

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

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5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、掘削による用地の制約条件が発生したり、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、全体の路線延長の約 1 割をシールド工法にて構築している。首都高速道路は、首都圏の都市内に構築されるため、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た。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。

一般にシールドトンネルの掘進による影響を施工前に確認する場合、二次元の有限要素法解析による検討が多く用いられている。しかし、都市内の既設の地下構造物の存在や新たに構築するトンネル構造物の特異性にともない、三次元の有限要素法解析（以下、三次元 FEM 解析）を用いた検討が必要な事例も増えてきている。従来、複雑な線形を有するトンネル掘進による影響の三次元 FEM 解析においてはモデル化などが困難であったことから、検討実績は多くない。このために、これまでの道路トンネル工事の出入口などを構築するにあたっては、複雑な線形を避けて平面および縦断線形を大きく変化することなく併設させつつ、非開削による切掘げ工法を採用していることが多い。しかしながら、地上への影響を考慮した大深度のトンネル構築が増加していることに加えて、トンネルと接続する出入口は、地上の制約条件により線形が水平面および縦断面内で三次元的に変化しなければならない場合があり、特殊な条件における掘進影響を把握する手法が求められている。

このような背景から、本論文で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、三次元 FEM 解析を用いて新設シールドトンネルを既設シールドトンネルに対して複雑な線形を有して掘進した場合の影響の評価方法について研究した。

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三次元 FEM 解析による掘進影響の再現を実施した。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章で構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第1章の序論では、シールド工法を対象とした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和目的を述べ、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た。

第2章では、近接施工全般における一般的な影響および本研究の対象となる新設する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た。

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各出入口トンネルの概要と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た。それらの結果を踏まえ、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た。

ここでは新設する出入口シールドトンネルが既設の本線シールドトンネルに対して及ぼす影響を、シールド機掘進時と通過後の2つのパターンに分けて新設シールド掘進に伴う本線シールドトンネルの最大変位量を事前にそれぞれ算出している。事前検討を踏まえて新設シールドの掘進管理を含む必要な対策を講じることにより安全に施工を終えたが、特に事前検討では新設シールド掘進時の本線シールドトンネルに対する影響が過大に算出されており、二次元はり・ばねモデルによる算出の課題を確認した。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た。

第4章では、第3章で指摘された課題を解決する目的で、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解析を用いて、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現場計測結果との比較をもとに検証を行った。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、三次元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た。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することとした。

- (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させた三次元 FEM 解析の結果と現場計測結果を比較することで、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 解析が不可欠であることを立証した。

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三次元 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た。得られた成果は下記のとおりである。

- (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位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。この無次元量の関係図は、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利用可能であると考えられる。

第6章では、各章で述べた結果・知見を取りまとめ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章で考案した無次元表示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。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 遠藤 啓一郎

印

(2022年 5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	三次元有限要素法解析による既設トンネルへのシールド掘進の影響評価，トンネル工学報告集，第31巻，II-5，p.1-8，2021. <u>遠藤啓一郎</u> ，赤木寛一，Alireza AFSHANI，土橋浩
○論文	離隔が三次元的に変化する併設トンネルにおける新設シールド掘進の影響評価，土木学会論文集F1（トンネル工学），Vol.77，No.1，p.60-75，2021. <u>遠藤啓一郎</u> ，赤木寛一，Alireza AFSHANI，土橋浩，Grant HASAN
論文	Interaction between a newly excavated underground ramp and deep existing tunnels. In Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (pp. 493-500). CRC Press, 2021. Afshani, A., Hassan, G., Akagi, H. and <u>Endou, K.</u>
論文	急勾配・急曲線・小土被りにおける大断面シールドの掘進管理，トンネル工学報告集，第25巻，II-5，p.1-8，2015. 副島直史，岸田政彦， <u>遠藤啓一郎</u> ，西丸和範，小野塚直紘
論文	シールドトンネルにおける現場打ち耐火コンクリートの適用検討，トンネル工学報告集，第24巻，II-10，p.1-6，2014. 春日清志，岸田政彦， <u>遠藤啓一郎</u> ，藤井剛，屋代勉，川西西貴士
論文	地中拡幅による分合流部の施工—横浜環状北線シールドトンネル工事—，土木施工，2014 May, Vol.55, No.5, p.14-17, 2014. <u>遠藤啓一郎</u> ，松原健太，藤井剛
論文	供用下の道路シールドトンネルを切開いて合流部を構築—SJ14工区（1）EF連結路トンネル工事—，土木施工，2013 July, Vol.54, No.8, p.16-19, 2013. 安井雅士， <u>遠藤啓一郎</u> ，住野英明，半田陽介
2. 講演	
講演	横浜環状北線馬場出入口工事における送電鉄塔下のシールド掘進報告，土木学会第71回年次学術講演会，VI-816，2016. 9. 溝口孝夫， <u>遠藤啓一郎</u> ，西田充，田邊健太，安井克豊，安部太紀
講演	急曲線シールドにおける掘進状況可視化システムの開発，土木学会第71回年次学術講演会，VI-817，2016. 9. 副島直史， <u>遠藤啓一郎</u> ，西丸和範，安井克豊，渡邊裕輝月
講演	地中拡幅による分合流部の施工概要，第31回日本道路会議，6015，2015. 10. <u>遠藤啓一郎</u> ，加藤瑞穂

