

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

# 博士論文概要

## 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

2013 年 12 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、これまでに非常に多くの研究や技術開発が行われてきたが、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やセグメントのひび割れが生じたり、海岸部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。このうち、圧密による変状は、長期間にわたるものの比較的緩慢に進行することから、ただちに措置が必要になるものではない。しかし、ひび割れが発生したトンネルは、覆工のリング剛性が低下するため、変形がより進行しやすい状態になる。とくに、東京都区部低地のように、かつての地下水のくみ上げによる大きな地下水位変動などで圧密が促進される場合には、トンネルの安全性に影響を及ぼし、状況によっては対策を必要とする場合もある。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。このため、変状が生じているトンネルの補修、補強の意思決定を行うことを目的に、応力の残存余裕を算定するなど、許容応力度法を中心とした研究がこれまで多く実施されている。しかし、ひび割れによる覆工剛性の非線形性を考慮した変形予測やひび割れ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。しかし、計算コストなどの制約から、トンネルは地盤要素のメッシュサイズに合わせ簡素な梁要素などでモデル化した線形弾性体で表現される場合が多い。

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。この非線形 FEM モデルでは、セグメントの形状などを考慮した詳細な解析モデルを用いているが、覆工と地盤との相互作用は線形ばねで簡素にモデル化される場合が多い。このため、土水連成解析で地盤を広域的にモデル化して変形挙動を求める際に、覆工材料のひび割れ進展による非線形挙動を同時に考慮することは膨大な計算時間を要するために

経済的負担が増すとともに、予測精度の観点からも手法の工学的な価値の低下を招く可能性がある。このため、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も求められている。

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。以下に各章の概要を述べる。

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た。

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た。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た。さらに、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た。

第3章では、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の変状状況調査を実施した結果を総括した。

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といった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低下を経験している地域に存在し、トンネル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したものと推測されることを示した。

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評価する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する非線形 FEM モデルを組み合わせた変状シミュレーション手法を第3章で調査対象とした既存のシールドトンネルに適用し、その妥当性を検討した。

本研究で検討対象としたトンネルで、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た。解析にあたっては、揚水による地下水位変動に伴う多層地盤の変形挙動については不明の点が多いので、地表面に等分布荷重を載荷

することで粘性土層に過剰間隙水圧を発生させ、その消散に伴うトンネル内空変位を求めた。次に、ここで得られた内空変位をトンネル覆工解析のための非線形 FEM モデルに入力し、ひび割れの詳細な進展過程を調査した。

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、現場で観測されたひび割れと同様に、クラウン付近の主桁部軸方向に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た。しかし、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変動状況から想定される 100kPa を上回る 150kPa 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た。

第 5 章では、土水連成解析に利用可能な覆工の非線形モデルとして、ひび割れの影響をリング様の剛性低下で簡便に表現する手法を実験的に調査した。

実験では、トンネル覆工に相当するコンクリート円管供試体の一方向載荷試験を実施し、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た。また、コンクリート材料のひび割れ発生を Drucker-Prager (ドロッカー-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たリング剛性低下の算定法を利用した簡便な有限要素法によるひび割れ発生による剛性低下モデルを考案した。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た。

第 6 章では、第 5 章で考案した剛性低下モデルを組み込んだ土水連成解析を調査対象としたトンネルに適用し、その妥当性を検証した。

ここでは、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変動から想定が可能な 100kPa として、ひび割れ発生位置や内空変位を算出した。その結果、建設後 6 年目には、トンネル内面の天端、下端と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、観察が可能な内面側については現場で確認されたひび割れ発生位置と一致していることを確認した。また、内空変位についても、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することができた。

第 7 章は、本論文の結論であり、本研究で考案した三次元有限要素法を利用した簡便な変状シミュレーション手法は、圧密に起因する既設シールドトンネルの長期変状予測が可能で、かつ維持管理の実務で活用できる手法であることを示し、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た。

