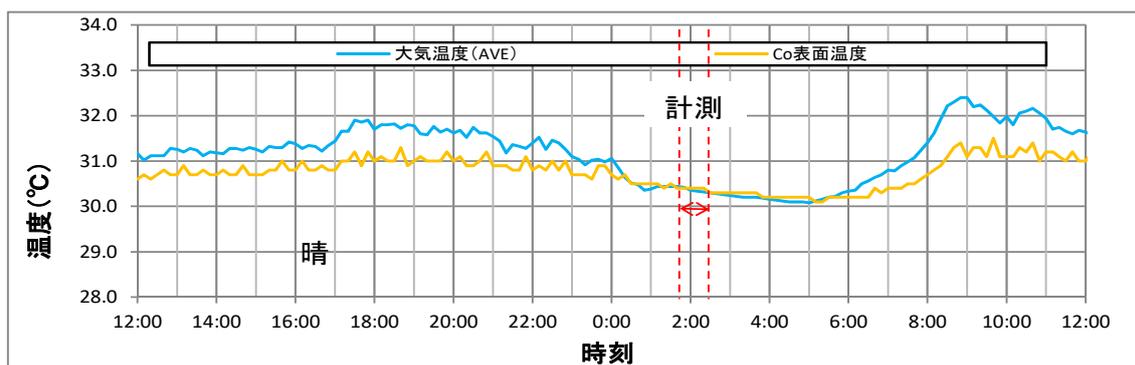


図6-3-2 赤外線熱計測日2014年8月19日の温度環境

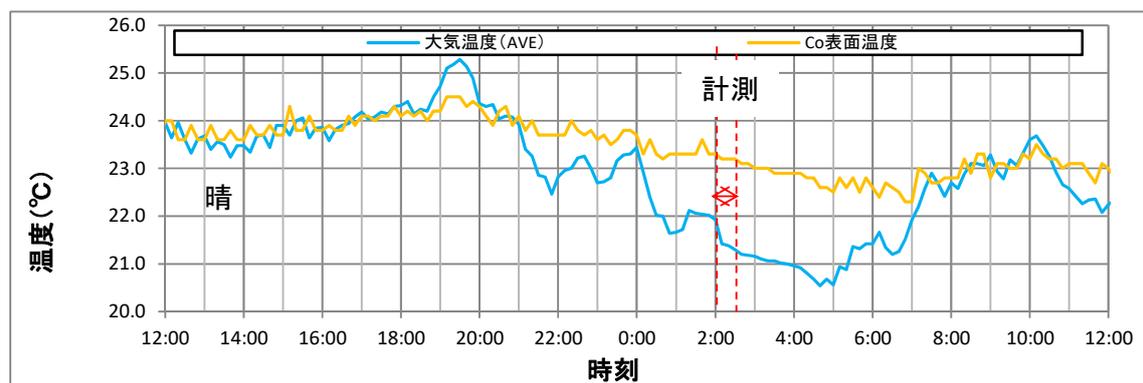


図6-3-3 赤外線熱計測日2014年11月4日の温度環境

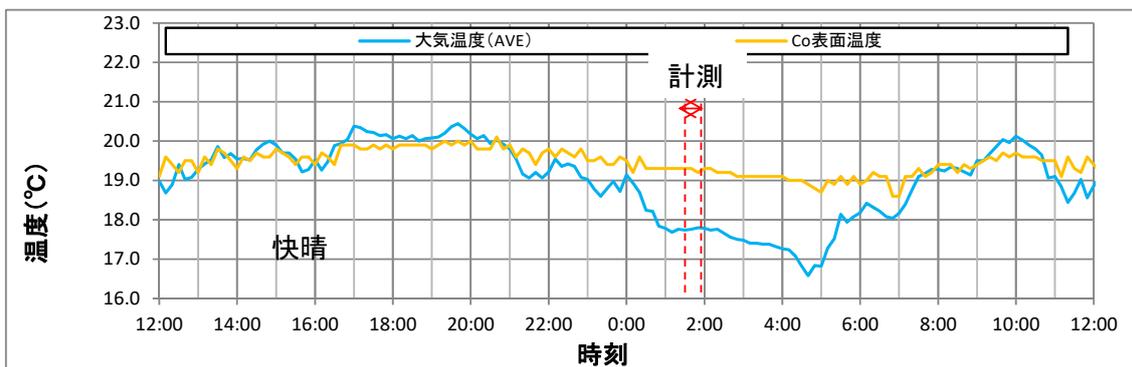


図6-3-4 赤外線熱計測日2015年1月13日の温度環境

6.4 打音検査, 浮き部厚み計測

6.4.1 打音検査

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。また、漏水の有無についても確認した。打音調査による浮きの判定基準を表6-4-1に示す。

表6-4-1 打音検査による浮きの判定基準

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

打音調査は、2014年7月8日~15日の内7日間を要した。打音調査の結果、浮き箇所は全体で246箇所検出された。判定別では、打音判定Aは2箇所（0.8%）、打音判定Bは21箇所（8.5%）、打音判定Cは223箇所（90.7%）であった。

また、漏水（漏水跡含む）の有無別では、漏水が無い箇所が55箇所（22.4%）、漏水のある箇所が191箇所（77.6%）であった。その結果を表6-4-2に示す。

表6-4-2 打音検査結果

判定	漏水無	漏水有	計	比率
A	0	2	2	0.8%
B	2	19	21	8.5%
C	53	170	223	90.7%
計	55	191	246	—
比率	22.4%	77.6%	—	—

6.4.2 浮き部厚み計測

浮き部の状態を把握するために、打音判定結果および漏水の有無、赤外線熱計測による検出結果を勘案して選定した10箇所において浮き部の厚み計測を実施した。今回の浮きの発生原因はセグメント内部の鉄筋腐食による膨張圧により剥離層が生じることでありと考えられることから浮き部厚みはかぶり深さとほぼ等しいと仮定し、計測方法は、はつり法および電磁誘導法による鉄筋探査とした。はつり法により計測を行った箇所は、鉄筋の防錆処置を行った。

また、全ての箇所についてははつり法を適用しない理由は、現時点ではく落のおそれがない浮きについてはむやみにはつり落としを行わないという施設監理者の判断による。

浮き部の厚み計測の結果、浮きの厚みは19mm~30mm（平均23mm）であった。浮き厚み計測結果を表6-4-3に示す。はつりによる確認では、浮き部（No.2, no.9）は鉄筋の腐食により生じていることが分かったため（写真6-4-1）、中子型セグメントの浮きは鉄筋の腐食膨張により生じていると判断した。

また、赤外線熱計測で検出できなかった打音判定CのNo.8およびNo.10は、漏水もなく濁音も小さかった。

表6-4-3 浮き厚み計測結果

No	距離 (m)	判定	漏水	面積 (m ²)	赤外線 検出	厚み(mm)				方法
						1	2	3	av	
1	10	C	有	0.96	○	19	18	20	19	鉄筋探査
2	21	B	無	0.17	○	-	-	-	30	はつり
3	27	B	無	0.18	○	22	22	24	23	鉄筋探査
4	76	B	有	0.35	○	27	25	24	25	鉄筋探査
5	78	C	無	0.25	○	23	23	23	23	鉄筋探査
6	81	C	有	0.17	○	22	22	25	23	鉄筋探査
7	85	C	有	0.08	○	22	21	23	22	鉄筋探査
8	88	C	無	0.16	×	21	21	20	21	鉄筋探査
9	91	A	有	0.23	○	-	-	-	20	はつり
10	99	C	無	0.22	×	23	23	23	23	鉄筋探査
平均									23	



写真6-4-1 打音判定A箇所の例（はつり後）

6.5 赤外線法計測と打音検査との比較

打音調査により検出した浮きと赤外線熱計測により検出した浮きの結果を比較する。赤外線熱計測と打音判定別の打音調査の比較を表6-5-1に、赤外線熱計測に対する打音調査との整合性を表6-5-2に示す。

表6-5-1 赤外線熱計測と打音判定別の検出比較

項目		打音判定A			打音判定B			打音判定C			計	
		漏水無	漏水有	計	漏水無	漏水有	計	漏水無	漏水有	計		
打音検査 7月8～15日	箇所数	0	2	2	2	19	21	53	170	223	246	
赤外線熱計測	1回目 8月19日	検出数	0	2	2	1	7	8	5	76	81	91
		検出率		100%	100%	50%	37%	38%	9%	45%	36%	37%
	2回目 11月4日	検出数	0	2	2	2	18	20	15	120	135	157
		検出率		100%	100%	100%	95%	95%	28%	71%	61%	64%
	3回目 1月13日	検出数	0	2	2	2	18	20	18	124	142	164
	検出率		100%	100%	100%	95%	95%	34%	73%	64%	67%	

表6-5-2 赤外線熱計測の打音調査との整合性

項目		打音浮き 一致	打音浮き 一致しない (過検出)	計
1回目 2014年8月	箇所数	91	213	304
	割合	30%	70%	—
	面積(m ²)	8.70	7.80	16.50
	割合	53%	47%	—
2回目 2014年11月	箇所数	157	115	272
	割合	58%	42%	—
	面積(m ²)	23.09	4.43	27.52
	割合	84%	16%	—
3回目 2015年1月	箇所数	164	115	279
	割合	59%	41%	—
	面積(m ²)	27.41	7.61	35.02
	割合	78%	22%	—

表6-5-1は打音調査の浮きに対して赤外線熱計測の浮きが一致した箇所数を検出数、打音調査による浮きに対する赤外線熱計測による浮きの割合を検出率とし、各打音判定毎に集計したものである。1回目の計測では打音判定Aの検出率は100%であったものの、打音判定Bおよび打音判定Cの検出率はそれぞれ38%、36%と低いものとなり、はく落のおそれがある打音判定Aの浮きを除き検出が困難な結果となった。これは、表-6-3-1より計測時の温度環境が、平均0.06℃の吸熱環境で坑内大気温度とコンクリート表面の温度差が非常に小さかったためと考えられる。

2回目および3回目の計測では、打音判定Aおよび打音判定Bの検出率は100%、95%であり、問題があるとされる浮きはほぼ検出できた。これは、表-6-3-2より計測時の温度環境が平均

1.72℃、1.51℃の放熱環境で、0.35℃を上回る放熱環境であったためと考えられる。

打音判定Cの浮きについては、検出率はそれぞれ61%、64%であった。漏水の有無を考慮すると、漏水が有る場合の検出率は71%、73%、漏水が無い場合の検出率は28%、34%と低い結果となった。

表6-5-2は赤外線熱計測の浮きに対して打音調査の浮きと一致した箇所と、一致しなかった箇所の箇所数と面積を集計したものである。ここで、打音調査では検出されなかった浮きを過検出とすると、過検出の割合は、1回目の計測では箇所数70%、面積47%であったが、2回目は箇所数41%、面積16%、3回目は箇所数42%、面積22%であり、面積割合では小さい傾向にあることが分かった。

部位毎（左右側壁、天井部）の検出率を図6-5-1に、トンネル縦断方向の10m毎の検出率を図6-5-2にそれぞれ示す。

図6-5-1より、部位毎の2回目、3回目の検出率は、側壁部は71%~87%で天井部は44%~49%であった。天井部は側壁部と比較して検出率が低い結果となった。1回目の結果も検出率は低いものの傾向は同じであった。

図6-5-2より、縦断方向の検出率は、浮きの程度や損傷数による影響は多少あると考えられるが、各区間で浮きが20箇所以上存在する範囲（0m~30mおよび70m~100m区間）において2回目、3回目は起点側0m~10mの範囲が83%~89%と最も高く、終点の90m~100mの範囲では53%と徐々に低下している。1回目の検出率は、全体的に2回目、3回目よりも低いものの傾向は同様であった。

