

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

大深度シールドトンネルにおける施工時荷重
作用時のセグメントの損傷に関する研究

Study on the Damage to the Segments Caused by Load
during Construction of Shield Tunnel in Deep Underground

申 請 者

斉藤	仁
Jin	SAITO

2013 年 9 月

1920年にわが国において初めてシールド工法が採用された以降、数多くのシールド工法によるトンネルが、都市部の鉄道、道路、上下水道、通信用とう道、ガス導管路などのインフラ設備を中心として構築されてきた。電力設備においても、高度成長期を迎えた1960年代より都市部における超高圧地中送電線や火力発電所の燃料となるLNGを輸送するガス導管を収容する設備として、シールド工法によるトンネルが構築されてきた。その結果、都区内における送電線の地中化率は90%を超え、首都圏の電力安定供給を担う重要な電力設備となっている。

近年のシールド工法は長距離化、大深度化する一方で、トンネルの主覆工部材であるセグメントは、その技術革新や経済性の追求から薄肉化、幅広化する傾向が見受けられるようになった。一般に、トンネルが大深度に位置する場合には、周辺地盤は自立性が高いことから、セグメントに作用する土圧は小さくなるものの、一方で水圧が卓越する。また、大深度地下に構築されるトンネルは、地盤それ自体が設計上の工学的基盤面に相当するため、地震による影響はほとんどないものと考えられている。したがって、周辺地盤からトンネルに作用する主たる荷重は水圧となるため、トンネルが円形断面であれば、トンネルの横断面方向に発生する断面力は軸力が主動的になる。その結果として、設計上はセグメントの厚さが薄くでき、鉄筋量も軽減できる場合が多い。

一方で、大深度地下にシールドトンネルを構築する場合は、高い水圧によってジャッキ推力、裏込め注入圧、止水用のシール材の反発力、およびテールシールの拘束力などの施工時荷重が増大することになる。また、トンネルが深くなるとシールドの発進用または到達用の立坑も深くなるため、立坑の構築費用が格段に増加する。立坑の数を減らしてシールドの掘進距離を長くすれば、掘削を高速化することが要求されるため、その施工方法によってもジャッキ推力は大きくなる傾向にある。このように、シールドトンネルが大深度化するにともない、施工時荷重が他の荷重に比べてクリティカルな荷重になることから、施工時荷重に対するセグメントの設計法の確立が重要な位置づけとなってきた。

施工時荷重によるセグメントの損傷には、トンネルの崩壊に至るような断面破壊から、トンネルの耐力や長期にわたる耐久性に影響を与えるような割れや欠け、あるいはひび割れなどがある。わが国にシールド工法が導入された初期からしばらくの間はともかく、近年ではそれらの損傷はほとんど見られなくなったが、シールドトンネルの構築深度が深くなるとともに、再びそれらの損傷の発生が顕在化してきている。これらの損傷はすべて設計の対象とする必要があるが、とくに困難なのは断面破壊を生じるような損傷ではなく、セグメントの割れや欠け、ひび割れなどに対する設計と考えられる。現在までのところ、施工時荷重により断面破壊を生じた例はほとんどなく、実際に発生するのは比較的小さな損傷がほとんどである。これらの損傷がトンネルの耐久性に影響を与えている実例も少なからず存在しているが、小さな損傷は施工時荷重がどのように作用した結果として

発生したのかを特定することが非常に困難であり，既往の研究においても，詳細にこれに言及した事例は極めて少ない．

本研究は，このような状況を背景として，大深度地下に構築されるシールドトンネルにおいて，その覆工部材に鉄筋コンクリート製セグメントを用いた場合を対象に，実際の現場におけるセグメントの挙動の計測，およびセグメントの組立てと掘進とを模擬した三次元 **FEM** 解析から，トンネルの施工時に発生するセグメントの損傷の原因を明らかにするとともに，**K**セグメントの形状，シールドジャッキの作用パターン，およびトンネル半径方向あるいは円周方向の拘束効果などをパラメータとした三次元 **FEM** 解析により，セグメントの損傷を抑制する具体的な方策を提案したものである．

