

博士論文審査報告書

論文題目

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

申請者

川上	幸一
Koichi	KAWAKAMI

2019年2月

我が国の鉄道は、輸送人員として毎年度 230 億人以上の輸送を支えており、路線延長として 25,000km を超える施設を有している。このうち、橋梁が約 100,000 橋、トンネルは約 5,000 本が整備されている。2012 年 12 月の中央自動車道笹子トンネル事故以来、鉄道においても設備の落下事象は問題となっており、2012 年度、2013 年度の鉄道トンネルや高架橋からのコンクリート片のはく落件数は、落下物総質量が 1kg 以上となるものは、それぞれ 66 件、47 件となっており、いずれの事象においても、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もコンクリートのはく落は、列車の安全を確保するうえで大きな問題である。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、つまり浮き・はく離（以下、浮き）が進展して発生すると考えられる。現在、浮きの検出はコンクリート表面の目視のみでは困難であることから、検査員による打音検査を主体に行われている。しかし、検査員が直接打音するため、検査速度の限界、高所作業車や足場の必要性等から、終電から始発までの限られた時間（以下、線閉時間）内に実施するには、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、検査員の能力や経験の違いで見落とし等が生じるという課題がある。

上記のことから、本論文では、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ている。

審査にあたっては、2018 年 11 月 6 日に審査員予定者 3 名による予備審査会を実施し、専攻内縦覧に付してよい旨の判定を得た。11 月 8 日から 15 日間の建設工学専攻における縦覧の後、11 月 22 日の専攻会議で博士論文受理申請が承認され、12 月 20 日の創造理工学研究科運営委員会で論文が受理された。2019 年 1 月 10 日に公聴会を開催するとともに、4 科目の学識確認を実施した。研究倫理については受理前に申請者が研究倫理科目を受講するとともに、論文の剽窃・盗用チェックを実施して問題のないことを確認した。

本論文は、序論から結論までの 9 章で構成されているが、以下に各章の概要を述べる。

第 1 章は序論であり、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が概説されている。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ている。

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ている。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ている。

第3章では、東京地下鉄株式会社（以下、東京メトロ）の維持管理の概要について説明されている。まず、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され、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ている。さらに、今後の地下鉄トンネル点検において赤外線法との組み合わせが可能な考えられるシステムとして、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箇所を抽出する試みについて概説されている。

第4章では、地下鉄開削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、土被り3.3mで換気口から20m、土被り6.5mで換気口から300m、土被り7.6mで換気口から250mの3地点で実施した予備検討の結果を述べている。この予備検討では、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こと、またトンネル内気温と健全部の温度差（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ことが確認されている。

第5章では、第4章の観測結果をもとに、以下の2項目の重要な知見を明示している。

①赤外線画像から浮きを検出する健全部と浮き部の温度差の閾値を 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こと。

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いこと。

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が実施された。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°C 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

可能であることを明らかにしている。

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行っている。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、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。

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でいる。

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、外気温との関係を整理することで、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ている。

次に、同区間のうち 500m の区間において、別途綿密な全面打音検査を実施し、赤外線法による浮き検出率は約 60%であることを確認している。

さらに過検出についての処理方法を検討した結果、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、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 37%の過検出を除去できることを確認している。

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ている。

第 9 章は結論であり、各章で述べた結果および知見を取りまとめ、今後ますます重要となると思われる地下鉄トンネル覆工コンクリートのはく落対策に関する今後の課題と対策を整理している。

以上を要するに、本論文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、浮きを非破壊・非接触で効率的に検出できる検査方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検査結果に基づく手法を考案している。この成果は、土木構造物の維持管理の重要度が増す時代に向けて具体的な解決手法を提示するものであり、地盤工学、トンネル工学上の貢献大なるものと判断される。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2019 年 1 月

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

副査 早稲田大学教授 博士(工学)早稲田大学 岩波 基

早稲田大学教授 博士(工学)北海道大学 佐藤靖彦