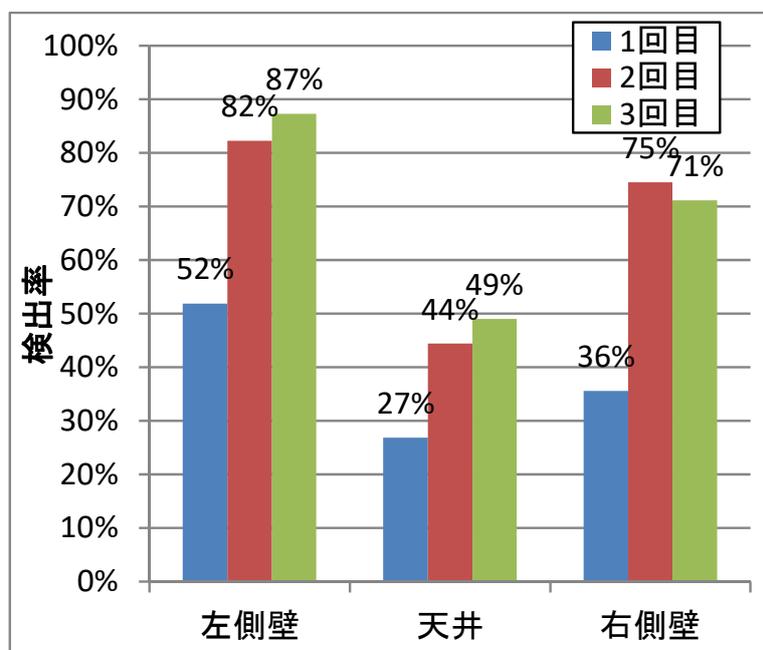


図6-5-1 部位毎（左右側壁、天井部）の検出率

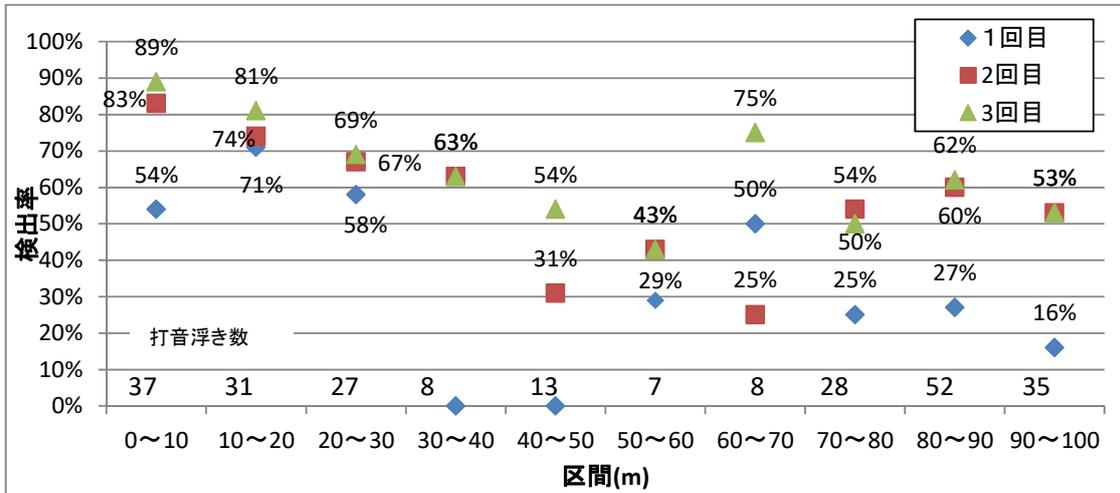


図6-5-2 トンネル縦断方向の区間10m毎の検出率

6.6 評価

6.6.1 計測に適する時期

計測範囲において、実務における計測可能な時間帯（線閉時間帯1:00～4:00）で温度差0.35℃以上の放熱環境となる時期（計測可能日）は、日数の割合が84%～90%である11月～1月が適していた。

また、表6-6-1に、この期間における計測可能日と調査地域の最高気温との関係を示す。ここで、最高気温のデータはアメダスのデータを用いた。今回の計測範囲では11月～1月の期間で最高気温が10℃以下の日は計測可能日が96%となり、さらに割合が高くなることが分かった。

また、赤外線熱計測による現地調査に要した日数はそれぞれ1日であり、打音検査に要した7日と比較すると大幅な工期短縮となった。

表6-6-1 計測可能日と調査地域の最高気温の関係

最高気温	全体	20℃以下	15℃以下	10℃以下
全体日数	92	86	62	25
その内の計測可能日数	82	75	54	24
割合	89%	87%	87%	96%

6.6.2 打音検査との比較における評価

(1)温度環境に対する評価

1回目の計測と2回目および3回目の計測では、検出率に大きな違いがあった。これは坑内大気温度とコンクリート表面の温度差が要因であると考えられ、計測可能日の仮定の正当性を改めて確認できた。

(2)判定ランク毎に対する評価

以下に判定ランク毎の評価を行うが1回目の計測は温度環境が計測可能日とはいえなかったため評価の対象としないこととする。

打音判定Aおよび打音判定Bの浮きについては、漏水の有無に関係なく95%以上の確率で検出できており、これらの問題のある浮きについては検出可能であると判断できる。これらの浮きは、はつりによる浮き厚さ計測で明らかになったように鉄筋の腐食が認められている。

コンクリート表面から比較的浅い20mm程度の深さで鋼材の腐食膨張により剥離が生じさらに剥離層の密着度が下がり空隙が大きくなり、変温部が生じていると考えられる。

打音判定Cの浮きについては、全体で61%~64%、漏水の有る場合は更に高く71%~73%の検出率となり、概ね検出できているといえる。

漏水が有る場合、鉄筋腐食が助長されている可能性が高く、剥離層の密着度が比較的下がっていることや漏水の影響により変温部が生じやすくなっていると考えられる。これらの浮きは、近い将来、打音判定Bに移行することも懸念される。

打音判定Cの漏水の無い浮きの検出率は28%~34%と低かった。

(3)調査部位に対する評価

トンネル内の縦断方向による検出率は、起点側の0~10mの範囲が80%以上で最も高く、終点側に向かい低くなっている。これは図-6-2-3に示したとおり、駅付近では、坑内大気温度とコンクリート表面の温度差が大きいのが、駅から離れるにつれて温度差が減少していることと相関性があると考えられる。駅部は地上からの大気の流入が大きいので温度変化が大きくなっており、トンネルの内部に進むにつれて大気の移動が少なく温度変化も小さくなっていると考えられる。

横断方向の検出率は左右側壁より天端付近の方が低くなっている。これは、天井付近の坑内大気温度とコンクリート表面の温度差が、側壁部分の2.0℃と比較して、0.7℃程度低くなっていることが原因と考えられる。また、天井付近は架線や付帯構造物等により死角が生じ、検出できていない箇所があることも考えられる。

(4)赤外線熱計測では検出できなかった打音検査の浮き

赤外線熱計測による浮きは損傷の程度が高いほど、漏水があるほど、検出率も高くなる傾

向にあった。ここで、赤外線熱計測では検出できなかった打音調査の浮きを未検出とすると、今回、未検出箇所は打音判定Cで漏水が無い場合（検出率28%～34%）や、架線や付帯構造物の陰になる箇所によく見られた。未検出の原因として前者は、剥離部分の密着度が高く変温部が生じにくいこと、後者は変温部の表示範囲が小さく周囲と比較することができないためといったことが考えられる。赤外線熱計測では検出できなかった箇所の事例を写真6-6-1に示す。この図は、赤外線熱計測により検出した浮きを赤枠で囲んだ範囲と、打音検査により検出した判定ランク毎の浮き範囲を重ね合わせたものである。主に打音判定Cの箇所で未検出箇所があった。

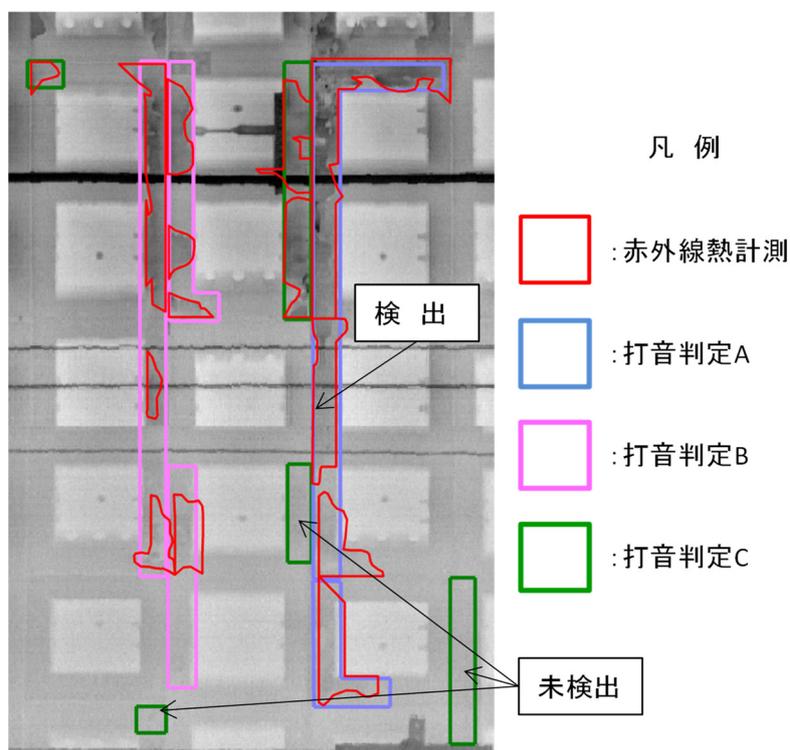
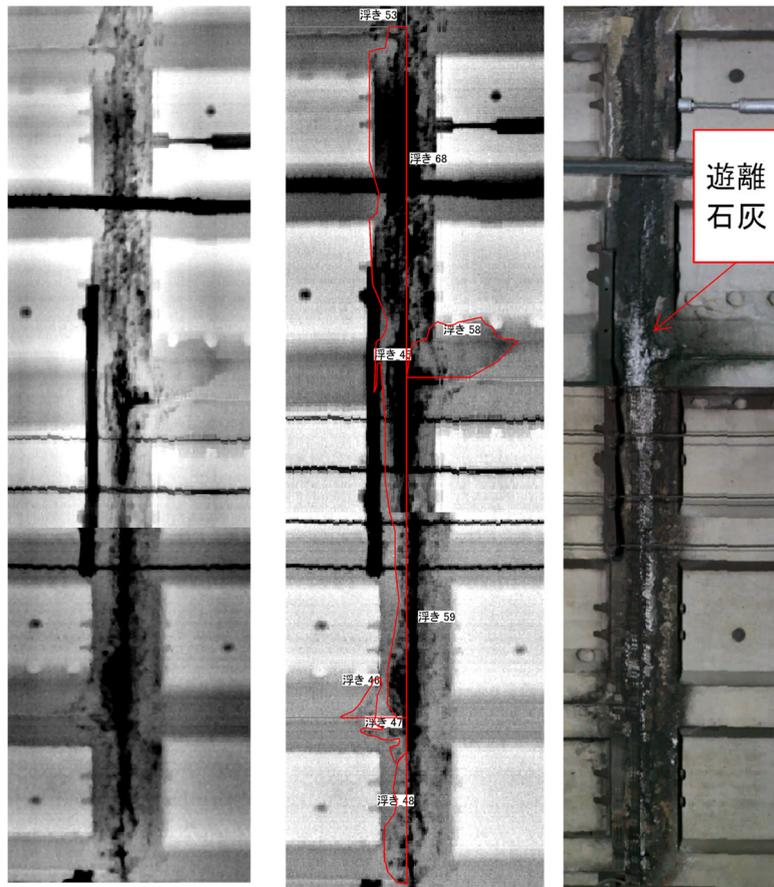


写真6-6-1 赤外線熱計測では検出されなかった箇所の事例

(5)赤外線熱計測による過検出

打音調査では検出されなかった赤外線熱計測の浮き（過検出）は、遊離石灰や漏水跡等のコンクリート表面に変状が見られる箇所によく見られた。また、色の濃い汚れが確認できた箇所や、セグメントの隅角部、セグメントの接合部分等で位置によってノイズ除去を行わなかった箇所にもみられた。過検出の事例を写真6-6-2に示す。撮影した熱画像から赤枠で囲った範囲を浮きと判定したが、打音調査では浮きが検出されなかった事例である。この範囲は遊離石灰が厚く積層となっている箇所でノイズ判定条件の③に近い状況であったが、変温部の位置が析出物の範囲と一致しない箇所があったため浮きと判定した。



熱画像

浮きの検出

可視画像

写真6-6-2 過検出の事例

6.7 シールドトンネルにおけるまとめ

赤外線熱計測と浮きのランクの概念を導入した打音検査の比較の結果、計測可能日（環境温度 0.35°C 以上の放熱環境）であった2回目および3回目の計測では、打音判定AおよびBの浮きは検出できた。打音判定Cの浮きのうち、将来はく落の可能性のある漏水を伴う浮きは概ね検出できた。

