

早稲田大学大学院創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

小土被り条件下における超近接したシールドトンネルの
施工時挙動とその設計法に関する研究

Study on the Construction Behavior and the Design
Method of Tunnels Located Closely with Shallow
Overburden

申請者

寺田	雄一郎
Yuichiro	TERADA

2018年2月

京王電鉄株式会社は、「開かずの踏切」などの課題の解消を目的として、東京都、調布市と協力し、2003年度より調布駅付近連続立体交差事業を行った。事業は2014年度に完了し、柴崎駅から西調布駅間の京王線2.8kmと、調布駅から京王多摩川駅間の相模原線0.9kmが地下化されるとともに、国領駅、布田駅、調布駅の地下駅が施工された。これらのうち、非開削トンネル部分にはシールド工法が採用されたが、シールドトンネル区間はほぼ全線にわたり営業線の直下を小土被りで掘進するという非常に難易度の高い工事であり、また、事業範囲の制約から相互のシールドトンネルの離隔距離が極めて小さい超近接した条件下で計画されたものであった。

営業線の直下の小土被り条件下のシールド工事は、これまでも数多く施工されており、設計段階における地盤の変状予測を行って必要な対策工の検討がされてきた。設計段階における地盤変状の予測手法としては、応力解放率を用いたFEM解析による方法が一般的であるが、応力解放率は類似の施工事例をもとにして設定を行い、必要な対策工を検討しているのが現状である。

一方、併設シールドトンネル（以下、併設トンネルと略称する）の工事は、地盤条件にもよるが、一般に併設トンネル間の離隔距離が1.0D（Dはトンネルの外径）以上であれば、その相互の影響は小さく無視できるが、1.0D以内では十分な検討が必要であり、とくに、0.5D以下であれば詳細な検討が必要になるとされている。併設トンネルの影響は、先行して施工されるトンネル（以下、先行トンネルと呼ぶ）と、その後から施工されるトンネル（以下、後行トンネルと呼ぶ）の相互干渉による地盤のゆるみや後行トンネルの施工時荷重により生じるものである。開放式シールド工法では地盤のゆるみによる影響が大きく、その影響を先行トンネルに作用させる鉛直土圧の増加などによって評価していたが、密閉式シールド工法の採用がほとんどを占める現在では、後行トンネルの施工時荷重の影響が支配的になってきている。このため、施工ステップを考慮したFEM解析などによって先行トンネルへの影響を評価する事例が増えているが、その検討手法は十分に確立されているとは言えない現状にある。

本論文は、超近接した2本のトンネルを、小土被り下で構築する際の課題を整理し、それを解決するために行った各種の検討と実工事により得られた地盤やトンネルの挙動の計測結果をもとに、小土被り下で超近接した併設トンネルの施工方法やその相互干渉の影響の度合いを予測する手法について提案したものである。

本論文に審査にあたっては、2017年11月9日に審査員予定者3名による予備審査を実施し、専攻内縦覧に付してよいとの判定を受けた。その後2週間にわたり教室内の縦覧を行った。12月7日に専攻内の受理申請が認められ、12月21日に開催された創造理工学研究科の運営委員会で本論文が受理され

た。公聴会は2018年1月16日に開催され、専攻科主任をはじめ審査委員3名、関係者10数名が出席し、研究内容の説明および質疑応答が行われた。申請者は質疑に対して明確かつ適切な回答を行い、研究内容に関する深い知識と関連分野に対する十分な学識および能力を有していることが示された。なお、研究倫理の受講は完了しており、本論文の電子的類似判定ツールによる確認も行って、問題がないことを確認している。

本論文は5章より構成されている。以下にはその概要を述べる。

第1章は序論であり、本研究の背景、小土被り下のシールドトンネル（以下、小土被りトンネルと略称する）および併設トンネルに関する既往の研究を述べ、さらに本研究の目的を述べている。

