

# 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

遠藤 啓一郎<sup>1</sup>・赤木 寛一<sup>2</sup>・Alireza AFSHANI<sup>3</sup>・土橋 浩<sup>4</sup>・Grant HASAN<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 首都高速道路株式会社 更新・建設局 (〒101-0054 東京都千代田区神田錦町2-2-1)

E-mail: k.endou164@shutoko.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>フェロー会員 早稲田大学 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail: akagi@waseda.jp

<sup>3</sup>正会員 株式会社大林組 生産技術本部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

E-mail: afshani.alireza@obayashi.co.jp

<sup>4</sup>フェロー会員 一般財団法人首都高速道路技術センター (〒100-8930 東京都港区虎ノ門3-10-11)

E-mail: dobashi@tecmex.or.jp

<sup>5</sup>早稲田大学 大学院修士課程 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail: grant\_hasan@akane.waseda.jp

本論文は、2020年2月に開通した首都高速神奈川7号横浜北線の馬場出入口トンネルの掘進が、近接する横浜北線の本線トンネルへ及ぼす影響を三次元解析によって検討している。横浜北線の本線トンネルおよび馬場出入口は、それぞれシールド工法によって構築されており、本線トンネル構築後に掘進する馬場出入口トンネルの既に供用しているトンネルに対する影響を把握することが大きな課題であった。本研究では、馬場出入口トンネルと本線トンネルの離隔が近接かつ三次元的に変化していることに着目し、三次元有限要素法解析により、出入口シールド掘削が本線トンネルに及ぼす影響を三次元的な離隔距離に基づいて解明し、近接施工における影響範囲の考え方について具体的な事例をもとに検討した。

**Key Words:** *underground structure, shield tunnel, ramp tunnel, three-dimensional analysis*

## 1. はじめに

近年、首都高速道路で新たに建設する路線の多くは、周辺環境への影響や都市空間の有効活用の観点から、トンネル構造によって構築されている。また、構築するトンネルは、地上への影響に加え、建設に要する費用などを考慮し、多くの範囲でシールド工法を採用している。

シールド工法は、工事による周辺環境への影響が少ない一方で、都市内においては、工事に使用可能な土地が限られているため、地上に存する多くの民家に対して施工の影響を考慮する必要がある。また、インフラの地下化が進んでいることから、既に地下にある構造物へ近接することが多くあり、新たに構築するトンネルは、既設構造物への影響による多大な被害を事前に防止する安全性が求められる。道路シールドトンネルは、直径10m以上の大断面トンネルとなることに加え、地上および地下の制約条件から、トンネルの線形が特殊となることもある。このように制約条件や特殊な状況においても安全に

工事を進めるためには、掘進による地盤の挙動を正確に把握することが重要である。

トンネルの掘進による地盤の挙動を把握するため、その変形挙動は、有限要素法を用いた数値解析によって算出されることが多い。有限要素法を用いた数値解析では、施工条件を適切に考慮することが重要である。これまでも施工過程を考慮した地盤挙動解析が行われており、地盤の変形挙動などが再現されるに至っている<sup>1)2)</sup>。また、都市内においては、近接する構造物が多いことから、二次元または三次元の有限要素法解析によって、併設するシールドトンネルの掘進の影響を検討している<sup>4)5)</sup>。なお、有限要素法解析においては、施工過程を考慮した解析を実施し、シールドトンネルの掘削による影響の確認も可能としている<sup>6)</sup>。しかし、これまでの研究においては、併設する両トンネルの線形は単純であり、複雑かつ特殊な線形のトンネルの掘進影響を数値解析にて再現するには至っていない。

従来、複雑な線形を有するトンネルの掘進による影響

の再現は、施工において実績が少ないことから、モデル化などが困難であったものと考えられる。実際にこれまでの道路トンネルの工事においては、出入口などを構築するにあたり、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、非開削による切掛け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、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ぬ場合があり、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。

本研究では、地上から発進する新設の出入口トンネルと既設の本線トンネルとの離隔が、これまで再現するに至っていない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、新設トンネルが近接する既設構造物に及ぼす影響を確認するために実施した、三次元有限要素法解析の結果を詳細に検討することとした。具体的には、解析結果と現場実測結果を比較することにより、解析結果の妥当性を確認した。また、地中構造物の近接施工の中でも特に、併設トンネルにおける影響範囲の考え方について、現場実測結果と解析結果から検証し、考察を加えた。

## 2. 三次元有限要素法解析による併設トンネルの影響評価

### (1) 併設トンネルの近接影響の評価

併設するトンネルの近接施工における影響は、新設する施工者と近接対象となる構造物の管理者が協議し、安全性を確認することが一般的である。安全性を確認するためには、事前に近接施工時の影響を検討する必要があるが、最初の手順として、近接施工の対象となるか否かの影響範囲の判断が必要となる。併設するシールドトンネルの検討においては、お互いの位置が新設するシールドトンネルの外径（以下、 $1D$ ）以内となる場合に検討を必要としている事例が多い<sup>7)8)</sup>。首都高速道路では、新設するトンネルが既設トンネルに対し、 $1D$ 以上の純離隔があれば、既設のトンネルに対して影響が小さいと考え、従来検討を省略しているが<sup>9)</sup>、純離隔が $0.5D$ 未満の場合、詳細な検討を実施することとしている<sup>10)</sup>。なお、検討対象地盤が軟弱地盤の場合や施工によって周辺に大きな影響が生じると考えられる場合は、 $1D$ 未満でも詳細な検討を必要としている。

首都高速道路の併設トンネルの影響検討を確認する手法は、事例の多い有限要素法解析を基本としている。なお、検討においては、後行トンネル通過時に先行トンネルに生じる一時的影響に加え、先行および後行トンネル

