

## 審査の結果の要旨

氏名 土谷 幸彦

本論文は、「青函トンネルの覆工の長期挙動と健全度評価手法に関する研究」と題し、社会の持続的発展が重要テーマとなって行く時代において社会の基本的インフラの維持管理手法について、トンネルを例にとって新しい手法を提案したものである。論文提出者の勤務する鉄道建設・運輸施設整備支援機構は1970年代に、世界最長の海底トンネルである青函トンネルの建設を担当した。そして竣工後も、地震観測を初めとしてトンネル内の湧水量やトンネル構造物の変形などを長期間連続的に計測し続けてきた。この膨大な蓄積データを分析活用して提出者は、これまで陸上トンネルの経験を参考に対症的に実施されてきた維持管理業務に対し、海底トンネルの特徴を考慮した合理的な維持管理手法の構築を行った。以下、論文の内容について説明する。

本論文は七章から構成されている。第一章は序論であり、この研究の始まった背景、これまでの維持管理業務の問題点を説明している。

第二章は既往のトンネルの維持管理のレビューである。陸上トンネルでは過去に、周辺岩盤からの地圧が過大に作用して変状を蒙った例がいくつかある。このようなケースでは、覆工の変形（ひずみや内空変位）の計測が状況把握に有益であり、補修が適切に行われた。海底トンネルとしては関門やノルウェーのフィヨルドトンネルにおいて覆工コンクリートの調査が行われ、大規模な補修が実施された。しかし青函トンネルのように定期的かつ総合的に挙動の計測が続けられている事例は無い。

第三章は、青函トンネルの設計・施工方法と、開通後に続けられてきた維持管理業務の内容とを、説明している。陸上と異なり海底トンネルでは、周辺の地下水量が無限であり、いったん大規模な出水が起こると限界が無く、トンネル全体が水没する危険が高い。そのような危険を回避するため、建設時にトンネル覆工から外へ向かい、トンネル半径Rの三倍の距離まで薬液注入による止水が実施された。また覆工の外側には排水工を設置し、覆工本体には水圧が作用しない構造を採用している。そして維持管理のための挙動計測は、目視に加えて、湧水の量と化学分析、覆工のひずみや地震観測が継続的に行われ、さらに内空断面の測定(トンネル断面の大きさ変化の測定)が繰り返されてきた。現場

の踏査によればトンネルの覆工コンクリートはきわめて良好な状態にあり、何らかの問題発生が差し迫っているとは考えにくい。しかし長期的に安定してトンネルの供用するため、計測データに基づく合理的な維持管理体制の構築が重要、と考えられた。

第四章は、1987年以來長期にわたって計測されてきたデータを分析している。まず湧水量については長期漸減傾向にある。1993年の北海道南西沖地震に際しては一時的に湧水が増加したが、概ね二年以内に従来の水準に戻った。湧水の減少原因としては周辺岩盤の安定化、という可能性もあるが、他方、薬液注入・止水領域の目詰まり、あるいは覆工裏側の排水機能の低下(目詰まり)、という可能性もある。いずれの目詰まりもトンネル本体(覆工)に作用する水圧を増加させ、コンクリートの圧縮や曲げによる変状につながる可能性がある。したがって覆工のひずみや内空変位の計測が重要である。実際、覆工ひずみのデータは過去10年間徐々に増加しつつあるが、長期観測では計測器による出力ドリフトの影響が無視できない。他方、内空変位は施工時の出水箇所を除いて18年間安定しており、覆工ひずみと比較すると長期計測に適している。

第五章は、トンネルと岩盤の挙動を理解するための数値解析を紹介している。湧水の減少理由が薬液注入域の透水性低下(目詰まり)ないしは覆工背面の排水工の目詰まりである、と仮定し、これらの領域の透水係数を減少させ、湧水量やトンネル覆工の応力と変形とを計算した。まず注入域の目詰まりを考慮した解析では、注入域内部の間隙水圧分布は、透水係数の低下にはほとんど影響されない。ただし湧水量が変化することは当然であり、また内空変位も実測に近い値を再現できる。他方、覆工背面の目詰まりを考慮した解析では、目詰まりの進行とともに覆工に作用する水圧が急増する。すなわちトンネル本体にとって危険な状態になりやすい。また、湧水と内空変位の計算値と実測値とをほぼ一致させることも、可能であった。このように二通りの湧水量低下メカニズムを用いて解析を行った結果、いずれによっても実際の状況を再現することができたものの、そのいずれが真実であるかの判断は、それだけでは困難であった。現場の作業坑からボーリングを行い地下水圧を測定したデータと比較すると、近年は地下水圧の変動が無いため、注入域全体の目詰まりが進行している可能性の方がやや高い、と推定される。

さらに第五章では、覆工に生ずる曲げモーメント $M$ と軸力 $N$ を算出している。これらの値を覆工コンクリートの破壊条件(曲げモーメントが $M_0$ )と比較したところ、安全には余裕があることが見出された。これに基づきひび割れ安全指標と呼ばれる維持管理用パラメータ $M/M_0$ を提案している。現況ではひび割れ安全指標は破壊域には程遠いが、今後、覆工背面の目詰まりが進行すると、危険性が増す恐れもある。特に周辺岩盤の剛性が現在での推定より小さい場合に、

特にその可能性がある。

第六章は、以上の成果を踏まえ、海底トンネルの維持管理のあり方の提案を行っている。それによると、トンネルの建設直後から内空変位の測定を始めること、トンネル総延長を区間に区切り、それぞれからの湧水量を計測すること、計測値と数値解析に基づいてひび割れ安全指標を算出し、覆工の状況を推定すること、覆工背面の排水性を良好な状態に保つこと、が重要である。

第七章は結論である。

以上をまとめると本論文は、長期間組織的に計測・蓄積されてきた世界最長の海底トンネルの挙動を分析して安全性の推定を行ったものであり、そこで用いられた手法は今後の海底トンネルの安全性を長い将来にわたって確保する維持管理業務に適用される。また、海底トンネルの長期的挙動を総合的に取りまとめた知見は、過去には存在しなかったものである。このように本論文はトンネル工学および社会基盤施設の維持管理技術の進歩の上で、貢献が大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。