

## 学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	高速道路トンネル覆工の点検技術と健全度評価の精度向上に関する研究
氏名(Name)	海瀬 忍

トンネルを健全かつ安全に管理するためには、維持管理の基礎となる点検を高精度で効率的に実施することは必要不可欠である。本論文では、現状の高速道路トンネルの点検において抽出された課題を解決することにより、高速道路トンネル覆工の点検技術と健全度評価の精度向上を目的に取り組んだ研究成果を取りまとめたものである。

第1章では、わが国の道路トンネルは老朽化が早いペースで進んでおり、特に、日本国内の交通物流の重要な位置を占める高速道路トンネルは、その資産数量および設計速度が速い等の要因から維持管理がより難しいものとなっている。維持管理の基礎となる覆工点検について、現状の高速道路トンネル点検システムの課題を抽出して、点検技術の向上および健全度ランク・評価点の閾値等の妥当性および変状進行性評価の定量化に関して解決する必要性とその研究の目的を明らかにした。

第2章では、トンネル点検技術について既往の研究および各組織の実施状況を取りまとめた結果、国内外ともに目視および打音点検が基本であり、点検効率化のための機械化技術は、現在のところ全面的な適用には至っていないことがわかった。既往研究調査の結果、東日本・中日本・西日本高速道路株式会社（以下“NEXCO”という）においても、点検の機械化を進め、定量的な健全度評価手法を取り入れているものの全面的な適用には至っていない。そのため、高速道路トンネルの点検システムの課題解決として、走行型覆工表面画像撮影技術の適用による点検技術の向上および点検データを分析し、健全度評価技術向上の必要性について述べた。

第3章では、点検技術の向上を目的に、近接目視点検の代替として走行型の覆工画像撮影技術適用の可能性についてまとめた。検証は供用中のトンネルを利用した試行試験により行った。人が行う通常の近接目視点検で作成した通常展開図、走行型画像撮影車による覆工画像から作成した画像展開図、画像展開図を現地に持参し近接目視を行って作成した詳細展開図（正解）の、各変状抽出の精度検証を行った。その結果、画像展開図は詳細展開図と比較した場合は精度が劣ることが判明したが、通常点検で作成される通常展開図と比較してほぼ同等の精度があることが確認され、これら検証結果より1回目の詳細点検は走行型画像撮影車による覆工画像から作成した画像展開図に基づく全面の近接目視および打音点検を実施し、2回目以降については、健全度や特記事項の有無に応じて近接目視や打音点検を行う箇所を限定することで、現場での点検時間を削減しつつ、従来と同等以上精度で健全性の診断ができ、トンネル点検の高精度化および効率化ができることを示した。

第4章では、NEXCOが管理する85,000スパンを超えるトンネル覆工点検データを分析し、覆工画像撮影により健全性を診断している点検Aと現地における実施点検である点検Bの比較分析、健全性評価に用いる外力・はく落評価点と健全度ランクの関連性分析、各評価点の閾値の検証を行いその妥当性についてまとめた。点検Bを行ったスパンは、閾値以外に特記事項等により判断しているスパンがあることから、閾値の適正化とともに、特記事項の照査・整理により、よりの確かな点検Bの実施が可能に

なると考えられた。閾値に関しては各評価点の閾値から健全度ランク付けは概ね分けられ、現場での点検 B の実施を 99%以上カバーできることから、閾値は妥当と判断できた。これらのことから、外力評価点、はく落評価点による健全度のランク付けおよび重点点検箇所を抽出する点検手法は現時点では問題ないことが検証できた。

第5章では、現状の覆工の健全度評価における進行性評価の検討をとりまとめた。ひびわれの進行性に関する定量的な評価指標はないため、覆工の健全度算出に活用している TCI を用いたひびわれ進行性の評価では、TCI のひびわれ量  $F_0$  とその増減値  $\Delta F_0$  を進行性のパラメータとし、 $\Delta F_0$  の閾値を設定して進行性の有無を評価する手法を提案した。検討は点検 B を複数回実施した 99 トンネルを対象とし、山岳トンネル工法、矢板工法について、 $\Delta F_0$  の平均値  $u$ 、標準偏差  $\sigma$  を算出した。一般的に  $u \pm \sigma$  の範囲に含まれるデータは全データの約 69%であり、この範囲は覆工画像撮影技術による画像からの読み取り誤差等を含んだ標準的な変状であると仮定して、点検データ等から検証を行った。 $\Delta F_0$  が進行性と関係のある閾値  $u + \sigma$  より大きいスパンに着目したところ進行性が確認でき、外力による変状の有無の指標とできる可能性があることを示した。

本研究の成果は、高速道路トンネル管理において従前行われていた定性的評価による健全度判定および現地での近接目視および打音点検による点検を、走行型覆工表面画像撮影技術を全面的に用いることおよび TCI を用いた定量的評価による効率的な点検手法を開発したことである。すなわち、従前の点検技術の問題点を解消し、現地での点検作業の大幅な効率化を行う技術を取り入れた、高精度で効率的な新規のトンネル詳細点検の適用性を確認したことである。

