

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

道路シールドトンネルにおける併設トンネルの三次元離隔変化を考慮した影響評価に関する研究

Study on the evaluation of twin tunnelling effects with 3-D clearance variations in highway shield tunnels

申請者

遠藤 啓一郎

Keiichiro ENDO

2022年7月

近年新たに構築される道路トンネルでは、地上への影響を考慮してシールド工法が多く採用されている。一般に道路シールドトンネルでは、複数の車線を必要とするため直径 10m 以上の大断面トンネルとなることや出入口施設を必要とすることから、地盤および周辺構造物に対して大きな影響を与えることになる。首都高速道路では、中央環状新宿線の建設時からシールド工法を採用しており、これまでの施工においても地下鉄等の重要なインフラ地下構造物と近接することが多くあり、事前に影響を把握したうえで必要な対策を講じてきている。また、近年においては、首都高速神奈川 7 号横浜北線の馬場出入口において、急曲線および急勾配となる出入口にシールド工法を採用し、新たに計画している高速都心環状線日本橋区間においても、既設の地下構造物を避けつつ、複雑な道路線形でシールド工法を採用する予定である。

このような背景から、本論文は前述の特殊な線形を有する馬場出入口のシールドトンネル掘進事例をもとに、地上から発進する新設の出入口トンネルと既設の本線シールドトンネルとの離隔が、水平面および縦断面内で三次元的に同時に変化すること（以下、併設トンネルの三次元離隔変化）に着目し、新設シールドトンネルが既設シールドトンネルに対して及ぼす影響の簡便な評価方法について研究したものである。具体的には、馬場出入口シールドトンネルの掘進に伴う既設の本線シールドトンネルの変位計測結果をもとに、併設トンネルの三次元離隔変化を踏まえた FEM 解析による掘進影響の再現を実施している。さらに、三次元 FEM 解析による再現結果と馬場出入口トンネルの施工前に実施した二次元はり・ばねモデルを用いた解析と現場計測結果との比較に基づいて、現場施工前に実施可能な簡便な近接影響検討手法について論じたものである。

本論文は、これらの内容を論じた序論から結論までの 6 章で構成されており、以下に審査のプロセスと各章の概要と審査結果を述べる。

審査にあたっては、2022 年 4 月 7 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旨の判定を得た。4 月 7 日から 7 日間の建設工学専攻における縦覧の後、4 月 14 日の専攻会議で博士論文受理申請が承認され、5 月 19 日の創造理工学研究科運営委員会で論文が受理された。6 月 30 日に公聴会を開催するとともに、4 科目の学識確認を実施した。研究倫理については受理前に申請者が研究倫理科目を受講するとともに、論文の剽窃・盗用チェックを実施して問題のないことを確認した。

第 1 章の序論では、シールド工法の施工過程を考慮した FEM 解析手法および併設トンネルの影響評価に関する既往の研究をもとに、併設トンネルの三次元離隔変化を有するトンネルの近接影響に対する評価方法の必要性と目的を述べ、本研究の目的を達成するために選定した首都高速道路の馬場出入口工事について概説している。

第 2 章では、近接施工全般と本研究の対象となる新設トンネル構築が既設構造物に及ぼす近接影響の考え方を要約し、さらに首都高速道路における併

設トンネルの近接影響の検討手法について、検討方針から馬場出入口トンネルにおいても適用された併設トンネルの近接影響を踏まえた設計手法をとりまとめ、特殊な線形に対する検討の必要性を指摘している。

第3章では、首都高速道路の馬場出入口トンネルを対象として、施工前に検討された新設の出入口トンネルが既設の本線トンネルに及ぼす影響に関する二次元FEMとはり・ばねモデルを用いた解析結果および事前検討を踏まえた施工内容について述べ、それらの結果をもとに馬場出入口トンネルにおける事前検討をもとに採用された施工時の対策に対する評価を総括している。