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 遠藤 啓一郎

印

(2022年 5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）
講演	横浜環状北線馬場ランプシールドにおける地盤変状対策，土木学会第70回年次学術講演会，IV-080，2015. 9. 溝口孝夫， <u>遠藤啓一郎</u> ，塩出健二，朴仁涉，安井克豊，渡邊裕輝
講演	横浜環状北線シールドトンネルの掘進管理，土木学会第69回年次学術講演会，VI-635，2014. 9. 溝口孝夫， <u>遠藤啓一郎</u> ，松原健太
3. その他	
(論文)	AIを活用した構造物点検・補修支援システムの開発：AIによる効率的なインフラ構造物の維持管理を目指して，検査技術，2021年1月号，Vol.26, p.6-11, 2021. 永田佳文， <u>遠藤啓一郎</u> ，上原 和樹
(論文)	AIを活用した点検・補修支援システムの開発，橋梁と基礎，2020年3月号，Vol.54, No.6, p.14-17, 2020. 永田佳文， <u>遠藤啓一郎</u> ，上原和樹
(論文)	首都高速3号線渋谷入口(下り)の設計概要：(改)渋谷入口(下り)新設工事，土木施工，2020 January, Vol.61, No.1, p.163-166, 2020. <u>遠藤啓一郎</u> ，前田純輝，平田英樹，大村寛和
(論文)	1964から2020へ、首都高が担う要の役割：東品川・鮫洲、横浜環状北西線、景観向上の取組（特集 東京2020大会に向けた取組）--（大会成功に不可欠なインフラの整備），土木施工，2019 October, Vol.60, No.10, p.43-48, 2019. 篠井隆志，吉田大二郎， <u>遠藤啓一郎</u>
(論文)	ジャンクション屋上公園の設計施工（通巻500号記念号）--（特集 中央環状線 山手トンネル((B) 湾岸線～(3)渋谷線)の開通），基礎工，2015年3月号，Vol.43, p.96-99, 2015. 松月基将，佐藤全彦， <u>遠藤啓一郎</u> ，久保田繁樹，道浦祐
(講演)	首都高速3号渋谷線渋谷入口(下り)新設における料金所張出部の構造，土木学会第75回年次学術講演会，VI-354，2020. 8. 前田純輝， <u>遠藤啓一郎</u> ，五ノ井淳，大村寛和，平田英樹
(講演)	大橋“グリーン”JCT屋上公園の設計・施工，第30回日本道路会議，1028，2013. 10. <u>遠藤啓一郎</u> ，三浦正幸，加藤瑞穂
(特許)	内田雅隆，高橋悠，天野幹久，石田征男，早川隆之，岡田明也，田場祐道，藤田仁，武久弦，石田高啓， <u>遠藤啓一郎</u> ：コンクリート及びその製造方法，特願2020-058579，2022

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 遠藤 啓一郎 印

(2022年 5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）
(特許)	年3月 遠藤啓一郎，永田佳文，小杉剛史，村川正宏，坂無英徳，野里博和，上原和樹，宮根俊樹：構造物の点検・補修支援システム，特願2018-216837，2018年11月

以上