## 早稲田大学 博士（工学）学位申請 研究業績書

氏名 焼田 真司 印

(2013年11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 論文	
○論文	焼田真司, 仲山貴司, 津野究, 高橋博樹, 小宮一仁, 赤木寛一: 地盤沈下に起因するシールドトンネルの長期変形挙動に関する解析的検討, 土木学会論文集 (地圏工学), Vol.69, No.4, pp.457-468, 2013年11月
○論文	焼田真司, 仲山貴司, 小西真治, 赤木寛一: シールドトンネルのひび割れ進展過程に関する一考察, 土木学会論文集 F1(トンネル工学)特集号, Vol.67 No.3, pp.109-116, 2011年11月
○論文	仲山貴司, 牛田貴士, 焼田真司, 岡野法之: 近年の注入工事例と改良体の強度特性, トンネル工学報告集第21巻, pp.429-434, 2011年11月
○論文	焼田真司, 津野究, 高橋博樹, 小宮一仁, 赤木寛一: 軟弱粘性土地盤の圧密沈下に伴うシールドトンネルの長期変形挙動と土圧, トンネル工学報告集第20巻, pp.329-335, 2010年11月
○論文	村井稔生, 焼田真司, 津野究, 新井泰, 吉川和行: シールドトンネル掘進時の施工時荷重に関する実験的研究, トンネル工学報告集第20巻, pp.293-298, 2010年11月
○論文	<u>Shinji YAKITA</u> : STATE OF AFFAIRS IN JAPANESE RAILWAY SHIELD TUNNEL, Seminar on "Tunnelling Technologies in Japan and Hong Kong", Geotechnical Division The Hong Kong Institution of Engineers ,pp.25-34, Hong Kong ,2010.9
2. 講演	
○講演	木股浩孝, 仲山貴司, 津野究, 焼田真司: 圧密地盤におけるシールド掘削解析の感度分析, 土木学会第67回年次学術講演会, III-116, pp.231-232, 2012年9月
○講演	木股浩孝, 焼田真司, 津野究, 吉川和行: シールドトンネル掘進時の施工時荷重を模擬した覆工模型載荷実験その2, 土木学会第66回年次学術講演会, III-115, pp.229-230, 2011年9月
○講演	焼田真司, 津野究, 高橋博樹, 小宮一仁, 赤木寛一: 軟弱地盤中のシールドトンネルの挙動に関する解析的検討, 土木学会第65回年次学術講演会, III-448, pp.895-896, 2010年9月
○講演	村井稔生, 焼田真司, 津野究, 新井泰, 吉川和行: シールドトンネル掘進時の施工時荷重を模擬した覆工模型載荷実験, 土木学会第65回年次学術講演会, III-444, pp.887-888, 2010年9月
3. その他	
講演	柳川一心, 牛田貴士, 仲山貴司, 津野究, 焼田真司: いびつ形状の開削トンネルにおける地盤ばねの設定方法の検討, 第10回地盤工学会関東支部発表会, 2013年10月
講演	小松治朗, 柳川一心, 仲山貴司, 焼田真司: 大深度立坑に作用する土圧評価法の一考察, 第10回地盤工学会関東支部発表会, 2013年10月
講演	粕谷悠紀, 稲川雄宣, 山本彰, 牛田貴士, 焼田真司: シールド掘削工事を対象とした長尺先受け工法における設計法の提案, 土木学会第68回年次学術講演会, III-277, pp.553-554, 2013年9月
講演	牛田貴士, 仲山貴司, 津野究, 焼田真司: 鉄道開削トンネルの材料劣化に関する事例調査, 土木学会第68回年次学術講演会, III-283, pp.565-566, 2013年9月
講演	牛田貴士, 仲山貴司, 津野究, 焼田真司: 開削トンネルの拡幅工事に伴う側壁開口部のモデル化に関する検討, 土木学会第68回年次学術講演会, III-285, pp.569-570, 2013