双方の長期的な相互干渉の影響を考慮する。一時的な影響は、後行トンネルの掘進による影響である。この影響は、切羽を要因とした地山の呼び込みおよび押し込み、シールドトンネルの曲線および勾配を有した施工に伴うシールド側面からの地山の押し込み、裏込め注入圧などを想定している。一方、長期的な影響は、両トンネルの構築により、土圧および地盤反力が単一トンネルと異なった状態で各トンネルに生じる影響を考慮している。これらの影響は、各トンネルの併設パターンにより、異なる影響があると考えられる。例えば、左右に併設するトンネルの場合、後行トンネルは、既設トンネルの隣接地盤中を掘削するため、応力の再配分が生じ、既設トンネルに作用するゆるみ土圧が増加する。また、後行トンネルは既設トンネルの位置により、側方の土圧や地盤反力が地盤の変位や地山の乱れによる強度低下に伴い、増減が発生するため、併設が上下および斜めになる場合は、さらに複雑な現象となる。そのため、併設トンネルの三次元離隔変化の場合は、これらが複合的に発生すると考えられ、近接影響評価が難しいことが想定される。

新設シールドトンネル工事における既設地中構造物への近接程度の判定の考え方については、各事業者毎に定められている。例えば地盤工学会では、既設地中構造物に対し、有害な影響が及ぶと考えられる範囲を新設するシールドトンネルの外径（ $1D$ ）以内の離隔範囲、有害な影響はないがまれに影響があると考えられる $1D\sim 2D$ の範囲、それ以外の影響が及ばない範囲に整理されている<sup>11)12)</sup>。しかし、既設地中構造物に対してシールドトンネルが近接する場合、部分的に近接するか、もしくはトンネルが一定間隔で近接状態が続く事例が多く、併設トンネルの三次元離隔変化の事例は特殊であり、具体的に検討結果を示した事例は見当たらない。現在、地上の制約条件等により、地下構造物が増加している中で、今後構築するトンネル構造物は、近接する構造物の増加に加え、三次元離隔変化となる事例が増えることが想定できる。適切に近接影響を評価をするためには、離隔の特徴を踏まえたうえで、影響を算出する必要がある。

### (2) 解析対象工事の概要

本研究では、数値解析の結果が妥当であることを確認する必要があることから、比較するための現地計測を行っており、離隔が三次元的に変化しながら本線トンネルへ近接する首都高速神奈川7号横浜北線（以下、横浜北線）の馬場出入口トンネル掘進工事を対象とした。

横浜北線は、2017年3月に開通し、延長約8.2kmのうち7割以上の約5.9kmがトンネル構造であり、大部分にシールド工法を採用している。横浜北線は、図-1に示すように横浜市の交通ネットワークの骨格を形成する横浜環状道路の北側区間に位置し、第三京浜道路「横浜港北

インターチェンジ」から首都高速神奈川1号横羽線「生麦ジャンクション」をつなぐ自動車専用道路である。路線内には生麦JCT付近に位置する「岸谷生麦出入口」、港北側に位置する「新横浜出入口」、中央に位置する「馬場出入口」の3箇所に入出口を設けている。

横浜北線の中央部に位置する馬場出入口は、地表の現道と横浜北線の港北および生麦の両方向にアクセスが可能な4枝のランプウェイをもつフルランプである。横浜北線本線部のトンネル（以下、本線トンネル）における馬場出入口部は、土被りが40～50mとなっている。このため、4つの出入口からの本線への接続もトンネル構造となっている（以下、出入口トンネル）。馬場出入口の各ランプも周辺環境への配慮などから、主にシールド工法（以下、ランプシールド）を採用しており、土被りが小さい区間では、開削工法が採用されている。

各出入口は、限られた用地条件から、地下深くの本線トンネルへ接続するために、図-2に示すとおり急曲線かつ急勾配という特徴を有している。各出入口における、最大縦断勾配は7%以上、最小曲線半径は約50mである。

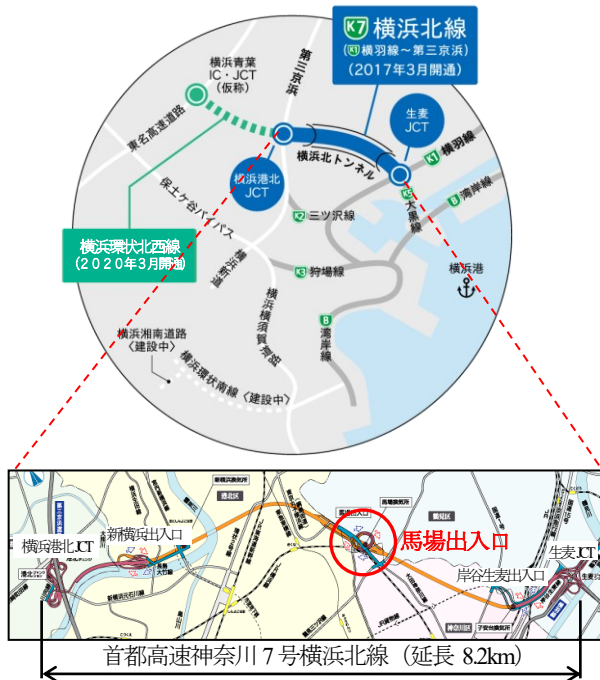


図-1 首都高速神奈川7号横浜北線位置図

また、本線トンネルと馬場出入口の接続は、切詰め工法を用いて本線トンネル側から拡幅している。具体的には、出入口トンネルにおける本線トンネルへの到達状況は、図-3に示すとおりである。

当初、馬場出入口は、横浜北線と同時に開通する予定であった。しかし、その後本線トンネルの開通を先行し、一部の出入口トンネルは、本線トンネルの開通後に掘削する計画に変更された。そのため、本線トンネルに変状、漏水などが発生した場合、重大な交通障害になり得ることから、既に供用しているトンネルへの影響を正確に把握することが必要であった。また、出入口トンネルは本線トンネルの位置関係が常に大きく変化しながら、本線トンネル到達部においては、平面離隔が約1.2mにまで近接することから、到達部以外においても同様に本線トンネルへの影響を正確に把握することが重要である。