この検討結果をもとに、複雑な線形を有する新設のシールドトンネルの掘進による近接構造物に対する影響検討にあたっては、適切に影響を評価するためにもより詳細な三次元FEM解析が必要であることを指摘している。

第4章では、第3章で指摘された課題を解決する目的で、馬場出入口トンネルの施工に伴う既設の本線シールドトンネルの変位と地盤変状に関するFEM解析と現場計測結果との比較をもとに併設トンネルの三次元離隔変化の影響を考察している。なお解析では、馬場出入口トンネルの特徴である複雑なシールド線形を実現するために必要とされるシールドトンネルの施工過程を適切に設定することが現場計測結果を再現するために不可欠であることを前提条件とした。

この前提条件に基づいて、併設トンネルの三次元離隔変化による影響を適切に表現するために、FEM解析におけるシールド機のテール背後でセグメント覆工外周面と掘削地盤面に生じる物理的な空隙を模擬するギャップ要素を導入している。ギャップ要素の導入にあたっては、新設シールドトンネルの施工過程に係る以下の3項目に着目することで、併設トンネルの三次元離隔変化による掘進影響を再現している。

- (1)急曲線および急勾配の線形による影響
- (2)裏込め注入圧による影響
- (3)裏込め注入量による影響

以上のギャップ要素の影響項目を反映した三次元FEM解析の結果と現場計測結果を比較することで、新設のシールドトンネルの掘進による近接構造物に対する影響検討にあたっては併設トンネルの三次元離隔変化の影響を考慮したFEM解析が不可欠であることを立証している。

第5章では、第3章における二次元はり・ばねモデルを用いた解析結果と第4章で得られた併設トンネルの三次元離隔変化の影響を考慮したFEM解析の結果に基づいて、特殊な線形を有する併設トンネルの施工前の近接影響検討手法の妥当性を評価し、その成果を下記のように要約している。

(1)併設トンネルの三次元離隔変化の影響を考慮した三次元FEM解析においては、実施工結果に対応した新設シールドトンネルが近接するまでの影響を適切に再現することが可能である。

(2)二次元はり・ばね解析による影響評価検討手法においては、新設シールド

ドトンネルの掘進による既設シールドトンネルの変位を過大に評価するが、新設シールド通過後の既設トンネルの変位については適切な安全率を有した評価法と判断できる。

(3)併設トンネルの三次元離隔変化による掘進の影響は、トンネルの水平および鉛直離隔距離、純離隔距離に応じて変化することから、それぞれの離隔距離に対する影響確認が必要である。

以上の検討成果をふまえ、馬場出入口工事の全体の施工実績と解析で得られた新設シールドの掘進による本線トンネルの直径変化量を本線トンネル直径で除した直径変化率を、離隔距離を新設シールドの直径で除した値に対してプロットした図は、他の同種の併設トンネル工事で適用可能な無次元表示された管理図として利用可能であると高く評価できる。

第6章では、各章で述べた結果・知見を取りまとめて結論として示すとともに、今後の展開として三次元FEM解析に導入したギャップ要素に改良を施し、解析結果を第5章で考案した管理図に反映することにより、施工前の新設シールドトンネル掘進における併設シールドトンネルに与える影響の適切な検討が可能となることを提示した。

以上を要するに、本論文は馬場出入口のシールドトンネル掘進事例をもとに、併設トンネルの三次元離隔変化に着目して、FEM解析を用いて新設シールドトンネルが既設シールドトンネルに対して及ぼす影響の簡便な評価方法について研究したものである。その結果、新設シールドの掘進による本線トンネルの直径変化率を、離隔距離を新設シールドの直径で除した値に対してプロットした図は、他の同種の併設トンネル工事で適用可能な管理図として高く評価でき、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。

2022年7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 博士(工学)早稲田大学 小峯 秀雄

副査 早稲田大学教授 博士(工学)早稲田大学 岩波 基