このことより、シールドトンネルにおける赤外線法適用可能性については有効であると考えられる。しかし、下記の事項について引き続き検討をする必要がある。

(1) トンネル坑内の温度環境

今回の調査では、トンネル内大気温度とコンクリート表面温度の差が 0.35°C 以上になると赤外線法が適用できること、そのような環境になる時期が大凡11月から翌年1月であることが分かった。

計測可能日に確実に計測を行うために、温度計測方法や外気温等のデータとの相関性について検討する。具体的には、坑内に固定式小型温度計を設置し携帯電話などの電波を利用して常時観測し、同時にアメダスデータも取得し相関性を調べる。昼間の温度計測等から夜

間の赤外線熱計測の可否を判定するルール作りを行う。

(2)特別全般検査との比較

これまでは、限定された地点において、最初に打音検査を実施し、その結果得られた浮きを赤外線法で検出し、その検出率について検討してきた。

実用化に際しては、特別全般検査が終了した路線において赤外線法を用いた計測を実施し、特別全般検査の結果と赤外線法による計測結果とを比較し、赤外線法の有効性を確認する必要がある。

(3)過検出の低減方法

過検出が多い場合、実務においては現場（トンネル内）での、浮きの確認が非効率になることが考えられる。赤外線法による過検出の低減方法を構築する必要がある。

(4)実務への適用方法

これまでの研究において、赤外線法では100%の浮きを検出できないことが分かっている。その事実の中で、どの様に実務に組み込み、維持管理において安全性と効率性を担保していくかを考える必要がある。

上記、(1)、(2)、(3)については、第7章で、(4)については第8章で述べることとする。

第7章 浮きはく離箇所検出手法実用化の検討

7.1 検討概要

赤外線法の地下鉄トンネル維持管理業務への実用化に向けて、まずは赤外線法による熱画像を撮影する日程の決定方法の効率化を検討した。線閉時間の地下鉄トンネル内では、トンネル保守の他、線路や電気設備等の保守作業が日々行われている。そのため、撮影日程を予め決定し、事前に作業登録をする事が必要である。これまで、赤外線法での計測に適した環境は11月～2月としてきたが、気温は毎年同じように変化するとは限らないことから、特に初期の10・11月頃、および終期の2月頃においては、更に詳細に赤外線法の計測日程を決定する必要があると考えられる。

このために、トンネル内複数箇所に温度計を設置し、常時測定して、5章、6章で確認した適切な環境温度条件をモニタリングする方法が考えられるが、常時環境温度を計測し続けることは非効率である。簡易にトンネル坑内の環境温度を予測するために、アメダス等により公表された地上の大気温（以下、外気温）とトンネル坑内温度環境の関係を調査し、赤外線法の適用可能日を外気温の閾値を設けることで決定出来ないかを検討した。

次に、赤外線法が特別全般検査等の実務上の検査と比較して、十分な精度を有しているかを検証した。前述の通り、浮きの検知には目視による通常全般検査より、近接目視および打音検査を行う特別全般検査が有効である。しかしその一方、特別全般検査は、地下鉄が営業していない夜間の、送電が停止されているごく限られた時間に行わなければならない。このため、打音を行う箇所は、トンネル覆工全面積を細かく打音するのではなく、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のが現状であり、検査員の経験や能力の違いで見落としや打音検査もれ等、結果にバラツキが生じることがある。

特別全般検査で検出されていない浮きを、赤外線法での検出が可能であれば、その有効性が実証され、地下鉄列車の更なる安全運行に寄与できると考えられる。このために、直近で特別全般検査が終了した路線のある駅から隣の駅間において、全面打音検査（以下、全面打音）を実施し、その区間内の全ての浮きを詳細に把握し、この結果と特別全般検査で把握している浮きの箇所、および赤外線法で検出された浮きの箇所とを照合した。

さらに、赤外線法ではコンクリート表面の様々な条件（遊離石灰、漏水等）から、実際には浮いていない過検出箇所も温度変化として現れる。これらの過検出箇所について、その特性を分析し、過検出箇所の抽出による低減方法を検討した。

7.2 トンネル坑内の環境温度の予測

7.2.1 環境温度測定方法

測定対象区間延長に沿った温度計の設置箇所は、図7-2-1に示されている。それぞれの設置箇所に、トンネル坑内温度計を設置した。また1箇所毎にトンネル坑内温度および湿度を測定する温度計1個、健全部のコンクリート表面温度を測定する壁面温度計を2個設置した。

壁面温度計を2個設置した理由は、温度計の位置による壁面温度のバラツキが生じている可能性を考慮したためである。

温度計測は20分間隔で行い、2015年8月から翌年2月まで実施し、トンネル坑内温度環境と地上の外気温とを比較した結果を用いて、環境温度が0.35℃以上となる日数（計測可能日）を把握した。また、トンネル坑内温度と健全部コンクリート表面温度の差と外気温の関係を把握し、外気温に基づく計測日決定の可能性を検討することとした。



図 7-2-1 トンネル内環境測定区間，温度計設置箇所，および地質柱状図

7.2.2 環境温度測定結果

1ヶ月毎，地点毎に，夜間作業が可能な線閉時間（1:00～4:00）の間に，0.35℃以上の温度差が生じた日数のうち，トンネル坑内温度がコンクリート表面温度より低かった日数（放熱環境）の月毎の割合を図7-2-2に示す。このことから，11月から1月までは，ほぼ全日数が放熱環境で温度差0.35℃以上となることから，赤外線法による計測に適した環境であることが分かった。

また，逆にトンネル坑内温度がコンクリート表面温度より高かった吸熱環境条件は，換気口に最も近い5k341mの地点のみで生じ，日数の月毎の割合は8月が23%，9月が10%，10月が3%，11月が7%，12月が10%であった。

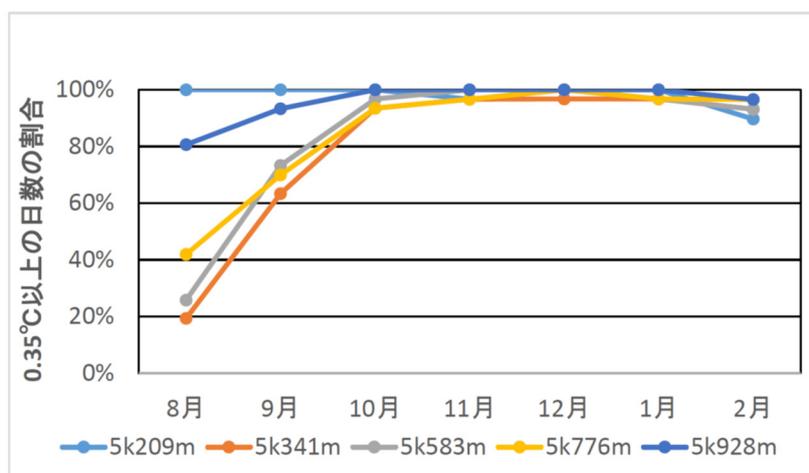


図7-2-2 放熱環境かつ環境温度0.35℃以上の割合

7.2.3 外気温と環境温度

更に詳細に赤外線法の撮影日程を決定するために、外気温から赤外線法による計測が実施できるかの判断が可能であるかを検討した。通風口に比較的近く、外気温の影響を受けやすい5k341m地点における一日の「外気温の平均」と、同日の線閉時間における環境温度の散布図を図7-2-3に示す。外気温が下がるに従って、放熱環境で環境温度の絶対値が大きくなる傾向が明らかである。

また、5箇所のうち駅部に隣接した5k209m地点については、外気温に関わらず環境温度が一定であった。その箇所の散布図を図7-2-4に示す。当該箇所は、ほぼ毎日放熱環境で環境温度の絶対値が0.35℃以上となっているため、この箇所に関しては常に計測に適していると考えられる。

上述の関係より、外気温を用いて計測が可能であるかを推測・判断をするため、各地点においてそれぞれ外気温を5℃毎に分割し、その幅の中に含まれる計測日数と、環境温度が0.35℃以上になる日数の比較を行った。その集計結果を図7-2-5に示す。この集計結果から、当該区間においては、一日の外気温の平均が0℃から15℃の場合に、どの区間も90%以上の確率で、放熱環境で環境温度の絶対値が0.35℃以上となることが分かる。このことから、外気温の平均が15℃を下回れば、赤外線法を適用できると考えられる。

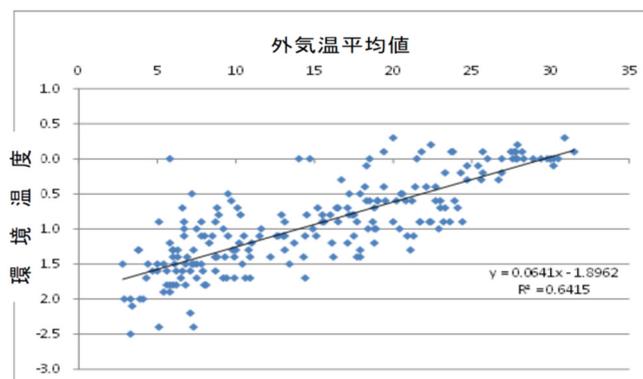


図7-2-3 外気温と環境温度との関係 (5k341km)

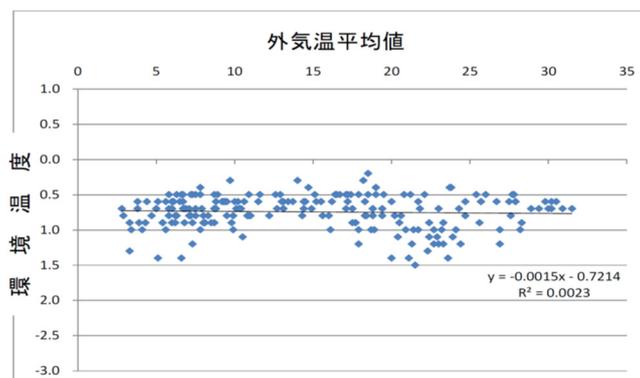


図7-2-4 外気温と環境温度との関係 (5k209km)

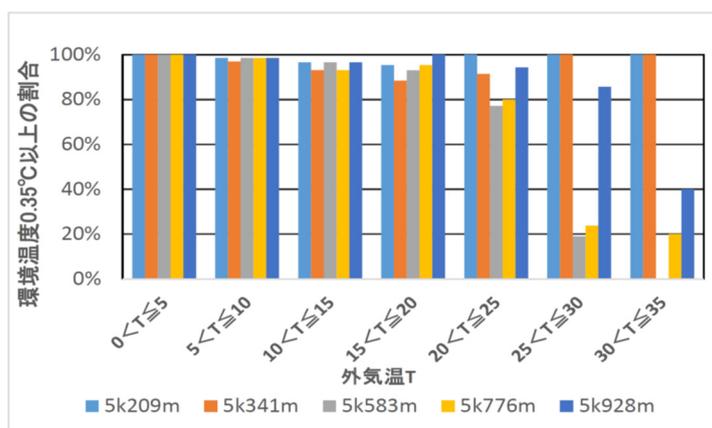


図7-2-5 放熱環境かつ環境温度0.35°C以上の割合

7.3 全面打音および特別全般検査との比較

7.3.1 赤外線法による熱画像撮影

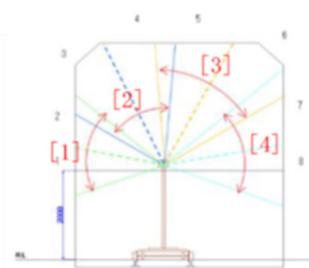
健全部のコンクリート表面温度がトンネル坑内気温より0.35°C以上高くなっている放熱環境という条件を満たす日数が多い10月および11月に撮影を実施した。計測は、簡易トロの専用治具に固定した赤外線カメラおよびデジタルカメラを用いて、対象範囲全面の熱画像および可視画像を撮影し、その画像を接合・解析した。また、現地では対象範囲を横断面方向に4分割し、設定した画角毎にカメラを固定し、作業員が簡易トロを押しながら連続撮影を行った。計測範囲を図7-3-1に、撮影装置と撮影範囲[1]から[4]の分割方法を図7-3-2に示す。なお計測は、はく落の際に安全性を脅かす可能性のある、側壁2mの地点から上部（上床を含む）部分とした。また、限られたトンネル空間内で軌道中心から撮影するため、赤外線カメラからコンクリート表面迄の距離の違いによる影響は無いと考える。