(様式 9 号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	海瀬 忍
審 査 委 員	主 査：進士 正人
	副 査：麻生 稔彦
	副 査：中村 秀明
	副 査：太田 岳洋
	副 査：吉武 勇
論 文 題 目	高速道路トンネル覆工の点検技術と健全度評価の精度向上に関する研究 (Study on Improvement of Accuracy concerning Inspection Technique and Health Evaluation for Expressway Tunnel Lining)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>高速道路トンネルを健全かつ安全に管理するために、維持管理の基礎となるトンネル覆工点検を高精度で効率的に実施することが必要不可欠である。本論文では、現状の高速道路トンネルの点検が抱える複数の課題を解決することにより、高速道路トンネル覆工の点検技術と健全度評価の向上を目的に取り組んだ研究成果を取りまとめた。論文は5章からなる。</p> <p>第1章では、わが国の高速道路トンネルの現状を述べている。特に、トンネル維持管理の基礎となる覆工点検に関して、現状の高速道路トンネル覆工点検システムの抱える課題を抽出して、点検技術の向上および健全度ランク・評価点の閾値等の妥当性および変状進行性評価の確立などを解決する必要性を明らかにしている。</p> <p>第2章では、国内外のトンネル覆工点検技術について既往の研究および各組織の実施状況を取りまとめている。その結果、国内外ともに目視および打音点検が基本であり、東日本・中日本・西日本高速道路株式会社（以下“NEXCO”という）が開発した点検効率化を目指した走行型画像撮影車によるトンネル覆工表面画像撮影などのトンネル覆工点検の自動化技術は、現在のところ我が国以外に適用事例がないことを明らかにしている。</p> <p>第3章では、走行型の覆工画像撮影技術の近接目視点検への代替としての可能性について、供用中の高速道路トンネルを利用した現地実験の結果を取りまとめている。現地実験では、通常近接目視点検で作成した通常展開図、走行型画像撮影車による覆工画像から作成した画像展開図、画像展開図を現地に持参した上で近接目視を行って作成した詳細展開図（正解）の、各変状抽出の精度を比較した。その結果、最初の詳細点検は走行型画像撮影車によるトンネル覆工表面画像から作成し、全面の近接目視および打音点検を実施した上で、2回目以降については、健全度や特記事項の有無に応じて近接目視や打音点検を行う箇所を限定することで、トンネル点検の高精度化および効率化ができることがわかった。</p> <p>第4章では、NEXCOが管理する85000スパンを超えるトンネル覆工点検データを分析</p>	

し、覆工画像撮影により健全性を診断している点検 A と現地における実施点検である点検 B との比較分析、健全性評価に用いる評価点と健全度ランクの関連性分析、各評価点の閾値の検証を行った。その結果、点検 A と点検 B の相関性は高いものの、評価項目の中に特記事項により健全度を判断しているスパンが存在することから、閾値の適正化とともに、特記事項の照査・整理により、よりの確な点検 B の実施が可能になることがわかった。

第 5 章では、現状の覆工の健全度評価における進行性評価の検討を取りまとめている。現在、ひびわれの進行性に関する定量的な評価指標はないため、覆工の健全度算出に活用しているひび割れ指数 TCI を用いた。検討は点検 B を 2 回実施した 99 トンネルを対象とし、TCI の増加量  $\Delta F0$  の平均値  $u$ 、標準偏差  $\sigma$  を算出した。そして、増加量  $\Delta F0$  が  $u + \sigma$  より大きいスパンに着目し、点検記録の記載と比較したところ、進行性の記載が確認できたため、覆工ひびわれの進行性の指標として活用できる可能性がわかった。

本研究の成果は、トンネル覆工の定性的な健全度判定を、走行型覆工表面画像撮影技術の積極的な活用と TCI を用いた定量的評価手法を組み合わせることで、高精度でかつ定量なトンネル覆工詳細点検に生まれ変わらせる可能性を明らかにしたことである。

公聴会には学内から 16 名、学外から 27 名もの出席があり、主な質問内容は、覆工点検に与えるトンネル施工方法の違いに関する影響評価に関するもの、走行型画像撮影車の覆工点検の高精度化に関するもの、影響の評価単位を従来のスパン単位からより細分化することに関する見解を求めるものなど多くの意見が寄せられたが、いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答が行われた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は以下のとおりである。（関連論文 計 3 編）

- 1) S. Kaise, K. Maegawa, T. Ito, H. Yagi, Y. Shigeta, K. Maeda and M. Shinji : Study of the image photographing of the tunnel lining as an alternative method to proximity visual inspection, Proceedings of the WTC2019 ITA-AITES World Tunnel Congress, Tunnels and Underground Cities, NAPLES, ITALY, 3-9 May, 2019, pp.2325-2334 (USB memory).(本文との関連 : 第 3 章 )
- 2) 海瀬忍, 伊藤哲男, 八木弘, 水野希典, 前田洸樹, 進士正人 : トンネル覆工の定量的な健全度評価手法に関する検証, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.74, No.1, pp.1-14, 2018. (本文との関連 : 第 4 章 )
- 3) 海瀬忍, 伊藤哲男, 八木弘, 水野希典, 前田洸樹, 進士正人 : トンネル覆工のひびわれ進行性評価方法に関する検証, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.73, No.3 (特集号), I\_10-I\_20, 2018. (本文との関連 : 第 5 章 )