本論文は 6 章から構成されている．各章の概要は以下に示すとおりである．

第 1 章は序論である．ここでは，まず，シールド工法の歴史，および電力設備としてのシールドトンネルの役割を述べ，つぎに，近年増えつつある大深度トンネルにおける施工時のセグメントの設計上の課題ならびに，既往の研究の動向を整理し，本研究の目的と本論文の構成を記述した．

第 2 章は現場におけるセグメントの計測から確認できた，セグメントの損傷の種類と原因を述べた章である．セグメントの計測を実施した工事は，東京電力(株)の千葉県富津火力発電所 LNG 基地と神奈川県東扇島火力発電所 LNG 基地との間を，東京湾の海底下で連係したシールドトンネル工事である．トンネルの平面線形はほぼ直線であるが，縦断線形は全線の約 70%が海面下 50m 以深に位置することから，代表的な大深度のシールドトンネル工事であった．本工事では，施工時に **K**セグメントおよびそれに接する **B**セグメントに割れや欠け，あるいはひび割れが発生する確率が高いことが想定されたため，まず，現場におけるセグメントの挙動を詳細に観察し，その挙動と損傷との関係を把握した．その結果，セグメントの組立てにともなうシールドジャッキの押し引きにより，**K**セグメントの継手には顕著な目開きや目違いが発生することがわかった．また，それらによって割れや欠け，あるいはひび割れが発生する場合があることを把握した．そこで，つぎに，**K**セグメントの挙動を定量的に把握することを目的に，**K**セグメントを中心とした目開き量および目違い量の計測を実施した．その結果，セグメントリングが精度よく組み立てられたとしても，それが地山からの拘束を受けるまでの間は，つぎのリングの組立ての際のシールドジャッキの押し引きにより，**K**セグメントが最大 3mm 程度の微小な動きを繰り返すことがわかった．とくに，組み立てられた **K**セグメントからシールドジャッキが引き戻されると，**K**セグメントは切羽側に押し出され，かつ切羽側で隣接する **B**セグメントに対してより大きく内空側に変位することがわかった．この動きの過程において，**K**セグメントの鋭角部の接触やつぎのリングとの間に支点が発生するため，割れや欠け，あるいは

ひび割れなどの損傷が生じる可能性があることを示した。

第3章は、前章で述べた工事の現場条件を模擬して、セグメントの組立てとシールドの掘進過程をシミュレートし、セグメントの損傷の可能性とその原因について、三次元シェルばねモデル解析法を用いて詳細に検討した章である。ここでは、まず、解析モデルを設定するうえでの解析範囲、解析ステップ、作用荷重、構造モデル、および境界条件について詳述した。つぎに、解析結果として得られる応力状態や変形状態を解析ステップごとに分析することで、損傷を生じる可能性がある施工ステップを抽出するとともに、抽出された施工ステップにおいては、**K**セグメントの形状、継手の締結力やその剛性などに加えて、施工条件、とくに**K**セグメントの組立て位置、シールドジャッキの配置とその押し引き、テールシールドの位置や剛性などが組み合わさることで、損傷を生じる可能性があることを示した。

第4章は、**K**セグメントの形状をパラメータとして、セグメントの組立てとシールドの掘進過程の三次元シェルばねモデル解析法を用いた検討を行い、その結果をもとに、**K**セグメントの形状に着目した損傷の抑制方策について述べた章である。すなわち、**K**セグメントの弧長や挿入角の大きさが与えるセグメントの損傷に対する影響は、挿入角の大きさが主要因であること、さらに、挿入角の大きさは8度程度以下にすることが、セグメントの損傷の抑制には効果が高いことが解析の結果からわかった。これにより、シールドジャッキの推力によって生じるトンネル円周方向の引張応力度を、コンクリートのポアソン比により生じる引張応力度程度に制限することができれば、ひび割れを抑制することが可能になること、設計時にはこれを照査することが可能になることを示した。