図7-3-1 トンネル構造と計測範囲



図7-3-2 撮影装置と分割方法



先に外気温と環境温度の散布図を示した（図7-2-3、図7-2-4）2つの地点において、側壁に取付けた温度計により計測された、トンネル坑内温度、健全部のコンクリート表面温度、トンネル内湿度の時間毎の変化を示した温度変化図を図7-3-3と図7-3-4に示す。図7-3-3は換気口に近いことから、夜間のトンネル坑内温度変化が大きく、図7-3-4は換気口からは遠いが、駅部に近いことから営業時間中のトンネル坑内温度に変化が見られると考えられる。両地

点とも、線閉時間帯（1:00～4:00）において放熱環境であり、かつ環境温度が0.35℃以上であることから、計測に適している条件であることがわかる。

表7-3-1には上記の赤外線法による計測において検出された変状（変温部）の総数と総面積を示す。総数で355箇所、総面積49.53 m²であった。

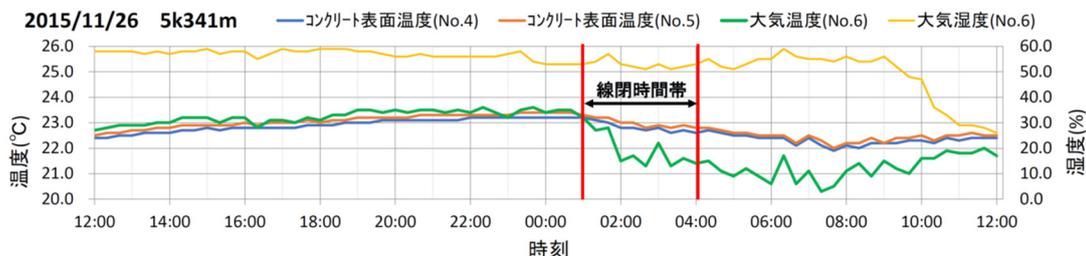


図 7-3-3 赤外線法による計測時の温度環境

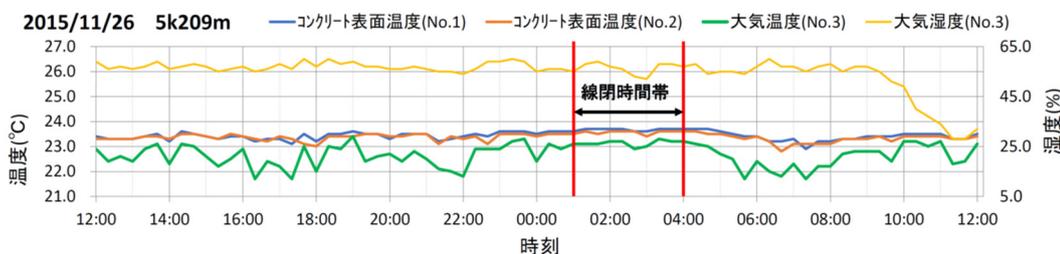


図 7-3-4 赤外線法による計測時の温度環境

表7-3-1 変状部総数と面積

変状部総数	355箇所
変状部総面積	49.53 m ²

7.3.2 全面打音検査

(1)全面打音の方法

調査範囲は、図7-2-1に示す鉄筋コンクリート構造開削トンネルの中で、比較的変状が多く観測されている延長500mの区間とした。ここで調査対象とした路線は、過去に特別全般検査を実施していることから、次の手順で全面打音結果および特別全般検査結果と赤外線法による浮き検出箇所を比較し、実用化に向けた検討を行った。

- ① 調査範囲500m（5k210m～5k710m）の区間において、50cm×50cm毎に打音を行い確認された浮きにランク付けをして記録した（写真7-3-1）。打音は、赤外線法による計測の範囲について行った。ランクは濁音の程度および列車の走行安全性を鑑みて、鉄道構造物等維持管理標準を基に表7-3-2のとおり分類した。なお、表6-4-1に示したA判定は、表7-3-2のAA, A1, A2に対応している。
- ② 「全面打音で把握された浮き」、「特別全般検査で既に把握されている浮き」、および「赤外線法で検出された浮き」を、それぞれを相互に比較し、全面打音で把握した浮きに対

する，特別全般検査，赤外線法の検出率を求めた。

なお，全面打音は2016年7月，赤外線法による画像撮影は2015年11月，当該区間の特別全般検査は2014年度に実施したものであることから，特別全般検査後に新たに健全部が大きな変状（浮き）を生じた可能性は比較的低いと考えられる。



写真7-3-1 全面打音検査状況

表7-3-2 打音判定ランク

判定	状態
AA	近々にはく落の恐れがあるもの
A1	密着度合が少ないもの
A2	密着度合はあるが，列車運行・施設物等に支障する可能性が高いもの
B	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
C	はく離・浮きがある，はく落跡

(2)全面打音結果

同一区間の全面打音により，浮きは合計で208箇所確認された。判定ランク毎の変状数をトンネル内の各部位について表7-3-3に示す。なお，この表で補修跡とは劣化箇所を補修したものが再劣化により再度変状と判定されたものである。また，表7-3-2における，AA，A1に相当する浮きは確認されなかった。

表7-3-3 全面打音結果

判定	左側壁	上床板	右側壁（中柱）	合計
A2	8	4	0	12
B	27	28	5	60
C	9	2	1	12
補修跡A2	3	10	0	13
補修跡B	35	18	36	89
補修跡C	6	3	13	22
計	88	65	55	208

7.3.3 全面打音，特別全般検査の比較

全面打音により確認された浮きと，特別全般検査で確認された浮きの総数を比較したものを表7-3-4に示す．なおC判定は非常に軽微で実務上ほとんど問題にならず，進行も見られることがほとんど無い．このため，特別全般検査はB判定以上の結果のみを記録していたことから，ここではC判定を除外して比較している．

特別全般検査は，全面打音結果と比較すると全体では20%の変状しか確認できていないことがわかる．これは，先にも述べたとおり，特別全般検査は過去の検査結果と検査者の経験により必要と思われる箇所を打音しており，全面打音に比べて見逃した浮きが存在していることによると考えられる．

また，表中には参考として，通常全般検査において確認された浮きを記載している．通常全般検査で確認されている浮き4箇所に対して特別全般検査では34箇所が確認されていることから，特別全般検査の検査品質は通常全般検査と比較して十分高く，特別全般検査の目的を達成できているものといえる．

表7-3-4 全面打音と特別全般検査比較

判定	浮き・はく離数量		検出率	参考
	全面打音	特別全般検査		通常全般検査
A2	12	4	33%	1
B	60	10	17%	1
補修跡A2	13	7	54%	1
補修跡B	89	13	15%	1
計	174	34	20%	4

次に、全面打音で確認された浮きと、赤外線法で確認された浮きの比較を表7-3-5に示す。この表において、「赤外線法」の検出数とは、赤外線法による変温部が全面打音による浮きの範囲の中に確認されたものである。検出数は全部で116箇所あったが、このうち16箇所はC判定の適合箇所であったため、特別全般検査と同じくB判定以上で比較をすると、検出数は100箇所となった。また、「赤外線法（近傍含む）」とは、赤外線法による変温部が全面打音による浮きの範囲から50cm以内にあるものも一致とした場合の検出数である。赤外線法では過検出であるが、現場で実際の打音検査を行う場合は、変状と思われる箇所を50cm×50cm程度の範囲で打音を行うため、この範囲に入っているものを参考までに記載した。

赤外線法における適合検出率は全体で57%（近傍を含むと76%）であり、表7-3-4の全面打音と特別全般検査との比較よりも高い検出率であった。特に、A2判定の浮きについては83%（近傍含む、100%）、補修跡A2では92%（近傍含む、100%）であり、特別全般検査におけるA2の検出率33%、補修跡A2の検出率54%と比較しても高かった。また、B判定についても、特別全般検査の検出率が17%であったのに対し、赤外線法では60%（近傍含む、77%）とA2判定同様に高かった。このことより赤外線法の方が、特別全般検査に比較して高い検出率で検出できることが分かった。

表7-3-5 全面打音と赤外線法比較

判定	全面打音	赤外線法		赤外線法 (近傍含む) 参考	
		検出数	検出率	検出数	検出率
A2	12	10	83%	12	100%
B	60	36	60%	46	77%
補修跡A2	13	12	92%	13	100%
補修跡B	89	42	47%	61	69%
計	174	100	57%	132	76%

特別全般検査で確認された浮きに対して、赤外線法ではどの程度検出できているかを比較した結果を表7-3-6および図7-3-5に示す。全体で79%の検出率であったが、A2については100%であった。また、補修跡B判定の検出率が62%と低かった。これは、補修跡は材質が違う等の理由により、赤外線法では検出しにくいためと考えられる。

表7-3-6 特別全般検査と赤外線法比較

判定	特別 全般検査	赤外線法	検出率
A2	4	4	100%
B	10	8	80%
A2補修跡	7	7	100%
B補修跡	13	8	62%
合計	34	27	79%

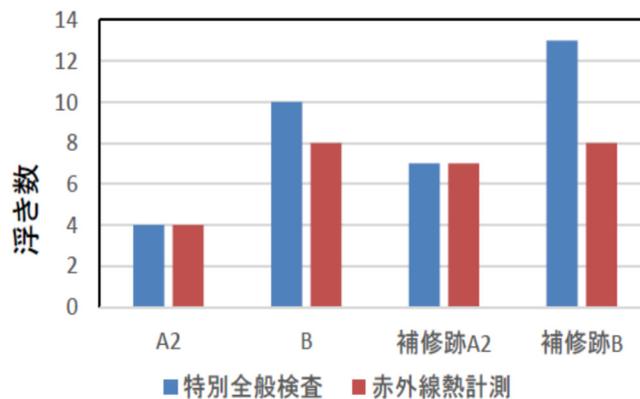


図7-3-5 特別全般検査と赤外線法比較

7.3.4 全面打音および特別全般検査との比較まとめ

全面打音，特別全般検査，赤外線法検査結果との比較の結果をベン図にまとめたものが図7-3-6である。

- イ) 特別全般検査は通常全般検査に比較して有効であるが，全面打音に対する検出率は全体で20%程度であり，見逃しが生じている。
- ロ) 赤外線法は，全面打音に対する検出率は全体で57%，A2判定については83%，A2判定補修跡は92%であることから，特別全般検査に比較して高い検出率である。

赤外線法においては，特別全般検査で確認された浮きが 34 箇所であるのに対して，100箇所を検出し，なおかつ赤外線法のみで 73 箇所の浮きを検出していることから，赤外線法の有効性が確認されたと考えられる

特別全般検査は，浮きだけを把握するものではなく，その他さまざまな変状を記録・管理するものである。また，さまざまな変状の中で，浮きだけが目視のみでは分かりにくく，打音する範囲も検査者の技術力や経験に依存する。

地下鉄トンネルにおける検査実績では，通常全般検査は線閉時間に平均で約700m~800m，特別全般検査は平均で約300m，全面打音は平均で約50mの区間を検査可能である。

特別全般検査を、全面打音に置き換えて実施することも考えられるが、検査速度が約6分の1になることから、検査期間を延長するか、検査人員を約6倍投入するかの判断が求められる。前者は、多路線（たとえば東京地下鉄(株)では、9路線）を運営している地下鉄事業者においては、20年以内にすべての路線の検査を実施することが困難となる。また、後者においては、今後の少子化・高齢化による将来の検査人員の確保が困難になることを想定すると、難しいと考えられる。このことから、現在の特別全般検査の速度を保ちつつ、検査の見逃しを極力少なくする手法が重要と考えれば、特別全般検査と赤外線法の併用が有効であると考えられる。

なお、赤外線法は高速道路トンネルにおいて、時速80km/hでも浮きを検出した例がある^{7,8)}ことから、夜間地下鉄内において保守用車の制限速度（30km/h）で走行すれば、東京地下鉄(株)の1路線を最短で2日程度の線閉時間内に撮影することが可能と考えられる。