### (3) 解析モデルの構築

本解析では、馬場出入口の4つのランプにおいて、三次元的な線形変化が図-2中の表に示すように、中間となるAランプを対象として、本線トンネルおよび出入口トンネル工事における土質データから地盤のモデルを構築した。解析に使用する土質データは、Aランプ出入口トンネルの下り縦断勾配により、掘進距離に応じて異なる地質を通過すること、また解析の結果は、施工前の検討において使用することを見据え、着工前に実施しているボーリングデータから算出した地盤物性値を用いた。本解析にて使用したAランプ出入口トンネルにおける、縦断方向の地層構成図を図-4に示す。図-4に示す発進部

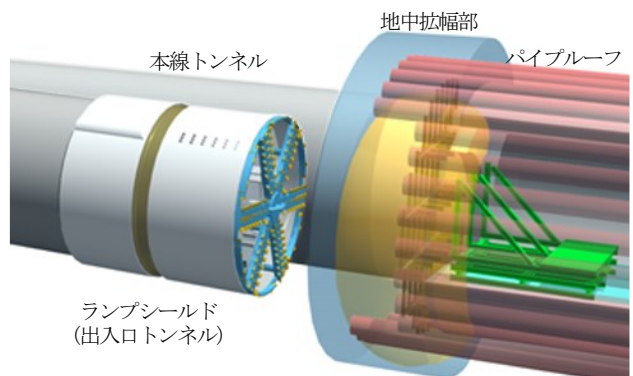


図-3 ランプシールド到達部概要図



図-2 馬場出入口全体平面図

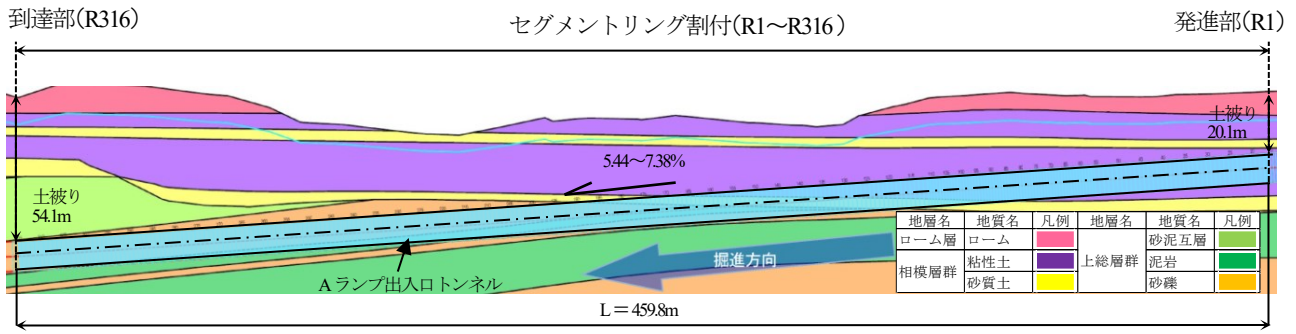


図-4 Aランプ出入口トンネルにおける縦断方向地層構成図

(リング番号, R1) から発進したランプシールド (外径, 9.9m) は, 下り縦断勾配が最大 7.38%, 平面的には最小曲線半径 80.0m で掘進方向に対して左方向に旋回しながら, 約 460m 掘進して本線トンネル (リング番号, R316) に到達している. また, 表-1に各地層の入力物性値を示す.

土の構成式はモール・クーロン型の弾塑性モデルとし, 地盤物性値におけるN値およびポアソン比は, 土質調査におけるデータが十分でなかったことから, 横浜北線の設計土圧算定時の数値<sup>13)</sup>を採用した. 単位体積重量および粘着力は, 土質調査結果の平均値から設定した. なお, 平均値の算出にあたっては, 特異値と想定できる値を削除して算出した. ヤング率は, 地盤変状解析や近接構造物の影響予測に影響することから, データのばらつきがある上総層の泥岩および砂泥互層は, 標準偏差を用いて平均値を安全側に補正した値を採用した. また, 上総層の砂質泥岩は土質調査結果がないことから, 砂泥互層と同じ地盤物性値とした.

次に本線トンネルおよびAランプ出入口トンネルのシールド機とセグメント躯体をモデル化した. なお, 本線トンネルおよびAランプ出入口トンネルのモデルは, セグメントの材料, 寸法, 割付を実構造と同様に設定した. 表-2に示したトンネル躯体の材料物性値におけるSTセグメントは, 実際に使用したコンクリート中詰めセグメントの物性値として設定した.

また, 本線トンネルとAランプ出入口トンネルの位置関係は, 実際のそれぞれの縦断線形と平面線形を反映させることでモデルを構築した. 以上の土質データとトンネル躯体を基に構築した地盤モデルを図-5に, 縦断および平面における各トンネル躯体の三次元モデルを図-6に示す.

