

# 博士論文審査報告書

## 論 文 題 目

### 既設シールドトンネルの 長期変状予測に関する研究

Study on Prediction of Long Term Deformation of  
an Existing Shield Tunnel

申 請 者

|        |        |
|--------|--------|
| 焼田     | 真司     |
| Shinji | YAKITA |

|  |
|--|
|  |
|--|

2014年2月

わが国でシールド工法が都市部のトンネル工事に用いられるようになってから、既に数十年以上が経過し、現在では鉄道をはじめ、多くのライフラインの構築に標準的な工法として適用されている。シールド工法については、近年では既設のシールドトンネルを長期にわたり供用するためのメンテナンス技術の開発が重要な工学的課題となってきた。

長期間の供用において、シールドトンネルには種々の要因により、多岐にわたる変状が発生している。例えば、軟弱な粘性土地盤中に建設されたトンネルでは、建設後、地盤の圧密によって内空変位の増加やセグメントのひび割れが生じたり、海岸部や感潮河川の近傍などに建設されたトンネルでは、漏水や塩害によって材料劣化が生じたりしていることがある。このほか、施工時に既にセグメントのひび割れなどが発生している場合も多い。しかし、各種の要因で生じているひび割れの発生原因を特定することは難しく、ひび割れが生じているトンネルの長期的な変形挙動についても現状では未解明の点が多い。

一方、地下構造物であるトンネルは更新が非常に困難なため、維持管理を適切に行い、延命化を図る必要がある。また、近年、鉄道トンネルでは、維持管理においても性能規定化が進み、使用性や耐久性能に対する関心が高まっている。しかし、ひび割れによる覆工剛性の低下に非線形性を考慮した変形予測やひび割れの進展などについては、十分な知見は蓄積されていない。

地盤の圧密現象に起因するトンネルの長期的な変形挙動を予測するには、地盤とトンネルとの相互作用を評価する有限要素法(FEM)による土水連成解析が有効な手法である。土水連成解析では、地下水位変動の発生範囲などを考慮して広域的な解析モデルが作成でき、地層構成などを表現できるという利点がある。また、ひび割れによる覆工剛性の低下を評価するために、覆工材料の非線形性を考慮した非線形 FEM モデルが適用されている。このような簡便な有限要素法などの数値解析手法を用いて、広域的な地下水位変動とトンネル覆工のひび割れによる剛性低下を同時に考慮したトンネルの長期的な変状を精度よく予測する方法の確立が、維持管理の実務面から求められている。

本研究は、地盤の圧密沈下に起因するシールドトンネルの変形挙動を求め土水連成解析に覆工のひび割れ発生によるリング剛性の低下を簡便に評価できる剛性低下モデルを組み込んだ変状予測解析手法を考案し、トンネル覆工のひび割れと内空変位について、既設シールドトンネルにおける実測結果との比較から手法の妥当性を検証したものである。

本論文は、序論から結論までの7つの章から構成されている。

第1章は序論であり、既設シールドトンネルの長期変状予測に関する研究の必要性、目的および本論文の構成と各章の概要について記述している。

第2章では、シールドトンネル建設後に発生している変状の実態や軟弱粘

性土地盤中のシールドトンネルで変状が発生している事例を整理している。また、シールドトンネルの長期的な変形挙動を予測する方法や有限要素法で材料の非線形性を表現する手法をトンネルに適用している既往の研究例を調査し、施工年代に応じたシールドトンネルのセグメントや二次覆工などに関する事例分析を行い、傾向を把握して問題点を抽出している。

第3章は、軟弱な粘性土地盤に建設された各種の既設シールドトンネルについて実施された変状状況調査の結果を総括している。

この調査は、軟弱な粘性土地盤中に建設されたシールドトンネルを対象として、そこに発生した代表的な変状事例と地下水位変動や地盤沈下などのトンネルが設置されている周辺環境の変化についての文献調査および本研究で解析対象としたトンネルの変状発生状況を詳細に取りまとめたものである。その結果、本研究で対象としたトンネルが位置する地盤は、かつての揚水に伴う広域的な地下水位の低下を経験している地域に存在し、トンネルの建設後に発生したひび割れや内空変位は、主として、これに伴う軟弱粘性土地盤の圧密に起因するものと推測されることを示している。