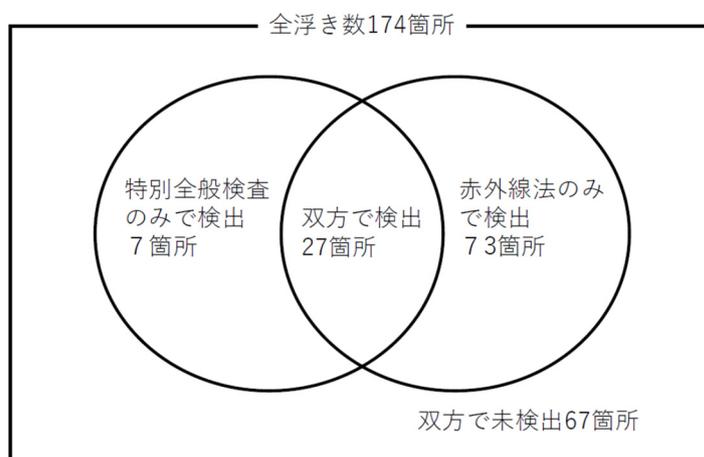


図 7-3-6 全面打音・特別全般検査・赤外線法まとめ

7.4 過検出の低減方法について

7.4.1 過検出について

赤外線法を実務に適用する場合、赤外線法で検出された浮き部をもとに打音検査で確認することが想定される。したがって、現場での負担を考慮すれば、過検出は極力少ない方が望ましい。

7.3.1で実施した調査結果をもとに赤外線法において確認された変状部に対して、全面打音結果と適合していた箇所数と、適合していなかった箇所数を比較した結果を表7-4-1に示す。

赤外線法で検出された変温部のうち、実際に浮いていた箇所は33%であり67%が過検出であった。

一方、赤外線法において浮きと検出した、それぞれの箇所の面積を求め、適合箇所および

過検出箇所のそれぞれの面積の集計を行った結果を検出面積とした。適合は60%で過検出が40%となった。

表7-4-1 過検出箇所の状況

項目		適合	過検出			合計
			小計	うち 近傍適合	うち近傍 適合以外	
箇所	数量	116	239	75	164	355
	割合	33%	67%	21%	46%	100%
面積	数量(m ²)	29.77	19.76	8.61	11.15	49.53
	割合	60%	40%	17%	23%	100%

表7-4-2に示すとおり、適合箇所は1箇所あたりの平均面積は0.26 m²、過検出は1箇所あたりの平均面積は0.083 m²である。また、適合部と過検出部の面積の分布について箱ひげ図を図7-4-1に示す。このことから面積の小さな変温部が過検出となる傾向にあることが分かる。

表7-4-2 過検出1箇所あたりの面積

	適合	過検出 (近傍適合含む)	計
個所数	116	239	355
割合	33%	67%	100%
面積(m ²)	29.77	19.76	49.53
割合	60%	40%	100%
面積/個所数 (m ² /箇所)	0.26	0.083	0.140

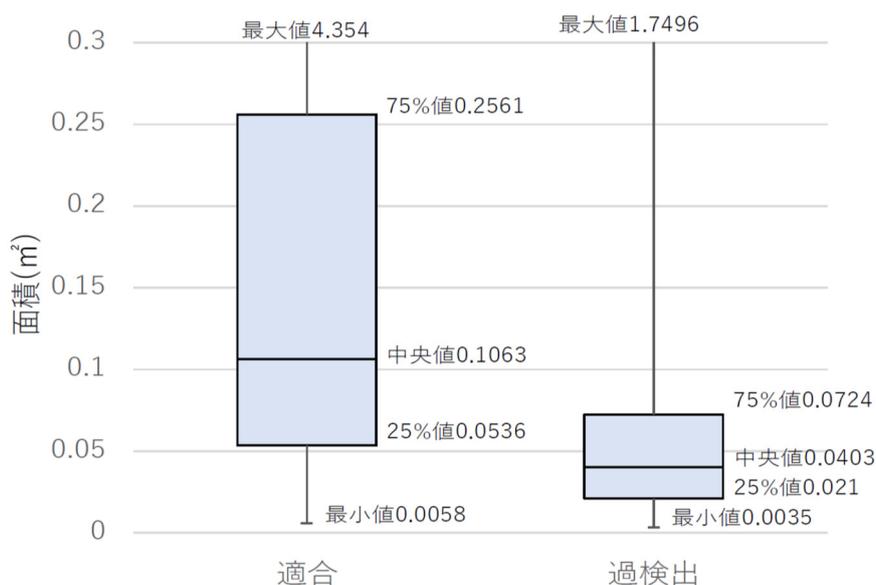


図7-4-1 面積分布図

7.4.2 過検出低減方法について

地下鉄トンネルにおいては、健全部と浮き・はく離部の温度差である浮き温度が比較的小さいこと、6章で述べたように析出物等様々な過検出要因が存在していること、析出物の箇所においても実際に浮きが存在する場合があること等から、画像解析等の自動処理による過検出の低減は困難と考えられる。このため可視画像での判断に加えて、別途判断基準を考慮することにした。

前述のように過検出部分は面積が小さい傾向にあることが分かっている。そこで、簡易な方法としては、変状部の面積で閾値を定めて、一定の面積以下の変状については、全てノイズとして棄却する方法が、小さな変状については、万が一見逃しが生じたとしても、大事故につながる可能性は相対的に低いと考えれば、実務上では有効と言える。

図7-4-2は、赤外線法により検出された面積が 0.1 m^2 以下の浮き部について、過検出および適合箇所について、面積範囲毎の過検出率（過検出頻度/面積範囲全数 $\times 100(\%)$ ）を棒グラフにまとめたものである。面積範囲は、 0.01 m^2 以下、 0.01 m^2 を超えて 0.02 m^2 以下から順次 0.09 m^2 を超えて 0.10 m^2 以下としている。また、表7-4-3は、それぞれの面積範囲毎の過検出および適合の箇所数である。

若干のバラツキはあるが、概ね面積が小さい程、過検出が大きい傾向にあることが分かる。図7-4-1からも分かる様に、特に 0.05 m^2 以下の範囲では、過検出が非常に多いことが分かる。

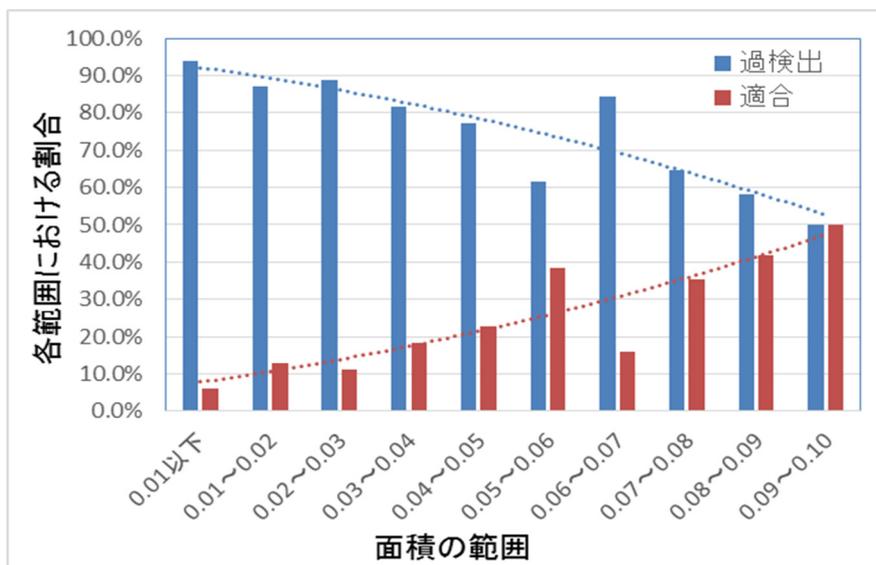


図7-4-2 面積範囲毎の過検出率

表7-4-3 面積範囲毎の過検出・適合の箇所数

面積範囲 (m^2)	0~ 0.01	0.01~ 0.02	0.02~ 0.03	0.03~ 0.04	0.04~ 0.05	0.05~ 0.06	0.06~ 0.07	0.07~ 0.08	0.08~ 0.09	0.09~ 0.10
過検出数	15	41	32	31	17	24	16	11	7	3
適合数	1	6	4	7	5	15	3	6	5	3

表7-4-4は、たとえば面積 0.01 m^2 ($10\text{cm}\times 10\text{cm}$) 以下、 0.02 m^2 以下、および 0.03 m^2 以下の浮きについてノイズと定義し、棄却した場合の状況を示している。 0.01 m^2 以下の浮きを全てノイズとした場合、過検出数が全数で239箇所であったものが224箇所となり、15箇所の過検出を減らすことが出来る。同様に 0.02 m^2 以下の浮きをノイズとした場合は56箇所、 0.03 m^2 以下の場合は88箇所、割合では約37%の過検出を減らすことが出来ることが分かる。なお、過検出低減に伴い、同時に減らされた 0.02 m^2 以下の適合7箇所、 0.03 m^2 以下の適合11箇所の内訳は、表7-4-5の通りであり、殆どがB判定箇所であり、A2判定箇所は補修跡であったことから実務上は許容できる範囲と考えられる。

表7-4-4 面積による過検出の低減状況

対象面積	浮き数量	適合	過検出
全数	355	116	239
0.01 m^2 以下	339	115	224
0.02 m^2 以下	292	109	183
0.03 m^2 以下	256	105	151

表7-4-5 過検出と共に低減された適合箇所の内訳

判定区分	0.02 m^2 以下箇所数	0.03 m^2 以下箇所数
B	3	6
A2補修	1	2
B補修	3	3

7.5 浮きはく離箇所検出手法実用化の検討のまとめ

(1) トンネル坑内の環境温度の予測

外気温の平均が 15°C を下回ればどの区間も90%以上の確率で、放熱環境で環境温度の絶対値が 0.35°C 以上となる。また、季節的には10月以降にこのような環境がみられ、ほぼ2月までその傾向が続く。

このことから、トンネル内に常時温度計を設置することなく、アメダス等からの情報により、外気平均気温により、赤外線法による計測日を設定することが可能である。

(2) 全面打音検査、特別全般検査との比較

- ① 全面打音検査は、全てのコンクリート表面をくまなく打音するものであり、近接目視をしながら検査者が判断した個所を打音する、特別全般検査に比べて約6倍の労力を必要とするため、地下鉄トンネルの維持管理実務においては、実施が困難である。

- ② 特別全般検査では、全面打音検査と比較して見逃している箇所が多く、A2・B判定を合わせて20%程度の検出率である。
- ③ 赤外線法では、全面打音検査と比較してA2・B判定を合わせて57%、A2判定のみでは80%以上の検出率であり、特別全般検査と比較して検出率が高い。
- ④ 但し、特別全般検査で検出した浮きについて、赤外線法の検出率は全体で79%であり、赤外線法が特別全般検査の浮きを全て検出出来る訳ではない。

以上のことから、特別全般検査と赤外線法を組み合わせると、見逃しを少なくしていくことが実務上では有効であると考えられる。

(3)過検出の低減について

赤外線法では、過検出が多いという特徴があるが、赤外線法により検出される変温部の面積が小さいほど、過検出である傾向があることから、例えば面積0.03㎡以下の変温部はノイズとして棄却することにより、239箇所あった過検出を151箇所に減らすことが出来る（低減率36.8%）。但し、この場合適合箇所としてA2判定（補修跡）2箇所、B判定（補修跡含む）9箇所が、同時にノイズとして棄却されてしまう。これについては、B判定は直ちにはく落につながる健全度ではないこと、また、補修跡は3.3でも述べた通り、過去に実施した断面修復箇所は、再劣化を生じ浮きやはく落に繋がることがあるので、検査時には特に留意が必要であることから、打音の対象とすることで許容できると考えられる。

また、図3-5-3のベイジアンネットワークにより算出された、浮きの観測確率の高い箇所は、ノイズとして棄却しない等の方法も考えられる。

(4)実用化に向けての方針

既存の検査データ（特別全般検査が終了している区間は、そのデータ、終了していない区間は通常全般検査のデータ）と、ノイズ処理を実施した赤外線法のデータを用いて、打音検査箇所を設定し、浮き部のはく落防止を目的とした、打音点検を定期的を実施する。

現場での打音位置確認については、通常全般検査および特別全般検査時に使用している、iPadのアプリケーションソフトに、打音検査機能を追加し、赤外線法による検出された浮き候補箇所のキロ程、部位、画像を予め入力しておく。現場でiPadにより表示されている打音検査箇所を打音したのちに、その結果（浮いている場合には、そのランク）を入力することで、現場での打音検査業務の効率化が図れる。