## 早稲田大学 博士（工学）学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	年 9 月 野口守, 田中淳寛, 宮寄俊彦, <u>焼田真司</u> , 坂根英之: シールドを用いた場所打ち支保システムにおける一次覆工コンクリートの打設を模擬した大型実験, トンネル工学報告集第 22 巻, pp.75-80, 2012 年 11 月
講演	粕谷悠紀, 稲川雄宣, 三井仁哉, 牛田貴士, <u>焼田真司</u> : 小土被り非開削掘削工事を対象とした長尺先受け工法の補強耐力について, トンネル工学報告集第 22 巻, pp.317-324, 2012 年 11 月
講演	小松治朗, 津野究, 仲山貴司, <u>焼田真司</u> : シールドトンネルセグメント設計における傾向分析, 第 9 回地盤工学会関東支部発表会, 2012 年 10 月
講演	坂田智基, 室谷耕輔, 松下恵梨, 仲山貴司, 牛田貴士, <u>焼田真司</u> : 3 次元シェル要素解析による開削トンネル側壁開口時の挙動に関する一考察(その 2) - 側壁開口部上床版の二方向スラブ近似解法との比較 -, 土木学会第 67 回年次学術講演会, III-088, pp.175-176, 2012 年 9 月
講演	岡野法之, <u>焼田真司</u> , 澤田亮, 仲山貴司, 橋直毅: 鉄道における注入工法の適用事例について, 土木学会第 67 回年次学術講演会, III-270, pp.539-540, 2012 年 9 月
講演	牛田貴士, 仲山貴司, 津野究, <u>焼田真司</u> , 福留和人, 粥川幸司: 地下拡幅工事における躯体接続部に関する実験的検討(その 1), 土木学会第 67 回年次学術講演会, VI-100, pp.199-200, 2012 年 9 月
講演	福留和人, 牛田貴士, 仲山貴司, 津野究, <u>焼田真司</u> , 粥川幸司: 地下拡幅工事における躯体接続部に関する実験的検討(その 2), 土木学会第 67 回年次学術講演会, VI-101, pp.201-202, 2012 年 9 月
講演	小川淳, 野口守, 三上美輝雄, 神田大, 津野究, <u>焼田真司</u> , 粥川幸司: SENS で用いる一次覆工コンクリートの付着試験, 土木学会第 67 回年次学術講演会, VI-178, pp.355-356, 2012 年 9 月
講演	田中淳寛, 三上美輝雄, 神田大, 玉井達毅, 津野究, <u>焼田真司</u> , 水原勝由: SENS におけるライニング挙動, 土木学会第 67 回年次学術講演会, VI-179, pp.357-358, 2012 年 9 月
講演	三上美輝雄, 田中淳寛, 神田大, 玉井達毅, 津野究, <u>焼田真司</u> , 水原勝由: SENS における地山変位挙動, 土木学会第 67 回年次学術講演会, VI-180, pp.359-360, 2012 年 9 月
講演	粕谷悠紀, 山本彰, 稲川雄宣, 牛田貴士, <u>焼田真司</u> : 小土被り非開削掘削工事における長尺先受け工法の開発-補強耐力の三次元解析検証-, 土木学会第 67 回年次学術講演会, VI-336, pp.671-672, 2012 年 9 月
講演	牛田貴士, 仲山貴司, 岡野法之, <u>焼田真司</u> , 吉川和行: 水ガラス系注入材の強度特性, 土木学会第 66 回年次学術講演会, III-020, pp.39-40, 2011 年 9 月
講演	津野究, 村井稔生, <u>焼田真司</u> , 新井泰: 鉄道シールドトンネルを対象とした傾向分析, 土木学会第 65 回年次学術講演会, VI-247, pp.493-494, 2010 年 9 月
講演	千代啓三, 藤崎満, 平峯正六, 棚本英史, <u>焼田真司</u> : コンパクトシールド工法による急曲線掘進実績について, 土木学会第 58 回年次学術講演会, VI-085, pp.169-170, 2003 年 9 月
講演	石徳博行, <u>焼田真司</u> : シールド掘進と設備工事の同時施工および JR 武蔵野線との超近接施工, 日本プロジェクトリサーチ第 45 回シールドトンネル工法施工技術, pp.35-47, 2000 年 11 月
講演	石徳博行, 古谷聡, <u>焼田真司</u> , 山上亨, 増澤伸司: 中間立坑の NOMST 到達-埼玉高速鉄道線における施工報告-, 土木学会第 55 回年次学術講演会, VI-6, 2000 年 9 月