第5章は、シールドジャッキの作用パターンやトンネルの半径方向および円周方向の拘束効果をパラメータとし、前章と同様に三次元シェルばねモデル解析法を用いて、セグメントやシールドマシンの設計条件および施工条件に着目した損傷の抑制方策について述べた章である。すなわち、セグメントの組立て時に、セグメントに損傷を与える可能性が高いジャッキパターンが存在すること、このようなジャッキパターンを避けるような施工計画を立案することが重要になることを示した。また、トンネル半径方向あるいは円周方向の拘束効果が、セグメントの損傷の抑制に高い効果を発揮することを示し、セグメント継手による拘束のみならず、セグメントの外側からトンネル円周方向に軸圧縮力を発生させるような施工上の工夫が、状況に応じて必要になることを示した。

第6章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の研究の課題についても言及した。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 齊藤 仁 印

(2013年 7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	大深度シールドトンネルにおける施工時荷重作用時に発生するセグメントの損傷の原因，土木学会論文集 F Vol. 63 No. 2，2007 年 6 月， <u>齊藤仁</u> ，黒崎秀，高橋晃，竹内友章，小泉淳
○ 論文	大深度シールドトンネルにおける施工時荷重作用時のセグメントの損傷抑制策に関する提案，土木学会論文集 F Vol. 64 No. 2，2008 年 6 月， <u>齊藤仁</u> ，黒崎秀，高橋晃，竹内友章，小泉淳
論文	シールド掘進による地盤の剛性低下と作用土圧，トンネル工学研究論文・報告集 Vol. 12，2002 年 12 月， <u>齊藤仁</u> ，綿引秀夫，前島俊雄，久保賀也，宇野晴彦
2. 報告	
○ 報告	施工時荷重作用時のセグメント挙動について，トンネル工学報告集 第 15 巻，2005 年 12 月， <u>齊藤仁</u> ，中島崇，高橋晃，竹内友章，白井伸一
○ 報告	施工時荷重作用時の RC セグメントへの影響について，トンネル工学報告集 第 16 巻，2006 年 11 月，竹内友章，高橋晃， <u>齊藤仁</u> ，中川雅由，須田悦弘
報告	大深度ニューマチックケーソンの施工実績，電力土木，2012 年 7 月， <u>齊藤仁</u> ，白鳥光雄，松永浩
報告	シールドセグメントにおける中位の粘性土への緩み土圧適用拡大による合理的設計，トンネル工学報告集 第 20 巻，2010 年 11 月，山根謙二，高瀬正司， <u>齊藤仁</u> ，松永浩
報告	東京湾横断の 18km 海底シールドトンネルはこうして完成した！－東西連係ガス導管プロジェクトのシールドトンネル技術－，土木学会誌 92 巻 2 号，2007 年 2 月，黒崎秀， <u>齊藤仁</u>
3. その他	
講演	東京湾海底下七号地層におけるセグメントの荷重計測結果について，土木学会年次学術講演会概要集第 6 部 Vol. 60，2005 年 9 月， <u>齊藤仁</u> ，中島崇，竹林基，白井伸一
講演	都市トンネルの非線形解析手法に関する検討，土木学会年次学術講演会講演概要集第 6 部 Vol. 59，2004 年 9 月，高橋晃，竹内友章，久保賀也， <u>齊藤仁</u> ，安部明夫
講演	シールドトンネルにおける掘進組立同時施工の実用化，第 10 回ロボットシンポジウム論文集，2004 年 9 月，佐藤東洋司，金森研二， <u>齊藤仁</u> ，神崎正

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	巻き厚を縮小した二次覆工の材料選定に関する検討(その 1. 充填性確認試験), 土木学会年次学術講演会講演概要集第 6 部 Vol. 54, 1999 年 9 月, <u>斉藤仁</u> , 福沢勇, 須田嘉彦, 藍沢博高
著書	シールドトンネルを対象とした性能照査型設計法のガイドライン, (社)日本トンネル技術協会, 2003 年 6 月