また、今後の研究課題として、ベイジアンネットワークによる理論的変状の観測確率や、画像認識技術を利用したはく落要注意箇所と組み合わせることにより、より適切な打音箇所の選定を行っていく。

第8章 赤外線法の維持管理実務への導入

8.1 赤外線法導入のポイント

第7章で述べたように、詳細な全面打音を実施し、対象区間すべての「浮き」を抽出した。その上で、特別全般検査と赤外線法による検出結果の比較をもとに、赤外線法の有効性が確認できた。

赤外線法は特別全般検査よりも多くの浮きを検出できるが、打音検査でしか検出できない浮きもあり、赤外線法を特別全般検査等の打音検査と組み合わせることが有効であると考えられる。

また、赤外線法においては、実際には浮いていない箇所を変温部として検出する過検出が多いという欠点がある。この過検出に対しては、施設管理者の考えにもよるが、浮き面積をたとえば 0.03m^2 を閾値として過検出を低減することも可能であると考えられる。

8.2 点検業務の運用方法

赤外線法は、限られた制約条件のもとに行われる地下鉄トンネルの特別全般検査に比較して、より多くの浮きを検出することが可能であるが、特別全般検査で検出された全ての変状を検出することは難しい。

一方、特別全般検査時に全面打音を実施するには、延べ6倍程度の労力を必要とする。このため、地下鉄営業終了後の送電停止から送電開始までの線閉時間（1:00から4:00頃）の間に、全区間に全面打音を実施することは現実的ではない。

このことから、図8-2-1に示すように赤外線法と特別全般検査等を組み合わせることにより、地下鉄トンネル維持管理におけるコンクリートはく落の可能性を低減させる方法を提案する。

- ① 秋から冬にかけて外気温を観測し、平均温度が 15°C 以下になることを確認し、他種工事等の調整により赤外線法による調査日程を設定する。
- ② 赤外線サーモグラフィを用いて、トンネルコンクリート表面の赤外線熱画像を撮影する。
- ③ 同時にビデオカメラにより可視画像を撮影する。（予め特別全般検査が実施されている場合、写真8-2-1のように浮き部分はチョーキングされている。）
- ④ 赤外線熱画像から、変温部を検出し、浮きの可能性箇所とする。
- ⑤ 変温部の面積から、たとえば 0.03m^2 を閾値と設定した上でノイズ処理を実施し、「浮き候補部分」を抽出する。
- ⑥ 浮き候補部分のうち、既存の検査データ（特別全般検査結果）では、浮きとして検出されていない箇所を抽出し、打音検査を実施する箇所（又はエリア）を設定する。（可視画像において浮き部のチョーキングが確認できる場合、それに赤外線画像を重ね合わせることで、更に容易に抽出が可能となる。）
- ⑦ 上記の箇所について、実際に特別全般検査等で打音検査を実施し、濁音がある箇所を浮

きと判定し、可視画像又は展開図に記録する。

なお、②については、計測範囲全てが理想状態になっていないこともあるので、可能であれば、同一区間を一晩に複数回計測するか、別日に同一区間をもう一度計測することも考慮することが望ましい。

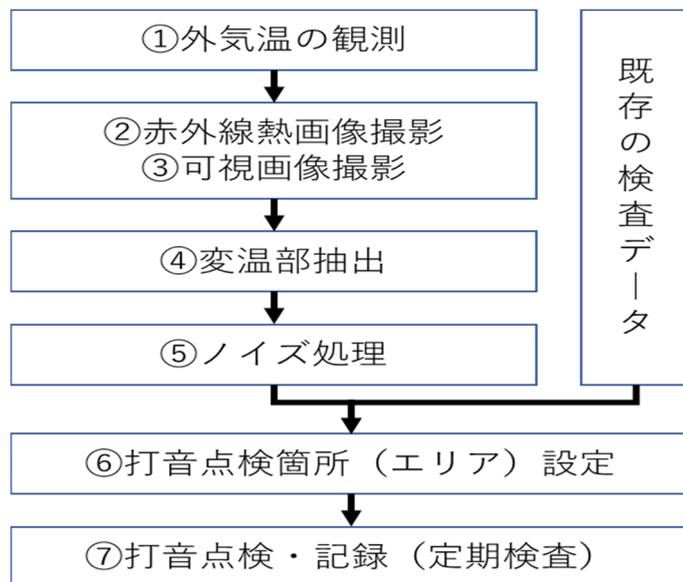


図8-2-1 赤外線法の維持管理実務への導入の流れ



写真8-2-1 浮き箇所チョーキングの状況

3.2.1で述べた通り、東京メトロでは、浮き個所のコンクリートはく落予防として、万が一はく落した場合、安全性を脅かす可能性のある側壁上部と上床部を対象に4年に1度の打音点検を実施している。図8-2-1の流れで設定された打音箇所を初期値として管理していくことは有効であると考えられる。

8.3 維持管理のICT活用における赤外線法の導入

8.3.1 現場における打音点検箇所確認ツール

3.4で述べたとおり、維持委管理におけるICTの活用が進んでおり、この中に赤外線法を組み入れていくことで、速やかな維持管理が可能となる。

例えば、赤外線法で検出された箇所を実際にトンネル内で打音する際に、現場でどの部分を打音するかを速やかに認識する方法として、タブレット端末のアプリケーションソフトの活用が考えられる。既存のアプリケーションソフトに打音点検機能を追加することで、現場でキロ程・部位・打音箇所（打音範囲）を確認・認識することが可能である（図8-3-1）。



図8-3-1 タブレット端末イメージ

8.3.2 検査データ活用との組み合わせ

表7-4-4に示すように、赤外線法で検出された浮きについて、過検出を低減するために、面積を閾値としたノイズ処理法は、実際の維持管理に大きな影響は考えられないものの、僅かながら実際の浮き箇所もノイズとして棄却してしまうという欠点がある。

例えば、3.5.1で述べた、実際に浮きが観測されていない区間において、データ解析上浮きが観測される確率の高い区間においては、ノイズとして棄却しないという組み合わせにより上記欠点を補完できると考える。

また、赤外線法はA判定については、すべての浮きを検出できるわけではない。これを補完するために、画像認識技術を利用したはく落要注意箇所の自動抽出システムと組み合わせることも今後の研究課題として考えられる。

また、赤外線法による浮きの検出率は、トンネル内環境により左右される。シールドトンネル等では、さらに検出率を向上させるために、可能な箇所は強制換気を行う等して、トン

ネル内気温を下げ、コンクリート表面温度との差を大きくしてから、赤外線熱画像撮影を実施することも有効と考えられる。

8.4 維持管理実務におけるはく落予防の流れ

図8-4-1に浮き箇所の抽出から、進行状況の把握までの流れを示す。

- ① 特別全般検査を実施し、浮きの箇所とその他の変状箇所を把握する。
- ② 特別全般検査の結果を基にベイジアンネットワークでの、浮きが観測されていない区間における浮きの観測確率を算出し、赤外線法でノイズとして棄却をしない区間とする。
- ③ 赤外線法により浮きの箇所を検出し、ノイズ処理を実施する。
- ④ 上記①～③で得られた結果より、打音点検箇所（範囲）を定める。

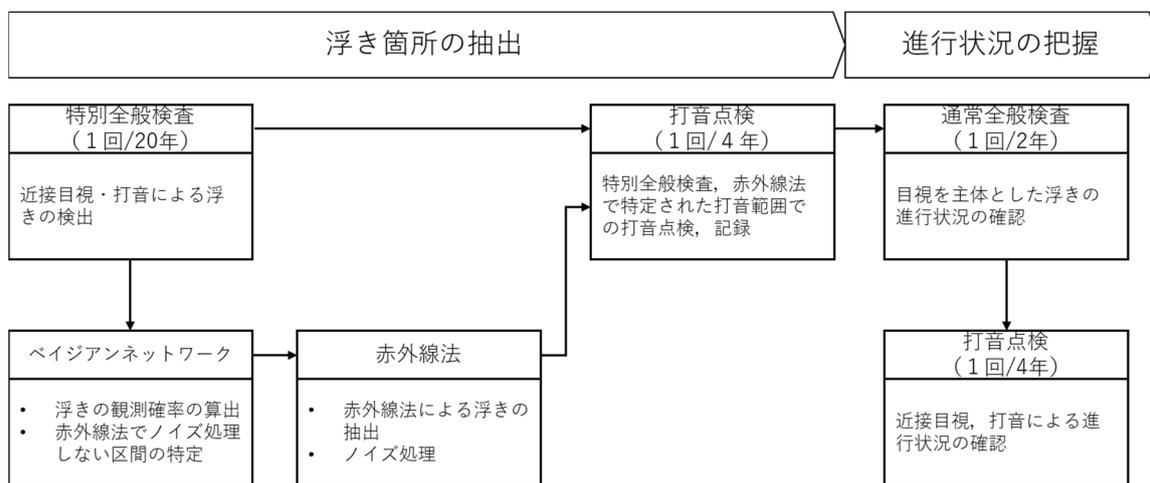


図8-4-1 浮きに関する維持管理の流れ

第9章 結論

9.1 本研究の結論

我が国では、高度経済成長期に多くの鉄道施設を整備してきており、現在では年間230億人以上の輸送を支えている一方で、維持管理における様々な課題が浮き彫りになってきた。中でも特に、鉄道施設からのコンクリート片のはく落事象は、2012年12月の中央自動車道笹子トンネル事故以降、大きな社会問題となっている、また、コンクリートのはく落事象は、直近の定期検査において、その発生の予兆を捉えることができていなかったという問題がある。

地下鉄トンネルの維持管理においては、コンクリート剥落の予兆である、浮きの検出については、コンクリート表面の目視のみでは困難であり、これまで検査員による打音検査が最も有効な方法であった。しかし、線閉時間という限られた時間で検査を実施しなければならないことから、検査員の判断により必要と思われる箇所のみを打音するために、検査員の能力や経験の違いで見落とし等が生じる懸念があった。

無筋コンクリート覆工のトンネルにおいては、機械化の研究が進められているが、地下鉄鉄筋コンクリート覆工トンネルにおいては、これまで有効な機械化手法が存在せず、どの鉄道事業者も打音検査が唯一の浮きを正確に検出する手段であった。

本研究では、赤外線パッシブ法に着目し、地下鉄トンネル内での日中と夜間の気温の変化を利用し、地下鉄トンネル覆工コンクリートの赤外線熱計測と綿密な打音検査結果をもとに、浮きを非破壊・非接触で効率的に検出できる検査方法（以下、赤外線法）について研究を行うとともに、地下鉄トンネルの維持管理に確実に適用できる手法を考案した。次に、本研究において得られた結果および知見をまとめる。

第1章では、我が国における鉄道構造物において、近年多くの鉄道施設が老朽化している現状から維持管理の重要性が増してきていること、また鉄道施設におけるコンクリート片のはく落事象が問題となっていること、さらには将来の生産年齢人口の減少が予測されていることから、維持管理の効率化が課題となっていることを概説した。結びとして、本研究の目的である地下鉄トンネルにおける赤外線法の必要性、および本論文の構成と各章の概要を要約した。

第2章では、過去に生じた鉄道トンネルにおける重大なコンクリートはく落事故の例について述べ、事故例を踏まえて鉄道構造物を対象として議論され基準化された国土交通省の「維持管理標準」の考え方について説明した。また、それに基づいて研究開発が進められている検査の機械化事例、および赤外線法に関する既往の研究について述べ、本研究の位置づけを明らかにした。

第3章では、東京メトロの維持管理の概要について説明した。具体的には、

- ① 通常全般検査、特別全般検査、はく落防止のみを目的とした打音点検について、その内容および検査体制と所要期間について説明し、銀座線トンネルにおける通常全般検査と特別全般検査の結果比較から、浮きの検出においては特別全般検査が有効であることを示した。
- ② コンクリートのはく落に至る過程について、中性化と漏水の関係について説明し、中性化が進行しており、なおかつコンクリートの含水率が高い個所において、鉄筋の腐食が進行しやすく、はく落につながりやすいことを説明した。
- ③ 赤外線法との組み合わせが考えられる、維持管理のICT化とタブレットによる検査アプリケーションの概要、検査データを統計分析することにより、浮きの観測される確率を算出する方法や、画像認識技術を利用し、可視画像からはく落要注意箇所を抽出する試みについて概説した。

