



|              |                                                                               |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Title        | 画像解析と振動センシング技術を活用した鉄道トンネル覆工コンクリートの定期検査DXに関する研究                                |
| Author(s)    | 前田, 貴公                                                                        |
| Citation     | 大阪大学, 2026, 博士論文                                                              |
| Version Type | VoR                                                                           |
| URL          | <a href="https://doi.org/10.18910/105473">https://doi.org/10.18910/105473</a> |
| rights       |                                                                               |
| Note         |                                                                               |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏 名 ( 前 田 貴 公 )

## 論文題名

画像解析と振動センシング技術を活用した鉄道トンネル覆工コンクリートの定期検査DXに関する研究

## 論文内容の要旨

日本の鉄道構造物は建設から長期間が経過し、劣化の進行が顕在化している。そのため、適切な維持管理の実施が不可欠である。現行の維持管理では、定期検査として全構造物を対象に検査員による目視調査や打音調査を行い、損傷に至る前に対策を講じる「状態監視保全」が行われている。近年は、定期検査で得られたデータを基盤に分析技術を活用し、劣化因子の推定や劣化予測を行う「予知保全」を目指したDX研究も進展している。しかし、検査員による定性的データに依存することが多く、推定や予測の精度・信頼性には依然として課題が残されている。さらに、鉄道トンネルでは高所作業や作業時間の制限、労働力不足など現場ならではの困難が伴う。したがって、鉄道トンネルにおいて効率的に定量データを取得し、先進的な分析技術を活用することで定期検査のDXを推進し、高度な維持管理を実現することが重要である。

本研究では、鉄道トンネルの高水準な維持管理の実現を目的として、定期検査のDXを推進するために二つの課題に取り組んだ。すなわち、①画像解析技術を活用した覆工コンクリートの目視調査の効率化・高精度化、②振動センシングとロボット技術の融合による覆工コンクリートの打音調査の効率化・高精度化である。本論文は、以下の8章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景や目的、論文の構成を述べた。

第2章では、覆工画像からひび割れ等の変状を抽出する変状検出技術と、検出された変状を基に覆工の健全性を評価する指標や特徴的変状を抽出する変状評価技術の研究動向を整理した。課題としては、変状検出から評価までの自動化に関する研究が十分に進展していないことに加え、鉄道トンネルの連続覆工画像を対象とした精度検証や適用事例が乏しい点を明確にした。

第3章では、深層学習に基づくインスタンスセグメンテーションを用いた新たな変状検出手法を構築した。連続する覆工画像を対象に、検査員による判読結果と本手法による検出結果を変状ごとに比較・評価した。その結果、本手法は変状の見逃しが少なく、検査員の判読結果と高い再現性を示すことが確認できた。

第4章では、機械学習を含む各種画像解析技術を組み合わせ、前章で構築した変状検出手法により抽出された変状から4種類の注意すべき変状を自動的に識別する新たな変状評価手法を構築した。連続覆工画像を対象に、検査員の判読結果と本手法による検出結果を鉛直継目間ごとに比較・評価したところ、再現率約94%、適合率約64%を示し、注意すべき変状の見逃しが極めて少なく、検査員の判読結果と高い再現性を有することがわかった。さらに、変状検出から評価までの一連の工程を両手法により自動的に実施可能であることを示した。

第5章では、コンクリート内部欠陥を検出する各種非破壊検査技術と、UAVや壁面走行ロボットなどのロボット技術を融合した打音調査の遠隔化・自動化に関する研究動向を整理した。課題としては、打音調査の高精度化に加え、効率化にも寄与する研究成果が依然として不足している点を明らかにした。

第6章では、振動センサを用いた非破壊検査装置を新たに検討・製作し、コンクリート内部欠陥の検出性能を実験的および解析的に検証した。その結果、欠陥深さが100mm以下、かつ欠陥長さ150mm（面積換算22,500mm<sup>2</sup>）以上の場合、欠陥範囲内の打撃応答が取得できれば、時刻歴応答波形から得られる振幅や減衰に着目した特性値により内部欠陥の有無を評価できることが確認された。さらに、打撃応答を面的に取得することで、これらの特性値を用いて内部欠陥の広さや深さを推定できる可能性も示唆された。

第7章では、製作した非破壊検査装置とロボットアームを融合した調査ロボットを新たに設計・製作した。人工内部欠陥を有する試験用トンネルおよび実トンネルの覆工コンクリートを対象に、調査ロボットと高所作業車を用いた検査員による打音調査結果を比較した。これにより、調査ロボットは検査員による打音調査結果と同等の範囲を内部欠陥と判定できることを確認した。さらに、作業効率の観点からは、単位時間・単位要員当たりの計測箇所数が検査員による打音調査結果の4倍以上に達し、本ロボットを活用する計測手法の卓越した効率性が示された。