第4章では、地盤の圧密現象に起因する地盤とトンネルの相互作用を、土水連成解析と覆工材料のひび割れ発生に伴う非線形性を表現できる非線形 FEM モデルとを組みあわせる手法を考案し、第3章で調査対象とした既存のシールドトンネルに対して、この変状シミュレーション手法を適用し、その妥当性を検討している。

本研究で検討対象としたトンネルでは、建設後に発生したひび割れや内空変位の原因は、第3章の調査結果から、周辺地盤の圧密によるものと推定されたので、シールドトンネルを含む軟弱粘性土地盤の圧密沈下に伴う変形挙動を求めるために土水連成解析を実施している。その結果、土水連成解析で得られた内空変位量を非線形 FEM モデルに入力することで、トンネルのクラウン付近の主桁の軸方向に、現場で観測されたひび割れと同様なひび割れが発生しうることを立証し、さらに現場調査では不明であったひび割れの進展過程の推定が可能であることを確認している。

しかしながら、この手法は煩雑である上、内空変位の発生状況を実測結果と合致させるためには、当該地域の地層構成や地下水位の変動状況から想定される  $100\text{kPa}$  を上回る  $150\text{kPa}$  の等分布荷重で圧密を発生させる必要があることが判明し、この原因が、土水連成解析において、ひび割れ発生後の覆工の剛性低下を考慮していないためであることを指摘している。

第5章では、土水連成解析に適用可能な覆工の非線形モデルとして、リング剛性を一様に低下させることで、ひび割れの影響を簡便に表現する手法を実験的に調査している。

実験は、トンネル覆工に相当するコンクリート円管に予めひび割れを生じさせた供試体の一方向に載荷を行うもので、供試体に発生した軸方向ひび割

れ数の増加に伴い，供試体のリング剛性は単調に低下することを確認している．また，コンクリート材料のひび割れ発生を **Drucker-Prager**（ドラーカー-プラガー）の破壊基準を用いて判定するとともに，実験結果から推定したトンネル覆工のひび割れ発生密度を用い，これによりリングの剛性低下を算定する方法を利用して，簡便な有限要素法によるひび割れの発生による剛性低下モデルを考案している．この剛性低下モデルで得られた結果と非線形 FEM モデルを用いた覆工のひび割れ解析結果とを比較し，両手法で得られたひび割れの発生位置や進展状況が整合することを確認している．

第 6 章では，第 5 章で考案した剛性低下モデルを土水連成解析に組み込み，これを調査対象としたトンネルに適用して，その妥当性を検証している．

土水連成解析モデルの地表面に作用させた等分布荷重は，当該地域の地層構成や地下水位の変動から想定が可能な  $100\text{kPa}$  として，ひび割れ発生位置や内空変位を算出している．その結果，建設後 6 年目には，トンネル内面のクラウン部とインバート部およびトンネル外面のスプリングライン付近にひび割れが発生し，現場で観察が可能な内面側のひび割れ発生位置と一致していることを確認している．また，内空変位のうち，圧密の影響が顕著に表れる鉛直方向変位は，収束値のみならず，ひび割れの進展に相当する経時的な変化についても解析値と実測結果が一致することが確認でき，本研究で考案した剛性低下モデルを組み込んだ土水連成解析による変状シミュレーション手法の妥当性を検証している．

第 7 章は，本論文の結論であり，本研究で得られた主要な知見をまとめるとともに，今後の課題について要約している．

以上を要するに，本論文は，地盤の圧密沈下に起因するシールドトンネルの変形挙動を求める土水連成解析に覆工のひび割れ発生によるリング剛性の低下を簡便に評価する剛性低下モデルを組み込んだ変状予測解析手法を考案し，トンネル覆工のひび割れと内空変位について，既設シールドトンネルにおける実測結果との比較から提案した手法の妥当性を検証したものである．この成果は，各種のインフラ地下構造物の維持管理の時代に向けて，その具体的な対策手法を提示するものであり，地盤工学，トンネル工学上の貢献大なるものと判断される．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．

2014 年 2 月

|     |    |         |             |      |
|-----|----|---------|-------------|------|
| 審査員 | 主査 | 早稲田大学教授 | 工学博士(早稲田大学) | 赤木寛一 |
|     | 副査 | 早稲田大学教授 | 工学博士(東京大学)  | 濱田政則 |
|     |    | 早稲田大学教授 | 工学博士(早稲田大学) | 小泉 淳 |