第4章では、地下鉄トンネルにおいて赤外線法が適用できることを確認するため、条件を変えた開削トンネルの3地点で実施した予備検討の結果を述べた。この予備検討では、上記の3地点で打音検査により確認された21箇所の浮き部について赤外線法による計測を2013年9月、11月、2014年1月の3回実施し、それぞれの健全部と浮き部の温度差を調査した結果を示した。この結果、以下の知見を得たことから詳細な検討を進めることとした。

- ① 列車の運行がない線閉時間帯には、トンネル坑内の気温(以下、トンネル内気温)が低下し、赤外線法により浮き部を温度差として検出できる
- ② トンネル内気温と健全部の浮き部の温度差(以下、環境温度)が大きい程、健全部と浮き部の温度差が大きく浮き部の検出率が高く、その環境が冬期に顕著に観測される。

第5章では、第4章の観測結果をもとに、赤外線法の実用化に向けて適用可能な条件について詳細に検討した。まず、ある路線の停車場から地上部まで約2kmの開削トンネル区間において、10箇所のトンネル内の気温測定を予備検討とほぼ並行して、2013年10月から2014年2月まで連続して実施した。また、選定した13箇所において予め打音検査で確認された306箇所の浮きを対象として、赤外線法計測を2013年10月、11月と2014年2月の3回にわたって実施した。

第4章の結果を基に、その結果を分析し、以下の2項目の重要な知見を得た。

- ① 赤外線画像から浮きを検出する温度差の閾値を 0.03°C とした場合、トンネル内気温が健全部コンクリート表面温度より低い状態(放熱環境)で、かつ環境温度が 0.35°C 以上の場合に赤外線法による浮きの検出が可能であるということが明らかになった。
- ② トンネル内気温が健全部コンクリート表面温度より高い状態(吸熱環境)では、浮

きの検出率が 40%と低く、環境温度の絶対値が大きくなっても検出率は改善しなかった。

第 6 章では、シールドトンネル区間においても、赤外線法の適用が可能であることを確認するために、ある駐車場の端から 100m の中子型単線シールドトンネル区間において、2014 年 7 月から翌年 2 月までトンネル内気温を連続測定し、トンネル坑内の温度環境の分析を実施した。この結果、開削トンネルの研究結果から、浮きの検出が可能とされる、放熱環境かつ環境温度が 0.35℃以上になる赤外線法による計測可能日数は、10 月では計測可能日の割合は約 65%であるが、外気温が低下する 11 月から 1 月までは 80%以上の割合で計測が可能であることが明らかになった。

また、同一区間において打音検査を実施し、その結果確認された 246 箇所の浮きに対して、A（はく落の恐れがある）、B（将来、A に進展の恐れがある）、C（はく落の恐れなし）の 3 段階のランク付けを実施した。その上で、2014 年 8 月、11 月、2015 年 1 月の 3 回にわたり赤外線法による計測を実施し、浮きの検出率について分析を行った結果、下記のような成果を得ることができた。

①A ランクの浮きについては、3 回の計測とも赤外線法ですべて検出できた。

②B ランクの浮きの検出率については、外気温が高い 8 月は 38%であったが、外気温の低下する 11 月、1 月では 95%であった。

③C ランクの浮きの検出率についても、8 月が 36%、11 月が 61%、1 月が 64%を得ることができた。

このことから、はく落につながる恐れのある浮きについては、ほぼ検出が可能であることが明らかになった。しかし一方で、赤外線法では浮きと判断したが、実際には浮いていない箇所（以下、過検出）が全体の 6 割程度存在し、赤外線法の実用化に向けた課題であることが明らかになった。

第 7 章では、赤外線法の実用化に向けての課題の解決に取り組んだ。

まずは、赤外線法による熱画像を撮影する作業日程の決定方法の効率化を検討した。直近で特別全般検査が終了した路線の、比較的変状の多いと思われる駅間において 2015 年 8 月から翌年 2 月まで連続して温度計測を実施し、外気温との関係を整理した。することで、外気温の平均気温が 15℃を下回れば、トンネル内温度環境が赤外線法に適していることを確認した。

次に、同区間において、別途綿密な全面打音検査を実施し、区間内の全ての浮きを検出し、その結果と特別全般検査結果、および赤外線法による計測結果と比較した。その結果、全面打音検査で検出された浮き 174 箇所に対し、特別全般検査のみで検出された箇所 7 箇所、赤外線法のみで検出された箇所 73 箇所、双方で検出された箇所 27 箇所、双方で未検出の箇所 67 箇所であったことから、赤外線法による浮き検出率は約 60%で

あることを確認した。

このことから、浮きを検出する手段として、これまで最も有効であった特別全般検査よりも、赤外線法による浮きの検出数が大幅に上回り、赤外線法の有効性が確認された。

さらに 6 章で明らかになった課題である、過検出についての処理方法を検討した。上記の調査で判明した赤外線法による 239 箇所 of 過検出数を低減する方法として、赤外線法における浮きと判断された部分の面積が小さいほど過検出が多いことに着目し、面積 0.03 m²以下の浮き判定箇所についてはノイズとして棄却する方法を考案した。その結果、ノイズとして棄却された 88 箇所のうち、実際の浮きが 11 箇所、B 判定 9 箇所、浮きの補修跡が 2 箇所であり、この方法で 75%の過検出を除去できることを確認した。

第 8 章では、本研究で得られた成果をもとに地下鉄トンネルの維持管理の実務に、赤外線法を導入する具体的な方法を考案した。手順は次の 6 段階で構成されている。

①外気温の観測結果から計測実施日程の決定、②赤外線法計測の実施、③変温部抽出、④面積によるノイズ処理、⑤赤外線法によるデータと既存の検査データ（通常全般検査、特別全般検査）を総合して、打音点検箇所を設定、⑥打音検査及び結果の記録。なお、東京地下鉄株式会社では、はく落予防を目的として 4 年周期で鉄道構造物等維持管理標準に基づく検査とは別に、打音点検を実施することとしていることから、この仕組みを打音点検に導入することとしている。

9.2 課題と今後の対策

以上、本研究において得られた知見をもとに、今後の主な課題を述べ、それらに対する対策について提案する。

【課題】

- ① 赤外線法は、特別全般検査と比較して、浮きの検出率は高いことが確認されたが、依然として、赤外線法では検出が困難な浮きが存在する。
- ② 赤外線法による熱画像から、浮きを判定する方法は、検査員が画像を直接確認して浮き部を抽出していることから、機械化や効率化を進める必要がある。
- ③ 日常の維持管理およびトンネルの長期保全と、赤外線法によるはく落予防の関係を整理し、総合的な維持管理の体系を組み立てる必要がある。

【対策】

課題①について

- ・ 検出率向上のために、検査実施予定日については、鉄道運行営業終了後から赤外線法の計測までの間に、可能な区間は強制換気等によりトンネル内気温を低下させ、環境温度の絶対値を大きくすることにより、検出率の向上が期待できる。
- ・ 今後実施される特別全般検査において、平板セグメントや中子セグメントと浮きの傾向の比較や、使用骨材の変遷と温度差異の関係について更に分析を進め、適切な閾値を検討していく。
- ・ また、計測の精度を向上させる為に、例えば営業列車の走行しない機材線などに、予め浮きの箇所を作り、キャリブレーションに使用するなどの方法も検討する。

課題②について

- ・ 第3章で述べた、可視画像データのひび割れの形状認識から、自動的にはく落危険箇所を抽出する技術を応用し、赤外線画像データから画像認識をして、自動的に浮き箇所を抽出するシステムを開発することにより、浮き部抽出の効率化が期待できる。
- ・ 同様に第3章で述べた統計分析によるはく落の観測確率、画像認識によるはく落危険箇所抽出の結果と、赤外線法による浮きの検出とを組み合わせ、最適な打音箇所の特定を行う研究を行うことで、浮き部抽出の自動化と検出率の向上を実現することが期待できる。
- ・ 将来的には、実際に打音点検を実施したデータが蓄積されることを踏まえ、打音を実施しなくても浮きを高い精度で判別する解析方法として、「変温部の部位」「面積」「健全部の温度」「浮き部の温度」「温度差異（健全部の温度－変状部の温度）」「撮影時のトンネル内の気温（剛体架線等の鉄部分で代用）」及び可視画像から得られた「ひび割れ」「漏水」「その他変状」等を説明変数として、目的変数を（浮きと一致／不一致）としてロジスティック回帰分析を行う。その分析の結果から説明変数の変数選択を行い、精緻なモデリングをして交差妥当化による予測モデルの検証を行い、「浮き」に関する存

在確率を算出する方法などを検討する必要がある。

- ・ 現在は、はく落予防のみに焦点を当て、赤外線法および打音点検を実施することとしているが、を図9-2-1にフローを示すような、はく落予防を行いながら、トンネルの長期保全に向けての、維持管理データとしての活用を図っていくことが有効と考える。
- ・ 検査の機械化、効率化が進むにつれて、トンネル維持管理を実施する土木技術者の技術力が低下することが懸念されるため、引き続き技術の伝承を実施していくことが重要であると考える。例えば、東京メトロの総合研修訓練センターには、訓練用の箱型トンネルが設置されており、教室でのトンネル維持管理の講義（写真9-2-1）を実施しているほか、AR技術を活用し、タブレット端末を通じて訓練用トンネルに疑似的に変状を映し出すシステム（写真9-2-2）等、様々な教育プログラムを開発し、活用している。

本研究では、赤外線法による地下鉄覆工コンクリートの浮きの検出方法と実用化について検討してきた。今後、大きな社会問題であるコンクリートのはく落事象が可能な限り少なくなり、安全で安心な地下鉄輸送を提供すること、更には、データの総合的な活用と適切な維持管理の実施により、地下鉄トンネルの長寿命化を実現することを願う次第である。

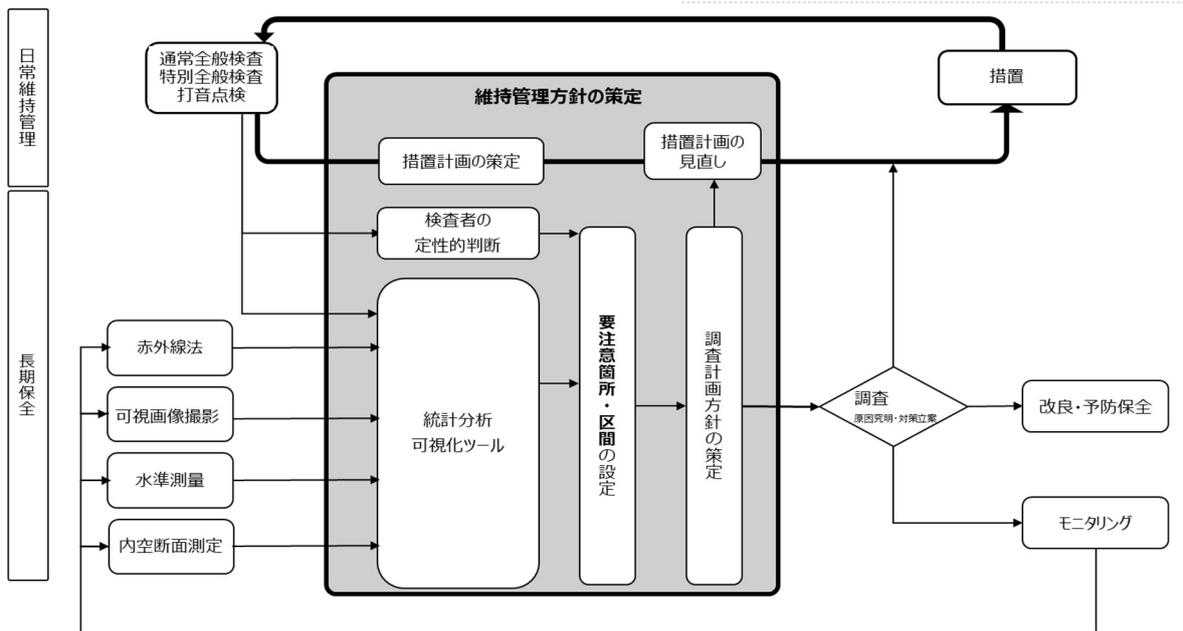


図9-2-1 トンネル維持管理体系フロー図



写真9-2-1 トンネル維持管理教育講義風景



写真9-2-2 トンネル検査教育用アプリケーションソフト

謝 辞

本論文は、私が東京地下鉄株式会社において、地下鉄トンネル構造物の維持管理に関する業務を担当したことから、社会的な問題であったコンクリートのはく落対策の一環として、より確実かつ効率的に、はく落の前兆である浮きを発見する手段として、赤外線熱計測によるコンクリートの浮きの検出について取り組んだ研究を取りまとめたものであります。