図-5の地盤モデルは, X-Y-Z空間において土質調査結果を基に三次元的な地層構成を反映している. 底部の地層は, 上総層群の砂礫層または砂岩層であり, 側方はAランプシールドの発進立坑と本線トンネルとの到達部を含むように設定した. このとき, 境界条件が解析結果に

表-1 解析に使用した地盤物性値

地層	N値	単位体積重量 $\gamma$	粘着力 $c$	ヤング率 $E$	ポアソン比 $\nu$	
		kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>2</sup>	MN/m <sup>2</sup>		
ローム層	15	14.00	54.0	7.80	0.45	
相模層	粘性土	5	15.50	160.0	19.00	0.4
	砂質土	8	18.50	48.0	20.00	0.3
上総層	泥岩	34	18.50	2000.0	450.00	0.3
	細砂	>50	19.50	75.0	78.00	0.3
	砂泥互層	>50	19.00	1800.0	500.00	0.3
	砂質泥岩	>50	19.00	1800.0	500.00	0.3

表-2 トンネル躯体の材料物性値

パラメータ	RCセグメント	STセグメント	スキンプレート
ヤング率 $E$	39GPa	33GPa	210GPa
単位体積重量 $\gamma$	26 kN/m <sup>3</sup>	26 kN/m <sup>3</sup>	78.5 kN/m <sup>3</sup>
ポアソン比 $\nu$	0.17	0.17	0.3
厚さ $t$	350 mm	350 mm	65 mm

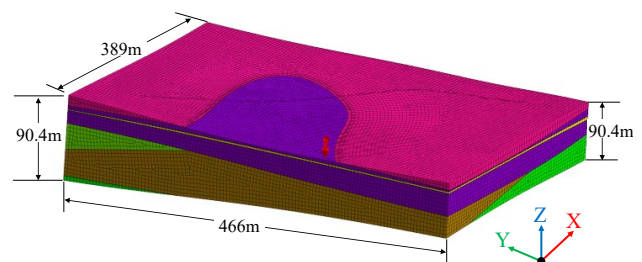


図-5 地盤モデル (地層構成凡例は, 図-4と同様)

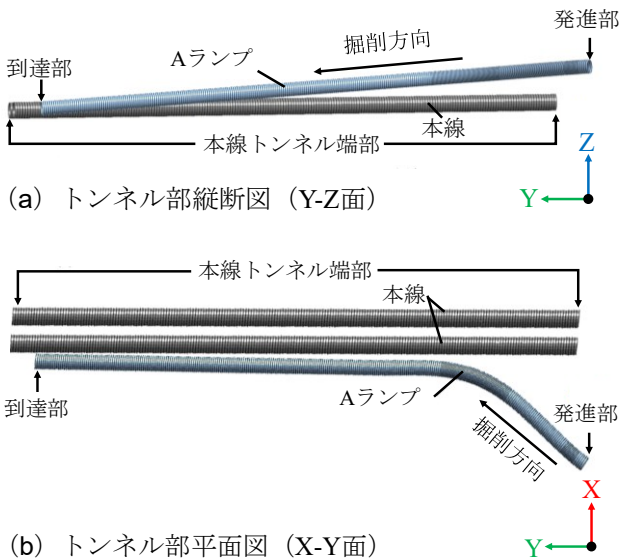


図-6 本線トンネルおよびAランプ出入口トンネルのモデル

及ぼす影響を考慮し、地盤モデル内に設置される発進部、本線トンネル、ランプトンネルなどの構造物からの下方および側方境界との離隔が  $5D$  ( $D$  は本線トンネル外径) を満たすことを基本として地盤モデルを準備した<sup>14)</sup>。この結果、地盤モデルは図-5に示すような形状、寸法となった。

図-6の本線トンネルとAランプトンネルモデルの境界条件は、Aランプシールドは、地上から開削工法にて構築した立坑から発進しているため、ランプトンネルの発進部が拘束されるように設定している。また、到達部も同様に本線トンネルの拡幅部に到達して接続されるため、発進部と同様に本線トンネル端部を含めて拘束境界条件となっている。

具体的な解析ステップは、以下の通りである。

#### a) 本線トンネル

出入口トンネルの構築時に本線トンネルが既に構築されていることを再現するため、各物性値が定められている地盤モデルの初期応力状態に本線トンネル掘削の影響を反映させることとした。具体的には、本線トンネルの線形に合わせ、トンネル内の地盤要素を除去し、セグメント覆工部をコンクリート要素で置き換えるとともに、図-6に示すように本線トンネル両端を境界面で鉛直方向および水平方向に拘束することで、地盤内に本線トンネルが構築されている初期応力状態を再現した。

#### b) 出入口トンネルの発進部

4本の馬場出入口トンネルのうち、3本のA、C、Dランプシールドは、コンクリートで構築された同じ発進立坑（以下、ACD発進立坑）から掘進している。解析でも同様に立坑躯体をコンクリート要素で構成し、立坑内の地盤要素を除去することで図-7に示すようにACD発進立坑部をモデル化した。

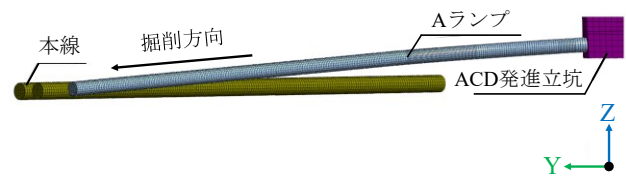


図-7 ACD発進立坑を含んだモデル

#### c) 出入口トンネルの掘削と構築

出入口トンネルの掘削と構築は、次節で詳細に述べるようにシールドマシンの掘削による周辺地盤への影響を表現するために、まずシールドマシン内の地盤要素を除去した。その後、シールドマシンとセグメント要素で支持された切羽面に静止土圧に相当する切羽圧を与えるとともに、テールボイド部分にギャップ要素を導入することで、出入口トンネルの掘削と構築を再現した。

以上の解析ステップにより、最終的に地盤モデルの中に立坑部と本線トンネル、出入口トンネルのモデルが設置されることで、解析完了後のモデルは実際の馬場出入口のAランプ出入口トンネルおよび本線トンネルと同様の構成となっている。

