

氏 名	まつなが たけし 松 長 剛
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2877 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 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 社 会 基 盤 工 学 専 攻
学位論文題目	ト ン ネル 変 状 の 進 展 予 測 と 対 策 の 合 理 化 に 関 する 研 究

論文調査委員 (主査) 教授 朝倉俊弘 教授 田村 武 教授 木村 亮

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、トンネル変状の進展予測および対策効果の定量的評価を目的として、変状事例の整理および分析、骨組構造解析や有限差分法による数値解析等を主体とした検討を行ったものであり、7章で構成されている。

第1章は緒論であり、我が国におけるトンネルの維持管理に関する実態やその技術的な現状と課題から、本研究の目的や研究内容を定めている。そして、研究において参考とした既往の研究やその知見を整理するとともに、論文における研究の流れやその構成を概説している。

第2章では、従来から経験的な判断に基づいて行われてきた変状対策工設計への定量的評価の導入を目的として、梁ばねモデルによる対策工設計手法について検討している。地山をばね、覆工を梁とした梁ばねモデルを適用した解析では、地圧の増大に伴う発生断面力に応じてひび割れの発生を評価し、ひび割れ発生ごとに構造モデルを変更して計算が繰り返されている。ここで、ひび割れは塑性ヒンジとしてモデル化され、ひび割れが生じるときの断面力・変位とひび割れをピン結合(または回転ばね)に変更して計算したモデルでの断面力・変位の増分を重ね合わせることで変状の進展が表現されている。以上の繰り返し計算を行い、ひび割れ断面が圧縮損傷を生じた時点で覆工に曲げ圧縮破壊が生じたものとして解析が終了されている。この梁ばねモデルでは、想定される対策工を忠実にモデル化して比較解析を行い、補強効果を地圧に対する耐荷力で評価することができる。これにより、従来類似事例を参考として行ってきた対策工設計に定量的な評価を導入することが可能となった。しかしながら、解析で得られる結果が地圧(解析上の荷重)と変位の関係であることから、内空変位速度に基づく経時的な管理の実態に合致しないという課題が残った。そこで、梁ばねモデルの研究で得られた変状の進展予測や対策効果の定量的評価等の知見を生かし、第3章以降では変状進展の時間依存性を考慮した変状対策工の設計法に関する研究が行われている。

第3章では、第2章の検討で課題となった変状進展の時間依存性を評価するため、変状進展の経時変化が測定された計測結果と変状の進展が再現できる数値解析を組み合わせた手法について検討が行われている。ここでは、周辺地山の強度低下による変状進展が想定されるトンネルを対象として、地山劣化モデルを用いた解析手法が適用されている。Mohr-Coulombの降伏条件を用いた地山劣化モデルでは、地山の各要素の強度定数をピーク強度から残留強度に強制的に低減させることで、降伏しているあるいは低減によって降伏した要素の応力を低下させている。これにより、周辺地山には応力の再配分が生じ、周辺地山がトンネル内空側へ変形することでトンネルの経時的な変形挙動が表現されている。解析では低下させた強度定数ごとに内空変位が算定されるため、ここに現場で計測された内空変位と時間の関係を解析結果にフィッティングさせることで、周辺地山の経時的な強度低下特性を設定している。これにより、実務における変状予測、対策工設計で求められている時間の概念の導入が試みられている。解析においては、実トンネルの設計・施工条件をできる限り忠実にモデル化し、限定された情報量から現地の変状状況を再現することを目的として検討が行われている。ここでは、第2章で検討した対策工のモデル化を参考とした対策工モデルによる解析を行い、実務への適用を意識して効果的な工種やその実施時

期に関する比較検討を行った。以上の検討から、本研究の主目的である変状の進展予測、対策工設計を実現するためのツールが整備されている。

第4章では、第3章で検討した変状対策工の設計手法を実トンネルへ適用し、本手法の妥当性について検証されている。ここでは、第2章で検討した対策工のモデル化を参考とした対策工モデルによる比較解析を行い、効果的な工種やその実施時期について検討が行われている。検討事例としては、経年100年を超える老朽化トンネルの事例や盤膨れにより路盤が顕著に変状した事例が抽出されており、さらに、双設トンネルの双設部および交差部の変状状況を評価するために、三次元モデルを用いて変状進展解析が行われている。これら実際の変状トンネルへの予測手法の適用により、本手法の実務への適用性が高いことが確認された。

第5章では、変状予測において重要な地山の強度低下特性について検討が行われている。ここでは、第3章～第4章で検討した限定された情報での変状予測の妥当性を検証する目的で、供用中のトンネルにおいて坑内からの調査ボーリングおよび各種強度試験が行われている。これにより、現地における詳細な情報から解析における強度低下特性を設定し、より精度の高い変状予測の実現が可能となった。また、対策工をモデル化した解析を行い、効果的な工種やその実施時期について検討が可能となった。

第6章では、変状進展の予測手法を総括する目的で、第3章～第4章で検討された限定された情報量による予測、第5章で検討された現地調査による予測に加え、より簡便な手法について検討が行われている。ここでは、代表的な変状トンネルを想定したパラメータ解析、実トンネルのシミュレーション解析を行い、変状要因として支配的な地山強度比と内空変位速度ごとに解析の標準的な入力値が整理されている。これにより、検討の対象となるトンネルの情報量に応じた変状進展の予測手法が提案されている。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果および知見を総括し、今後に向けた課題を述べている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、供用中の山岳トンネルで発生した変状に関して、現状の健全度評価や変状の進展予測、さらに対策工設計の手法を確立する目的で行った研究をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

トンネルの変状予測手法の開発においては、継続的な計測値と地山劣化モデルによる数値解析を組み合わせるという手法により、変状進展の将来予測や対策効果の定量評価、対策時期の検討が可能となった。また、同手法を経年100年以上の老朽トンネルへ適用したが、長期間の継続的な計測データを活用することで、比較的精度よく変状状況を再現することができた。この結果から、これまで変状が問題とならなければ実施されることのない継続的な観察・計測が、合理的な維持管理の実現に非常に重要であることが再確認された。また、路盤の隆起が問題となったトンネルへ本手法を適用したところ、周辺地山の強度低下だけでなく、インバートの施工不良という構造欠陥が変状の進展に大きく影響することが確認され、今後のトンネル建設に向けて有効な提言がなされている。

さらに、上記の変状予測手法の妥当性を検証する目的で、供用中のトンネルでは実施が困難なことから採用事例の少ない坑内からのボーリング調査、強度試験を行っている。これにより、本手法による変状の再現性が高いことが確認され、詳細な調査を採用することで覆工の破壊状況や周辺地盤の劣化状況をより高精度に再現できることが確認されている。

以上より、本論文は、これまで経験的な判断で行われてきた変状トンネルの進展予測や対策工設計の分野へ、計測データと数値解析を活用することで定量的な評価を導入し、その検討手法がより簡便に提案されていることから、学術上、実際上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20年1月30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。