本論文の作成に当たり、早稲田大学理工学術院 赤木 寛一 博士には、懇篤なるご指導・ご鞭撻を頂戴いたしました。励ましと優しいお言葉を頂き、完成するまでの長い期間、適切なご助言を賜りここまでに至りました。本当に有難うございました。ここに深甚なる感謝の意を表し、心より御礼申し上げます。

また、早稲田大学理工学術院 岩波 基 博士、同 佐藤 康彦 博士には、本論文をまとめるにあたり、研究の細部に至るまで、機長かつ有意義なご意見・ご指導を賜りました。ここに深謝申し上げます。

さらに、東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 小西 真治 博士には、研究当初より様々なアドバイスと励ましのお言葉、アイデアを頂きましたばかりか、地下鉄トンネル構造物の維持管理業務全般にわたり、ご指導とサポートを頂きました。心より感謝申し上げます。

第また、1章及び第2章におきましても、事例やデータに関する資料の提供を頂きました。合わせて感謝申し上げます。

第3章では、東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 三浦 孝智 様、今泉 直也 様、榎谷 祐輝 様、野口 正則 様、田口 真澄 様、田中 大介 様、笹原 道治 様、並びに産業能率大学 福中 公輔 様、および株式会社チェンジ 福留 大士 様、伊藤 彰 様、尾形 正則 様には、土木業務のICT化の実施、データ解析の実施の時点より、長い年月を掛けて一緒に作り上げて頂き、本論文について様々なデータや資料のご提供を頂きました。厚く御礼申し上げます。

第4章、第5章、第6章、第7章では、赤外線熱計測の実施、分析・評価、取りまとめにおいて、株式会社 メトロレールファシリティーズ 篠原 秀明 様、清水建設株式会社 久保 昌史 様、株式会社 パスコ 黒須 秀明 様、日下 義政 様、川島 千明 様、株式会社 保全工学研究所 中山 聡子 様には、貴重なるご支援とご協力を頂戴しましたことに、改めて深謝申し上げます。

また、この他にも、全体を通じて東京地下鉄株式会社 工務部 諸橋 由治 様、根本 早季

様，同改良建設部 村上 哲哉 様には，様々なデータや資料提供を頂きました．また，東京地下鉄株式会社 人事部 総合研修訓練センターの皆様，私の上司である古屋 俊秀 様を始め，多くの関係者の皆様のご理解と，温かい励ましのお言葉を頂いたからこそ，本論文を無事遂行することができました．この場をお借りしまして，皆様に感謝とともに御礼申し上げます．本当に有難うございました．

2019年 2月 川上 幸一

研究業績 (1/3)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者 (申請者含む)
1. 論文	
○論文	<u>川上幸一</u> , 小西真治, 篠原秀明, 久保昌史, 黒須秀明, 赤木寛一, 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方法の検討とその応用, 土木学会論文集 F1, 74 巻 1 号 p.25-39, 2018 年 8 月
○論文	<u>川上幸一</u> , 小西真治, 村上哲哉, 日下義政, 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, p.9-16, 土木学会, 2016.
○論文	<u>川上幸一</u> ,小西真治, 村上哲哉, 久保昌史, 中山聡子, 赤外線熱計測による地下鉄シールドトンネル内中子型セグメント表層コンクリートの浮き検出, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.71, No.3 (特集号), I_112-I_121, 2015.
○論文	<u>川上幸一</u> , 小西真治, 久保昌史, 中山聡子, 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, 地下空間シンポジウム論文・報告集. 第20巻. Pp.73-84, 土木学会, 2015.
○論文	<u>Kouichi KAWAKAMI</u> , Shinji KONISHI, Shigeo Hozumi,Tetsuya MURAKAMI, Masafumi KUBO, Yoshimasa KUSAKA, Development of Voids Detection Method in Subway Tunnel Lining with Infrared Thermometry, The 11 th World Congress on Railway Research, May 29-June 2,2016,Milan, Italy,
論文	Masumi SHINOZAKI, Shinji KONISHI, <u>Koichi KAWAKAMI</u> , Masafumi KUBO, Satoko NAKAYAMA , Effective method of inspection for voids near surface in subway tunnel with infrared thermometry, The International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems, November 10-12 2015, Chiba, JAPAN
○論文	<u>Kouichi Kawakami</u> , Yoshihiko Mutou, Shinji Konishi, Takanori Miura, Shunsuke Matsukawa, Yuuji Morohashi, Utilization of IT and the Current Condition of the Repair Measures in the Maintenance of Subway Tunnels, ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly May 22-28, 2015, Lacroma Valamar Congress Center, Dubrovnik, Croatia
報告	篠原秀明, 小西真治, <u>川上幸一</u> , 三浦孝智, 田口真澄, 村田利文, 石川雄章, 画像認識技術を利用したはく落要注意箇所の自動抽出システムの開発, トンネル工学報告集. 第26巻, III-2, 土木学会, 2016.11
○報告	<u>川上幸一</u> , 小西真治, 篠崎真澄, 福中公輔, ベイジアンネットワークによる地下鉄トンネルの変状観測確率の検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第21巻, B2-4, p123-128, 土木学会, 2016. (講演奨励賞)

研究業績 (2/3)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者 (申請者含む)
報告	小西真治, <u>川上幸一</u> , 三浦孝智, 篠崎真澄, 篠原秀明, 村田利文, 石川雄章, 画像データによるはく落要注意箇所抽出方法の研究, トンネル工学報告集, 第25巻, □-2, 土木学会, 2015. 11.
○報告	<u>川上幸一</u> , 小西真治, 三浦孝智, 篠崎真澄, 福中公輔, 地下鉄トンネルの全般検査データによる維持管理指標の研究, トンネル工学報告集, 第25巻, □-1, 土木学会, 2015. 11.
○報告	<u>川上幸一</u> , 小西真治, 岩本佑太, 日下義政, 黒須秀明, 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, トンネル工学報告集, 第24巻, □-5, 土木学会, 2014. 12. (優秀講演賞)
2. 講演	
講演	久保昌史, <u>川上幸一</u> , 瀬筒新弥, 佐々木考太, 小西真治, 中山聡子, 赤外線熱計測によるトンネルコンクリートの浮き・剥離の検出割合向上に関する検討, 土木学会第72回年次学術講演会□-939, 平成29年9月
講演	川島千明, 黒須秀明, 小西真治, <u>川上幸一</u> , 村上哲哉, 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, 土木学会第71回年次学術講演会□-758, 平成28年9月
講演	篠原秀明, 小西真治, <u>川上幸一</u> , 三浦孝智, 村田利文, 石川雄章, 可視画像データによる地下鉄トンネル異状箇所抽出システムの開発, 土木学会第71回年次学術講演会□-747, 平成28年9月
講演	中山聡子, <u>川上幸一</u> , 小西真治, 村上哲哉, 久保昌史, 開削トンネルにおける赤外線熱計測によるコンクリートの浮き・剥離手法の検討, 土木学会第71回年次学術講演会□-745, 平成28年9月
講演	五十嵐 翔太・三浦 考智・ <u>川上 幸一</u> , 榎谷祐輝, 野口正則, 小松正典, ICTを活用した地下鉄のトンネル検査, 土木学会第71回年次学術講演会□-744, 平成28年9月
講演	田口真澄・榎谷祐輝・ <u>川上幸一</u> , 三浦孝智, 村上哲哉, 福中公輔, 地下鉄トンネル検査結果を用いた維持管理指標の妥当性の検証, 土木学会第71回年次学術講演会VI-682, 平成28年9月
講演	日下義政, 黒須秀明, 土屋善靖, 小西真治, <u>川上幸一</u> , 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□-219, 平成27年9月
講演	村上哲哉, 福中公輔, 小西真治, <u>川上幸一</u> , 篠崎真澄, 全般検査結果を用いた地下鉄トンネルリスク評価のための総合指標の検討, 土木学会第70回年次学術講演会VI-344, 平成27年9月

研究業績 (3/3)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者 (申請者含む)
講演	篠崎真澄, 村上哲哉, <u>川上幸一</u> , 小西真治, 福中公輔, 全般検査結果を用いたベイジアンネットワークによる変状発生の因果関係の分析, 土木学会第 70 回年次学術講演会VI-343, 平成 27 年 9 月
○講演	<u>川上幸一</u> , 小西真治, 岩本佑太, 小西真治, 石川雄章, 安達慎一, 可視画像データを利用した地下鉄トンネルの状態分析, 土木学会第 70 回年次学術講演会VI-155, 平成 27 年 9 月
講演	久保 昌史・小西 真治・ <u>川上 幸一</u> , 小松正典, 沢田秀樹, 中山聡子, 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, 土木学会第70回年次学術講演会□-490, 平成26年9月
○講演	<u>川上幸一</u> , 武藤義彦, 大泉政彦, 保栖重夫, 諸橋由治, 地下鉄箱型トンネルにおける中性化進行予測, 土木学会第 69 回年次学術講演会V-165, 平成 26 年 9 月
3. その他	
○特許	<u>川上幸一</u> , 三浦孝智, 変状管理システム, 特許6006761 (2016/09/16)
特許	福中公輔, <u>川上幸一</u> , 小西真治, 三浦孝智, 村上哲哉, 諸橋由治, 榎谷祐輝, 篠崎真澄, 維持管理指標算出装置及び維持管理指標算出方法, 特許5904651 (2016/03/25)
特許	福中公輔, <u>川上幸一</u> , 小西真治, 野本一美, 石川知幸, 瀬筒新弥, 野口正則, 岩本佑太, 管理指標算出装置及び管理指標算出方法, 特許5904650 (2016/03/25)
著書	丸山久一, 岸利治, <u>川上幸一</u> , 他, コンクリート構造物の補修・補強 ～実例で見る思想と実践～ 8-2 導水から止水へ p412-416, (株)産業技術サービスセンター, 2016.4
講演	福中公輔, 澤田基之, 小西真治, <u>川上幸一</u> , 三浦孝智, 今泉直也, データサイエンスと働き方改革～安全で効率的なメンテナンスを目指して～, データサイエンス協会 4rd シンポジウム, 2017 年 10 月, (データサイエンスアワード 2017 最優秀賞)
○報文	川上幸一・若山哲雄・諸橋由治, 実物大の訓練用トンネルを用いた土木技術者の育成, トンネルと地下 Vol49 8月号 p.45-51, 2018
報文	三浦孝智, <u>川上幸一</u> , 小西真治, 篠原秀, 地下鉄トンネル覆工の浮き・剥離の可視化による検出システムの検討, トンネルと地下 Vol47 11月号 p.41-46, 2016.
○報文	<u>川上幸一</u> , 鉄道構造物の歴史を辿る 51 わが社の誇る鉄道施設 19 銀座線「新橋駅」「万世橋駅」「山岳工法トンネル」, 鉄道施設協会誌 Vol.53 7月号, p6-8, 2015. (論文賞)
○報文	<u>川上幸一</u> , 東京メトロの土木構造物検査における ICT 活用, 鉄道施設協会誌 Vol.53 2月号, p40-43, 2015. (論文賞)
報文	その他, 報文 6 件

論文題目 : 赤外線熱計測による地下鉄覆工コンクリート浮き検出
方法の検討とその応用

論文題目 (英題) : Infrared Thermometry Application to The Detection of Void in
The Subway Tunnel Lining Surface

学位申請者 : 川上 幸一 (Koichi KAWAKAMI)

申請学位 : 博士 (工学)

審査分科会開催日 : 2019年1月24日

上記の論文が博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。

審査員 :

(主査) 早稲田大学教授 工学博士 (早稲田大学) 赤木 寛一

年 月 日

(副査) 早稲田大学教授 博士 (工学) 早稲田大学 岩波 基

年 月 日

(副査) 早稲田大学教授 博士 (工学) 北海道大学 佐藤 靖彦

年 月 日