第8章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題や発展性についても記述し、結論とした。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

| 氏 名 ( 前 田 貴 公 ) |         |     |       |
|-----------------|---------|-----|-------|
| 論文審査担当者         | (職) 氏 名 |     |       |
|                 | 主 査     | 教授  | 鎌田 敏郎 |
|                 | 副 査     | 教授  | 乾 徹   |
|                 | 副 査     | 准教授 | 堤 成一郎 |

## 論文審査の結果の要旨

日本の鉄道構造物は建設から長期間が経過し、劣化の進行が顕在化している。そのため、適切な維持管理の実施が不可欠である。現行の維持管理では、定期検査として全構造物を対象に検査員による目視調査や打音調査を行い、損傷に至る前に対策を講じる「状態監視保全」が行われている。近年は、定期検査で得られたデータを基盤に分析技術を活用し、劣化因子の推定や劣化予測を行う「予知保全」を目指した DX 研究も進展している。しかし、検査員による定性的データに依存することが多く、推定や予測の精度・信頼性には依然として課題が残されている。さらに、鉄道トンネルでは高所作業や作業時間の制限、労働力不足など現場ならではの困難が伴う。したがって、鉄道トンネルにおいて効率的に定量データを取得し、先進的な分析技術を活用することで定期検査の DX を推進し、高度な維持管理を実現することが重要である。

本研究では、鉄道トンネルの高水準な維持管理の実現を目的として、定期検査の DX を推進するために二つの課題に取り組んでいる。すなわち、①画像解析技術を活用した覆工コンクリートの目視調査の効率化・高精度化、②振動センシングとロボット技術の融合による覆工コンクリートの打音調査の効率化・高精度化である。本論文は、以下の 8 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景や目的、論文の構成を述べている。

第 2 章では、覆工画像からひび割れ等の変状を抽出する変状検出技術と、検出された変状を基に覆工の健全性を評価する指標や特徴的変状を抽出する変状評価技術の研究動向を整理している。課題としては、変状検出から評価までの自動化に関する研究が十分に進展していないことに加え、鉄道トンネルの連続覆工画像を対象とした精度検証や適用事例が乏しい点を明確にしている。

第 3 章では、深層学習に基づくインスタンスセグメンテーションを用いた新たな変状検出手法を構築している。連続する覆工画像を対象に、検査員による判読結果と本手法による検出結果を変状ごとに比較・評価している。その結果、本手法は変状の見逃しが少なく、検査員の判読結果と高い再現性を示すことを確認している。

第 4 章では、機械学習を含む各種画像解析技術を組み合わせ、前章で構築した変状検出手法により抽出された変状から 4 種類の注意すべき変状を自動的に識別する新たな変状評価手法を構築している。連続覆工画像を対象に、検査員の判読結果と本手法による検出結果を鉛直継目間ごとに比較・評価したところ、再現率約 94%、適合率約 64%を示し、注意すべき変状の見逃しが極めて少なく、検査員の判読結果と高い再現性を有することを明らかにしている。さらに、変状検出から評価までの一連の工程を両手法により自動的に実施可能であることを示している。

第 5 章では、コンクリート内部欠陥を検出する各種非破壊検査技術と、UAV や壁面走行ロボットなどのロボット技術を融合した打音調査の遠隔化・自動化に関する研究動向を整理している。課題としては、打音調査の高精度化に加え、

効率化にも寄与する研究成果が依然として不足している点を明らかにしている。

第6章では、振動センサを用いた非破壊検査装置を新たに検討・製作し、コンクリート内部欠陥の検出性能を実験的および解析的に検証している。その結果、欠陥深さが100mm以下、かつ欠陥長さ150mm（面積換算22,500mm<sup>2</sup>）以上の場合、欠陥範囲内の打撃応答が取得できれば、時刻歴応答波形から得られる振幅や減衰に着目した特性値により内部欠陥の有無を評価できることを確認している。さらに、打撃応答を面的に取得することで、これらの特性値を用いて内部欠陥の広さや深さを推定できる可能性も示唆されている。

第7章では、製作した非破壊検査装置とロボットアームを融合した調査ロボットを新たに設計・製作している。人工内部欠陥を有する試験用トンネルおよび実トンネルの覆工コンクリートを対象に、調査ロボットと高所作業車を用いた検査員による打音調査結果を比較している。これにより、調査ロボットは検査員による打音調査結果と同等の範囲を内部欠陥と判定できることを確認している。さらに、作業効率の観点からは、単位時間・単位要員当たりの計測箇所数が検査員による打音調査結果の4倍以上に達し、調査ロボットを活用する本計測手法の卓越した効率性を示している。

第8章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題や発展性についても記述し、結論としている。

以上のように、本論文は、深層学習による変状検出・評価技術と振動センシングおよびロボット技術を統合した新たな覆工コンクリート検査手法を提案し、実トンネルを含む各種検証によりその有効性と高い実用性を示している。これらの成果は、鉄道トンネルの定期検査における定量化・自動化を体系的に達成するものであり、定期検査のDX推進および維持管理の高度化に寄与するとともに、当該分野の発展に貢献する学術的価値の高い研究であると評価できる。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。