

|             |                               |
|-------------|-------------------------------|
| 氏 名         | やす だ とおる<br>安 田 享             |
| 学 位 の 種 類   | 博 士 (工 学)                     |
| 学 位 記 番 号   | 工 博 第 2369 号                  |
| 学位授与の日付     | 平 成 16 年 3 月 23 日             |
| 学位授与の要件     | 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当       |
| 研究科・専攻      | 工 学 研 究 科 土 木 シ ス テ ム 工 学 専 攻 |
| 学 位 論 文 題 目 | トンネル構造物の維持補修最適化に関する研究         |

論文調査委員 (主 査) 教 授 大 西 有 三 教 授 小 林 潔 司 教 授 大 津 宏 康

## 論 文 内 容 の 要 旨

現在、社会基盤構造物をいかに存続させるかが最重要課題となっており、土木構造物の建設・維持・補修・更新を含めて、その費用・便益を総合的に評価する方法論として、土木構造物のアセットマネジメントという概念が注目されている。維持管理面で、この技術を実際問題に適用するためには、土木構造物の性能規定、劣化に伴う将来状態の予測手法、適切なタイミングで補修する意思決定手法の早期確立が要求されている。橋梁、舗装などでは、ライフサイクルコスト最適化による意思決定問題への拡張を図る研究が報告されつつあるが、トンネル構造物に対しては、岩盤材料が非常に複雑であり、構造物の損傷の原因を特定することが困難であるばかりか、劣化過程の推定には相当の不確実性が伴うことになるため、劣化過程の状態予測手法は未だ確立されていない。

本論文では、トンネル構造物の維持補修問題に焦点を当てた。研究の目的は、トンネルにおいても他の構造物と同一のプラットフォームでアセットマネジメントを論じる必要があることを踏まえ、山岳トンネル構造物の構成材料である覆工コンクリートに関する性能を規定し、不確実性を考慮した確率過程を適用した健全度低下モデルによって将来状態を予測し、ライフサイクルコスト算定によって維持補修問題を最適化する手法を提案することである。

また、今後の展望として、本研究で開発したモデルをアセットマネジメントシステムへ拡張する方法、構造的変状のモデルへの組み込み方法、リアルオプションを用いた柔軟な意思決定手法などを提案した。本論文の構成は、序章および結論を含め、6章から成っている。

第1章は序論であり、本論文の研究の背景と目的について論じるもので、トンネル構造物の健全度低下予測に関する課題を述べ、望ましいトンネルアセットマネジメント手法の方向性、提案する健全度低下モデルの基本的な考え方について述べている。

第2章は従来のトンネル維持管理手法について述べ、維持補修の最適化のための課題を整理している。従来の維持管理の問題点としては、変状の初期値や進展記録の不備、変状原因の特定困難、客観性の欠如などが挙げられる。本研究では、点検結果を定量的に評価する手法が構築されておらず、適切な対策工の選定、対策時期の設定が不明確であるという問題点に特に着目している。この問題解決のため、3章で論じる維持補修最適化モデル構築の基本的な考え方を示す。具体的には、トンネル構造物の性能規定、および将来的な健全度の低下進展について不確実性を考慮した確率過程でモデル化し、修繕（補修・補強）による健全度の回復過程を組み込む。さらに、点検間隔、臨界健全度によって健全度の遷移を制御するモデルとしてライフサイクルコストを算定し、最も経済効果の高い維持補修の組合せを求めるという意思決定モデルを構築し、維持補修最適化ルールを提案するものである。

第3章は維持補修最適化に向けたモデル構築について記述している。性能規定は、点検結果に基づくレーティング法を提案している。S, A, B で分類するような従来のグレーディング法を基本として、連続データへ拡張する必要があること、橋梁・舗装などの他の構造物と同一のスケールで規定できること、第3者影響・構造的変状の両者を扱うことを可能とする指

標であることが重要である。また健全度低下予測は、不確実性を考慮した確率過程によるモデル化が有効であることを示した。本モデルは、劣化過程を①トレンド、②拡散（ウィナー過程）、③ジャンプ（ポアソン過程）の3項より構成しており、特にジャンププロセスは、ひび割れによって不連続に健全度が低下するという物理的背景をモデルに取り入れたものである。不確実性は、拡散量およびジャンプダウン量に与えている。また、①+②の幾何ブラウン運動モデル、①+③のジャンププロセスモデル、および期待値パスによる特性曲線の3モデルで概ねトンネルの変状過程がモデル化できることを示している。修繕過程は、臨界健全度を下回ると所与の健全度まで回復するインパルス制御問題として定式化する。実際のトンネル点検結果からパラメータを求め、モンテカルロシミュレーションによって不確実項を与え、確率的パスを発生させることによって将来状態の予測を行う。最適化手法は、上記の各確率的パスを点検間隔と臨界健全度によって制御し、全てのパスの期待LCCを算定することによって、最適ルールとしての解を得るものである。また、解に与える影響因子として、点検制度、点検項目、レーティング手法、コスト設定、利用者損失の設定などが挙げられることを指摘し、これらのうち、コスト設定、利用者損失などについての影響感度を5割において考察している。