第2章は、小土被りトンネルおよび超近接した併設トンネルに関する課題について、工事の施工前に実施した検討内容を述べた章である。小土被りトンネルに関する課題の主なものは、地盤沈下の状況の把握と切羽管理の方法であり、前者に関しては、地盤沈下の予測解析を行い、その結果を用いて計測管理の方法を検討し計測計画を立て、また、後者に関しては、シールド機の仕様およびチャンバー内の土砂の塑性流動化や切羽圧力の管理方法について検討を加えている。一方、近接シールドに関する課題は、後行トンネルが、先行トンネルに与える影響の解明である。この課題に関しては、先行トンネルのセグメントリングに発生する変形や付加的な断面力の計測位置と計測方法を検討するとともに、あらかじめFEM解析によりその影響を予測している。

第3章は、実施工時の地盤沈下と切羽の安定管理について、得られた計測結果に考察を加えるとともに、実施した各種の管理方法の妥当性を検証した章である。ここでは、まず、地盤の変位量の計測結果に対して、FEMによる逆解析を行い、応力解放率を算出している。結果として、トンネル相互の併設状態により応力解放率が異なり、トンネル相互が斜めに併設される場合には、両方のトンネルの応力解放率がほぼ同じになり、トンネル相互が水平に併設される場合には、後行トンネルにおける応力解放率が大きくなることを指摘している。つぎに、施工時の添加材の注入率の実績から、選定した添加材とその配合が妥当であったこと、および塑性流動性の管理方法が妥当であったことを確認している。また、チャンバー内の掘削土砂の塑性流動性の管理状況、および切羽圧力の管理状況から、先行トンネルによる地盤のゆるみによって後行トンネルの予備圧が大きくなること、およびその影響は併設トンネル相互の位置関係により異なることを指摘し、結果として、後行トンネルを施工する際には、トンネル相互の位置関係に応じた先行トンネルの影響を適切に考慮して予備圧を設定する必要があることを示している。

第4章は、先行トンネルで計測された結果をもとに、併設トンネルの影響を考慮できる設計手法を提案し、その妥当性を検証した章である。まず、計

測結果から，後行トンネルが先行トンネルに与える影響は，後行トンネルの切羽圧力や裏込め注入圧力が支配的であること，先行トンネルは後行トンネルが併進する部分で局所的な影響を受けること，後行トンネルの切羽圧力は先行トンネルの縦断方向に伝達されることなどを指摘している．つぎに，併設トンネルの位置関係の異なる3断面を取り上げ，計測結果をもとにFEMによる逆解析を実施して，後行トンネルの施工時荷重が先行トンネルの縦断方向に与える影響を検討している．この逆解析では，後行トンネルによる施工時荷重が3次元的に分散することを考慮し，先行トンネルに仮想した縦断方向の分散ばねを設けて，施工時荷重が先行トンネルの縦断方向に伝達される挙動を表現できる簡易なモデルを提案している．また，先行トンネルに作用させる施工時荷重はトンネル相互の離隔距離によって異なることから，近接係数という概念を導入して数値実験を行い，近接係数と併設トンネルの離隔距離との関係を求めて，離隔距離をトンネル外径で除した外径比と施工段階ごとの近接係数との関係を表す近似式を提案している．一方また，トンネルの横断方向の計算には「はりばねモデル」を適用し，近接施工の影響を定量的に考慮できるような施工時荷重として，発生する地盤応力の合計とほぼ等しくなるような三角形分布の荷重を用い，トンネル横断方向の「はりばねモデル」に適用する近接係数を算出して，縦断方向と同様に近接係数と外径比との関係を表す近似式を提案している．

第5章は，本研究で得られた知見をまとめるとともに，今後の展望について述べた章である．

以上を要するに，本研究は小土被りでかつ非常に近接した2本のシールドトンネルに発生する施工時の影響を，実現場における各種の計測結果をもとに明らかにし，このようなシールドトンネルを計画する場合の検討手法および設計手法を提案したものであり，その成果はトンネル工学の発展に大いに寄与するものである．よって博士（工学）の学位論文として価値あるものと認められる．

2018年2月

審査員

主査 早稲田大学 教授 工学博士（早稲田大学） 小泉 淳

年 月 日

副査 早稲田大学 教授 工学博士（東京工業大学） 清宮 理

年 月 日

早稲田大学 教授 工学博士（早稲田大学） 赤木 寛一

年 月 日