### (4) 出入口トンネル掘削解析におけるギャップ要素の導入

本研究の対象としたAランプ出入口トンネルは、前述のように急曲線および急勾配でかつ合流部では本線トンネルと近接することから、トンネル周辺部への影響が大きいことが想定された。そこで、より正確にトンネル掘削に伴う周辺部への影響を再現するために、後述する a) 水平面 (X-Y 平面) 内における急曲線、鉛直面 (Y-Z 平面) 内における急勾配の影響、b)裏込め注入量の影響、c)裏込め注入圧力の影響の3つの要因に伴う、理論掘削体積を超えて掘削される土の体積（以下、地盤損失）に着目することにした。裏込め注入については、近接構造物への影響が大きく、同じ圧力で注入しても地盤の割裂現象などで注入体積は変化することから個別に評価することとしている。なお、Aランプ出入口トンネルの掘削解析にあたっては、トンネル施工時の掘削土量の実績が、シールドマシン断面積にマシンの推進距離を乗じた理論掘削土量のほぼ100%であったことから、トンネル切羽における掘削に伴う地盤損失は考慮していない。

本解析では、Rowe and Kack (1983)<sup>15)</sup>によって示された、シールド機後方に発生するテールボイド位置に設定したギャップ要素を用いて、トンネル構築による地盤掘削の影響を本解析に導入することとした。ギャップ要素は、有限要素法解析においてテールボイド部のゆるみを示すために用いられた事例もあり<sup>16)</sup>、シールド機テール背後でセグメント覆工と地盤に生じる物理的な空隙を模擬することができる。ギャップ要素は、裏込め注入直後の裏

込め材料に相当する地盤剛性と比較して十分小さな剛性でギャップ要素外周部の節点に強制変位を与えた時、要素内に過剰な応力が発生しないような要素である。なお、ギャップ要素外周節点に強制変位を与えた後には、それらの節点は固定される。急曲線、急勾配を有するランプシールドでは、シールドマシンと周辺地盤との相対的な位置関係が複雑に変化することから、強制変位はトンネル中心に向かって等方的に与えることとし、その大きさ  $u$  は、次式(1)で表されると仮定した。

$$u = g \times (\alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3) \quad (1)$$

ここに、 $u$  はギャップ要素外周節点に与える強制変位量、 $g$  は強制変位の基本となる等方的なテールボイド収縮量、 $\alpha_1$  はシールドトンネルの線形によって決まる水平面内、鉛直面内での急曲線、急勾配の影響係数、 $\alpha_2$  は裏込め注入量に関する影響係数、 $\alpha_3$  は裏込め注入圧力の土被り圧に対する影響係数である。

これらの3つの要因は、前述のように本解析で対象としている既設構造物に近接したシールドトンネル工事で支配的な影響要因と考えられるものである。これらの要因は、実際のシールドトンネル施工時には互いに関係するものと思われるが、既設構造物に及ぼす影響の観点から、互いに独立な3つの要因による影響係数の積で全体的な地盤損失の影響を評価することとした。また、 $\alpha_1$  は強制変位  $u$  を増加させる影響係数なので1以上であり、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  は  $u$  を減少させる影響係数なので1未満となる。したがって、これらの影響係数の積が1以上であれば、 $u \geq g$  となるので地盤損失の影響が大きく評価されて周辺部の近接構造物に及ぼす主動的な影響が大きくなり、地盤損失が大きくなる。1未満であれば  $u < g$  で受働的な影響が卓越することになり、地盤損失が小さくなる。

上記のギャップ要素の強制変位の基本となる変位量  $g$  は、トンネル線形が直線、裏込め注入量がトンネル覆工とマシン外周の地盤掘削面との物理的な空隙量に相当する理論テールボイド量に等しく、かつ裏込め注入圧力が土被り圧に相当する拘束圧と同じである場合にトンネル中心に向かって発生する等方的なトンネル外周面変位量である。Lee ら<sup>17)</sup>によれば、シールドトンネル掘削に伴う地盤損失に起因するトンネル単位長さあたりの均一な地盤変位量  $g$  は次式(2)で与えられている。

$$g = G_p + U_{3D}^* + \omega \quad (2)$$

ここに、 $G_p$  はシールドマシンとセグメントの片側外径差でテールボイド厚さに相当する、 $U_{3D}^*$  はシールドマシン切羽の掘削に伴う地盤の三次元弾塑性変形に起因する地盤変位量、 $\omega$  はシールドマシンの運転技術に依存する

地盤変位量である。

解析対象としているAランプ出入口トンネルでは、前述のようにトンネル切羽は良好に保持され、応力解放に伴う三次元的な変形は無視できるので、 $U_{3D}^* = 0$  としている。また、Lee ら<sup>17)</sup>によればシールドマシン運転技術に依存する  $\omega = 0.6G_p$  なので、式(2)は下記のようになる。

$$g = G_p + 0.6G_p = 1.6G_p \quad (3)$$

なお、運転技術はシールドマシンを操作するオペレータによって異なるが、式(2)で定めている  $\omega$  は、Lee ら<sup>17)</sup>によれば、素掘円形トンネルのクラウン変位量とトンネル覆工の存在を考慮したテールボイド厚さ  $G_p$  から定めていることから、本研究事例にも適用が可能であると考えられる。

図-8は、直線かつ水平な線形をもつシールドトンネルにおける一般的なシールドマシンとセグメントの横断面図(a)と縦断面図(b)を示したものである。この図に示されるとおり、この場合のテールボイド厚さ  $G_{p0}$  は次式(4)で与えられる。

$$G_{p0} = \Delta + \delta \quad (4)$$

ここに、 $\Delta$  はシールドマシンスキンプレート厚さ、 $\delta$  はテールクリアランスであり、セグメント構築時とマシンの姿勢制御に必要とされるセグメント外周面とシールドマシン内周面との離隔である。

したがって、シールドトンネル掘削に伴う地盤損失に起因するトンネル単位長さあたりの均一な地盤変位量  $g$  を求めると次式(5)で与えられることになる。

$$g = 1.6 \times G_{p0} \quad (5)$$

この  $g$  すなわち直線部テールボイド厚さ  $G_{p0}$  を用いて式(1)で決まる強制変位量  $u$  は、シールドトンネル施工前に推定されるものなので、シールドトンネルの計画設計段階におけるシールドマシン仕様やトンネル線形によって決まる影響係数を用いて算定することができる。以下、式(1)に含まれる3つの係数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  の考え方について説明する。