第4章は、実トンネルへ適用した結果を示す。適用したトンネルは、完成後13年が経過しており、完成直後、5年次、10年次の3段階の点検結果を使った。幾何ブラウン運動モデル、ジャンププロセスモデルの2モデルを適用した結果、両モデルともに、点検間隔は2年が望ましく、臨界健全度は無補修の許容限界時であり変状が進行する前に予防保全的に修繕することが最適であるという結論である。一般的に変状の進展が早いトンネルでは、早期の予防保全が望ましいとされており、普遍的なルールを裏付ける結果を得ることができた。また、両モデルとも同様の結論であったことから、本トンネルの健全性はひび割れ主体的であると言える。また、不確実性を考慮した本提案モデルと、従来のLCC算定で用いられている期待値パスによる手法を比較した結果、点検間隔で制御するという離散制御の場合は、臨界健全度を下回るパスがコストを増加させる理由から、不確実性を考慮した確率的パスによる本手法の有効性が確認でき、現実的結果を導くことができることを実証した。

第5章では、戦略的アセットマネジメント手法を提案している。具体的には、パラメトリックスタディを実施し、望ましい戦略を提案するものである。両モデルについて、トレンド、拡散あるいはジャンプダウン量を3種ずつ設定し、ケーススタディを行った。幾何ブラウン運動モデルで結果を示すと、トレンドが大、ボラティリティ（拡散）が大の場合は2年間隔の点検が望ましく、トレンド大、ボラティリティ小の場合は6年間隔が望ましく、小小の場合は9年間隔が望ましいという結論であった。ジャンププロセスモデルの場合も概ね同様の結論となった。また、影響因子に対する考察としては、修繕コストの設定によっては結果が異なるため適正な修繕シナリオが必要であること、および利用者損失の結果に占める割合が大きいことからトンネルの維持管理計画策定において社会損失という概念から修繕を最適化する必要があることを明らかにした。

また、戦略的な維持修繕ルール構築に向け、点検間隔・臨界健全度で最適化する手法の有効性を示し、路線単位でトンネルが複数存在するような場合、各トンネル点検結果から本モデルでLCCを算定することにより、維持・修繕の最適優先順位が決定できることを示した。さらに、変状が部分的に集中しているような場合、集中箇所(point)の点検間隔を密にし、他は点検間隔を拡大するという部分管理手法が有用であることを指摘した。

第6章は本論文における結論と展望をまとめたものである。今後の展望においては、本研究で提案したモデルをアセットマネジメントシステムへ展開し、リアルオプション手法などを踏まえて実務問題へ適用する際の拡張性をその方法について述べている。

## 論文審査の結果の要旨

土木構造物の長期的な存続目的で、アセットマネジメント手法を実際問題に適用するためには、土木構造物の性能規定、劣化に伴う将来状態の予測法、適切なタイミングで補修する意思決定方法の早期確立が必要である。しかし、トンネル構造物に対しては、岩盤材料が非常に複雑であり、構造物の損傷の原因を特定することが困難であるばかりか、劣化過程の推定には相当の不確実性が伴うことになるため、劣化過程の状態予測手法は未だ確立されていない。本研究では、山岳トンネル構造物の構成材料である覆工コンクリートに関する性能を規定し、確率過程を適用し不確実性を考慮した健全度低下モデル

によって将来状態を予測し、ライフサイクルコスト算定により維持補修問題を最適化する手法を提案している。

本論文の主な内容は以下のとおりである。

- (1) トンネル構造物の現状の健全度および将来的な状態を規定するための性能評価法として、点検結果に基づくレーティングを提案し、連続データ化することの重要性を示した。
- (2) トンネル構造物の点検間隔は通常5年程度以上であり、トンネル覆工の打設スパンごとに数時点しかないのが一般的である。このような状態下において、不確実性を考慮した確率過程による健全度低下予測モデルが有効であることを示した。さらに、幾何ブラウン運動によって平均的な挙動を表現する手法、および、ひび割れ発生による不連続な健全度低下をポアソン過程によるジャンププロセスとして表現する手法を確立した。
- (3) トンネル点検の特殊性から臨界健全度に達した時点で補修するのではなく、次の点検時点まで補修を延期するという点検間隔による制御を考慮しているため、不確実性を考慮した確率的パスの結果と期待値パスによる結論に差異が生まれ、かつ確率的パスの方が現実的な戦略に近い結論を得ることができることを明らかにした。
- (4) LCC算定により点検間隔、および臨界健全度を最適化し、維持補修の意思決定モデルに拡張した。また、LCCの構成コストとして迂回や待ちによる利用者の時間損失も考慮しており、これが最適化において非常に重要な要素となることを示した。使用限界に近い段階での修繕は、利用者損失が著しく増加することから、予防保全としての維持管理の付加価値を利用者に説明しつつ、効果的合理的な維持管理を計画的に進める必要があることを指摘した。
- (5) 戦略的な維持修繕ルール構築に向け、点検間隔・臨界健全度で最適化する手法の有効性を示し、路線単位でトンネルが複数存在するような場合、LCCを算定することにより、維持・修繕の最適優先順位が決定できることを示した。さらに、単一トンネル内で変状が部分的に集中しているような場合、集中箇所の点検間隔を密にし、他は点検間隔を拡大するという部分管理手法が有用であることを明らかにした。

以上、要するに本文は、確率過程によるモデル化とライフサイクルコスト算定による点検間隔の最適化という新たなアプローチにより、トンネル構造物における維持補修の最適化手法を提案し、トンネル現場において実証したもので、学術上、実際に寄与するところが少なくない。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。また、平成16年2月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。