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	石徳博行, 高田秀幸, 阿部茂木, 杉山裕一, 焼田真司: シールドトンネル掘進と並行した導水管敷設の機械化施工, 土木学会第 54 回年次学術講演会, VI-5, pp.10-11, 1999 年 9 月
講演	直塚一博, 木戸義和, 甲田信, 河村良之, 焼田真司: 支障物撤去シールド工法の開発, トンネル工学研究論文・報告集第 8 巻, pp.325-330, 1998 年 11 月
その他	仲山貴司, 焼田真司, 岡野法之, 井浦智実: 注入の設計施工マニュアルの要点, 日本鉄道施設協会誌, pp.43-45, 2011 年 12 月
その他	焼田真司, 小島芳之: 都市部近接施工とその対策 シールドトンネルにおける近接施工対策, 基礎工, pp.31-34, 2009 年 2 月
その他	焼田真司: 現場拝見レポート コンパクトシールド工法の施工, DOBOKU 技士会東京, pp.16-18, 2004 年 11 月
その他	豊田正美, 北野良典, 焼田真司: コンパクトシールド第 1 号工事が完了 東京都下水道三筋 鳥越付近再構築工事, トンネルと地下, pp.33-40, 2003 年 10 月
その他	八尾徳雄, 前田美治, 清水宏, 焼田真司: JR 武蔵野線橋脚部に超近接するシールド 埼玉高速鉄道線 戸塚トンネル工区, トンネルと地下, pp.27-34, 2000 年 4 月
その他	直塚一博, 甲田信, 焼田真司, 河村良之: 支障物撤去シールド工法の開発, 熊谷組技術研究報告第 57 号, pp.91-99, 1998 年 10 月
特許	村井稔生, 焼田真司, 吉川和行, シールドトンネル覆工方法, 特許公開 2012-57399, 2012 年 3 月
特許	焼田真司, 村井稔生, 津野究, コンクリート打設時の内部圧力計測方法及びその装置, 特許公開 2010-37844, 2010 年 2 月
特許	焼田真司, 内管材の布設方法, 特許公開 2007-263310, 2007 年 2 月
特許	小松原修義, 焼田真司, 田中浩和, 守屋洋一, 金崎伸夫, 田中秀樹, 勝沼清, シールド掘進機の発進方法, 特許公開 2003-64982, 2003 年 3 月
特許	細田一樹, 富山泰滋, 勝沼清, 菊池幸雄, 服部公一, 焼田真司, 守屋洋一, 上田尚輝, 金崎伸夫, 田中秀樹, 横田正和, シールド掘進機のセグメント間隙調整装置, 特許公開 2002-295197, 2002 年 10 月
特許	阿部茂木, 杉山裕一, 焼田真司, 山上享, 工事用車両昇降装置及びその使用方法, 特許公開 2000-314300, 2000 年 11 月
特許	甲田信, 木戸義和, 三村友男, 焼田真司, 直塚一博, 密閉型シールド掘進機のカッターヘッド, 特許公開平 11-173074, 1999 年 6 月
特許	甲田信, 木戸義和, 三村友男, 焼田真司, 直塚一博, 密閉型シールド掘進機, 特許公開平 11-173073, 1999 年 6 月
特許	甲田信, 木戸義和, 三村友男, 焼田真司, 直塚一博, 泥水式シールド掘進機における支障物撤去方法, 特許公開平 11-159286, 1999 年 6 月