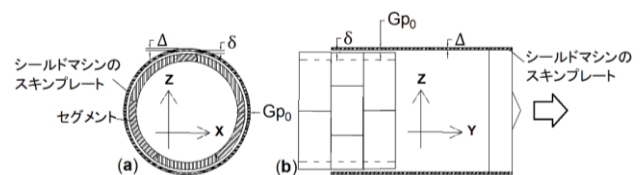


図-8 直線部のテールボイド厚さ  $G_{p0}$

a) 急曲線および急勾配のトンネル線形による影響 (係数 $\alpha_1$ )

テールボイド厚さ $G_p$ は、シールドマシンの仕様やセグメントの形状寸法、トンネルの線形などを考慮して決定する必要があるが、直線線形におけるテールクリアランス $\delta$ の実績としては、20mm~40mmが多いことが示されている<sup>18)</sup>。しかし、掘進するシールドトンネルの平面的な曲線半径は小さくなるにともない、シールドマシンによって掘削された地山と覆工の空隙に発生するテールボイド厚さ $G_p$ が大きくなり、同様に縦断方向の勾配が大きくなるにともない、地山と覆工の空隙が大きくなる。解析の対象としたAランプ出入口トンネルは、急曲線か急勾配であることから、シールドマシン後方に発生するテールボイド厚さ $G_p$ の算出においては、曲線半径および勾配を反映させることとした。なお、Aランプ出入口シールドは、中折れ装置を有しており、施工の際にも使用して掘進している。テールボイド厚さは、中折れ装置の有り無しによって異なるが、中折れ装置の使用頻度および程度は、施工者の実績によるものが大きいため、ここでは評価していない。

シールドトンネルの計画線形が有する水平面 (X-Y 平面) 内の急曲線によるテールボイド厚さ $(G_p)_{xy}$ は、図-9に示すように、曲線半径とセグメント外径で決まる曲線内半径、シールドマシンテール長で算出することができる<sup>18)</sup>。なお、 $xy$ は、水平面を表す記号であり、テールボイド厚さ $G_{p0}$ は式(4)で示したとおり、シールドマシンスキンプレート厚さ $\Delta$ にテールクリアランス $\delta$ を加えたものである。以下に $(G_p)_{xy}$ の算出式を示す。

$$(G_p)_{xy} = \left(R - \frac{D_0}{2}\right) (1 - \cos \beta) \approx \frac{l^2}{2(R - D_0/2)} \quad (6)$$

ここに、 $R$ は曲線半径、 $l$ はテール長、 $D_0$ はセグメント外径、 $R - D_0/2$ はセグメント部の曲線内半径、 $\beta$ はテールボイドにおけるテール長に対応する円周角である。

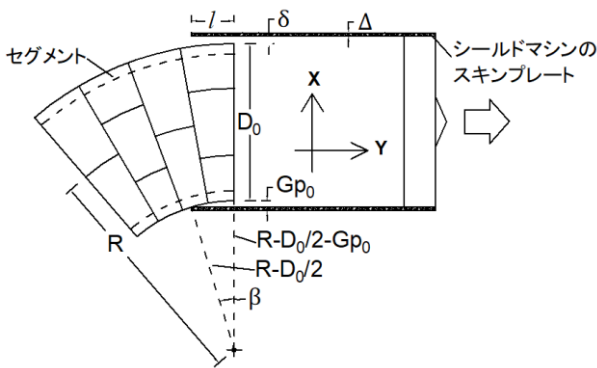


図-9 シールド曲線部におけるシールドマシンとセグメントの幾何学的な位置関係

式(1)の水平面内における急曲線に応じて発生するギャップ要素強制変位量  $u$  を決める影響係数 $(\alpha_1)_{xy}$ は、シールドトンネル直線部におけるテールボイド厚さ $G_{p0}$ をもとに次式(7)で求めることができる。

$$(\alpha_1)_{xy} = 1 + \frac{(G_p)_{xy}}{G_{p0}} = 1 + \frac{l^2}{2(R - D_0/2)G_{p0}} \quad (7)$$

また、トンネル線形の鉛直面 (Y-Z 平面) 内における縦断勾配の変化を考慮した影響係数 $(\alpha_1)_{yz}$ については、縦断勾配  $i$  の変化率をもとに式(8)で求めることとした。なお、 $yz$ は、鉛直面を表す記号である。

$$(\alpha_1)_{yz} = 1 + \frac{|i_{curve} - i_{straight}|}{i_{straight}} \quad (8)$$

ここに、 $i_{straight}$ は縦断勾配が変化するAランプトンネルのうちで最長の一定縦断勾配区間の勾配、 $i_{curve}$ は異なる縦断勾配区間の勾配である。

以上の2つの影響係数の積により、急曲線と急勾配を同時に有するAランプトンネルにおけるトンネル線形による影響係数 $\alpha_1$ を次式(9)で求めた。

$$\alpha_1 = (\alpha_1)_{xy} \times (\alpha_1)_{yz} \quad (9)$$

このシールドトンネル線形変化による影響係数を考慮することは、図-10に示すようにシールドトンネル施工時にマシンの方向制御のために実施される、シールドマシンのコピーカッターなどを利用した余掘りが地盤損失に及ぼす影響を考慮することに対応している。

急曲線および急勾配の線形を構築する場合は、通常必要な余掘りを行うために中折れ装置を考慮してコピーカッターの形式や仕様を決定する。Aランプシールドの施工においては、特に急曲線部において、余掘りを行うために、コピーカッターをシールドマシン全周に対応できるように設置されており、曲線半径80mとなる急曲線部では、130mmのコピーカッター伸限值を設定して掘削

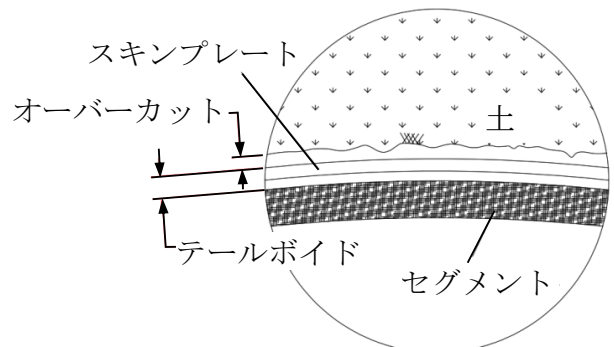


図-10 テールボイドと余掘り厚さ

し、5.44～7.38%の急勾配に対しては、1,000mmのコピーカッター伸限値を設定して全域にわたって掘削した。本解析においては、中折れ装置およびコピーカッターの使用が実際の現場における掘進計画によって決定することが多く、シールドマシンの性能にもよるところがあり、事前に設定することが難しいので、式(9)で評価している。

b) 裏込め注入量による影響 (係数 $\alpha_2$ )

通常、シールド掘進においては、前項で述べたシールドマシン後方に発生するテールボイド部分を裏込め注入により充填し、周辺部への影響を低減するとともに、トンネル躯体の安定化を図っている。この裏込め注入工は、裏込め注入量および裏込め注入圧の両方法で総合的に管理することが望ましく<sup>19)</sup>、Aランプシールド施工時においても両方法で管理された。設計裏込め注入量は、前項で述べたトンネル線形による影響を考慮して理論的に求められるテールボイド厚さで決まるテールボイド体積を100%充填できる量で施工前に算出可能である。一方、計画注入量は、地盤中に割裂注入などが発生している場合には想定以上に注入される可能性を考慮し、設計裏込め注入量と比較して多めに設定することが多い<sup>19)</sup>。

また、裏込め注入によりテールボイドが充填された後に、裏込め注入材料は土被り圧に相当する拘束圧の作用下で時間とともに体積収縮が発生すると考えられる。Ingles and Metcalf<sup>20)</sup>による室内試験の結果では、7～10%の時間依存性体積収縮ひずみが裏込め注入材料として一般的なセメントと土の混合物にて観察されたと報告されている。馬場出入口トンネルの裏込め注入材においては、一般的なセメント系を採用しており、裏込め注入材と地盤土の混合が想定できるので、裏込め注入量による影響係数 $\alpha_2$ は次式(10)で求めることができる。

$$\alpha_2 = \frac{\text{設計注入率}(100\%) \times \text{裏込め材収縮率}(8.5\%)}{\text{計画注入率}(\%)} \quad (10)$$

ここに、 $\alpha_2$ は裏込め注入により強制変位量 $u$ を減少させる影響係数なので、分子は理論的に得られる100%の設計注入率に裏込め材の体積収縮率実験値の平均値8.5%を乗じた値であり、分母は実際の施工における計画注入率を用いて求めることとした。

c) 裏込め注入圧による影響 (係数 $\alpha_3$ )

裏込め注入圧の影響については、一般にシールド工事ではシールドテール位置での土被り圧に見合う拘束圧に相当する設定泥水圧や泥土圧より50kN/m<sup>2</sup>～100N/m<sup>2</sup>程度大きい値を標準とすることから、施工時の計画裏込め注入圧としては、拘束圧に50kPaを加えた値を採用した。なお、シールドテール位置での拘束圧としては、テルツ

アギーのゆるみ土圧を採用し、ゆるみ土圧は一般的に下限値を設けることが多いため<sup>21)</sup>、本解析においても土被り深さに対応する下限値200kPaを拘束圧として採用することとした。

影響係数 $\alpha_3$ は、 $\alpha_2$ と同様に裏込め注入により強制変位量 $u$ を減少させる係数なので、次式(11)のように拘束圧を計画裏込め注入圧で除して求めることとした。

$$\alpha_3 = \frac{\text{拘束圧}}{\text{設計裏込め注入圧}} \quad (11)$$

(5) Aランプシールドの掘削解析におけるギャップ要素諸係数の決定

表-3は、Aランプシールドにおけるシールドマシン、セグメントおよびギャップ要素を用いた解析に関する諸元をまとめたものである。

この表より、シールドマシンスキンプレート厚さ $\Delta = 65\text{mm}$ でテールクリアランス $\delta = (10,000 - 9,900) / 2 = 50\text{mm}$ なので、強制変位の基本となる等方的なテールボイド収縮量 $g = 1.6(\Delta + \delta) = 184\text{mm}$ である。

各影響係数を算出するに当たり、全てのセグメントリングで算出することは現実的でないことから、幾何学的な線形の特徴が類似している範囲で分別することとした。

本解析の対象としているAランプシールドは、図-11に示すようにセグメントリングR1～R49を掘進開始からの直線区間、R50～R117を曲線区間、R118～R280を曲線終了から本線トンネル近接までの直線区間、R281～R316を本線トンネル近接区間とし、線形が類似している区間を1つのグループとし、全体をそれぞれ異なる特徴を有した4つの区間に分けて影響係数を算出することとした。

表-3 Aランプシールドにおける構造解析諸元

種別	シールドマシン	セグメント	ギャップ要素
外径 $D_0$ (mm)	10,130	9,900	-
内径 $D$ (mm)	10,000	9,200	-
長さ $L$ (mm)	10,500	1,500 or 1,000	-
厚さ(mm)	65	350	115
要素物性	表-2 参照	表-2 参照	$E = 1(\text{MPa})$ , $\nu = 0.48$

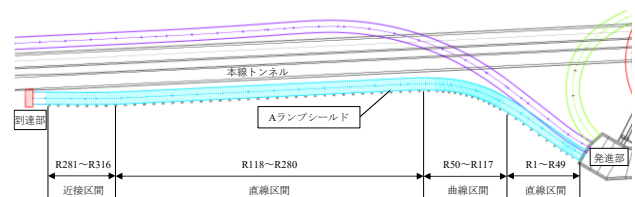


図-11 Aランプシールドの区間分け



表-4は、Aランプシールドにおける平面線形、縦断線形に応じて式(7), (8), (9)を用いて求めた影響係数 $\alpha_1$ を4つの区間別に求めたものである。なお、式(7)におけるテール長は、 $l=3m$ であり、式(8)における縦断勾配の基準となる  $i_{straight}$  は、Aランプシールドにて最も長い距離の勾配となっている 7%を採用することとした。また、水平面内の曲線半径は、曲線が続く R50~R117の区間のみ平均曲線半径で定めることとし、その他の区間は大きな曲線はなく、ほぼ直線に近いことから、曲線半径を無限大としている。縦断勾配は、全区間で地中に既設の本線トンネルに向けて大きな下り勾配を有するため、各区間の平均値を採用した。

図-12は、Aランプシールド施工時に伴う裏込め注入の計画注入量と実績値を比較したものである。計画注入量は設計値の 110%~130%で設定されているのに対して、実施における注入量実績は、ほぼ同等であった。したがって、影響係数 $\alpha_2$ は式(10)を用いると各区間で表-5に

表-4 Aランプシールドにおける平均曲線半径および勾配と $\alpha_1$

リング範囲	平均曲線半径(m)	平均縦断勾配(%)	$\alpha_1)_{xy}$	$\alpha_1)_{yz}$	$\alpha_1$
R1~R49	$\infty$	6.69	1.000	1.044	1.044
R50~R117	128.8	7.27	1.316	1.038	1.366
R118~R280	$\infty$	7.00	1.000	1.000	1.000
R281~R316	$\infty$	6.59	1.000	1.058	1.058

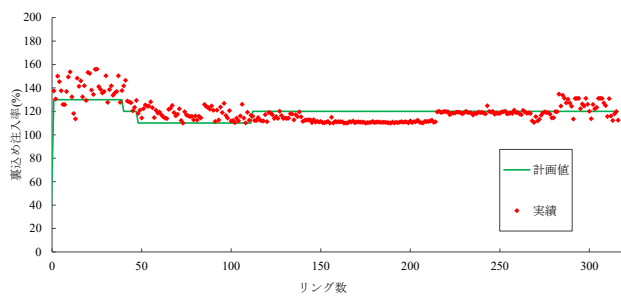


図-12 計画裏込め注入量と注入量実績の比較

表-5 区間毎の平均計画裏込め注入率と係数 $\alpha_2$

リング範囲	計画注入率(%)	$\alpha_2$
R1~R49	127	0.0669
R50~R117	111	0.0766
R118~R280	120	0.0708
R281~R316	120	0.0708

示す値となる。係数 $\alpha_3$ については、Aランプシールド全線にわたって計画裏込め注入圧は250kPaで設定されたことから、表-6に示すように全区間で一定とした。

以上のギャップ要素に関する諸係数の算定結果をもとに、式(1)により各区間ごとのギャップ要素に作用させる強制変位量 $u$ を算出した結果を表-7に示す。

出入口トンネル構築プロセスイメージについては、図-13に示すとおりシールドマシン切羽面に相当する節点に静止土圧を作用させた状態で、節点のみを有して厚さを持たない要素を除去し、内部にシールドマシンシェル要素をモデルに追加後、曲線および勾配を有するシールドトンネルにおける1日当たりの標準的な施工リング数である5リング長を単位としてマシンテール部に存在するギャップ要素外周節点に対して表-7で求めた強制変位 $u$ を作用させた状態で固定境界条件とした。外周節点の固定方法は、ギャップ要素外周節点を拘束条件として設定し、作用させている強制変位 $u$ 以外の方向を除いた部分を固定している。このギャップ要素に対する変位の固定は、併設トンネルの三次元離隔変化によって生じた空

表-6 区間毎の計画裏込め注入圧と係数 $\alpha_3$

リング範囲	拘束圧(kPa)	計画裏込め注入圧(kPa)	$\alpha_3$
R1~R49	200	250	0.800
R50~R117	200	250	0.800
R118~R280	200	250	0.800
R281~R316	200	250	0.800

表-7 区間毎に算出した諸係数と強制変位 $u$

リング範囲	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$g$ (mm)	$u$ (mm)
1)R1~R49	1.044	0.0669	0.800	184	10.3
2)R50~R117	1.366	0.0766	0.800	184	15.4
3)R118~R280	1.000	0.0708	0.800	184	10.4
4)R281~R316	1.058	0.0708	0.800	184	11.0

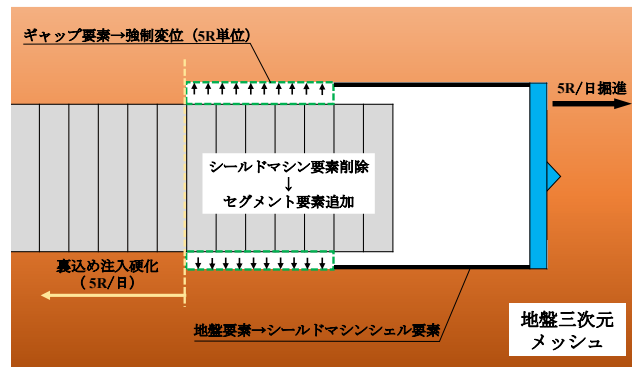


図-13 解析における出入口トンネルの構築プロセスイメージ

隙に対する変位を再現することを目的としている。この5リングを単位としたプロセスを本線トンネル到達点まで繰り返すことで、Aランプ出入口トンネルの掘削、設置過程を解析的に再現した。

### 3. Aランプシールド掘進が本線トンネルに及ぼす影響評価

#### (1) 現地の変位計測状況と解析結果の比較

図-14は、本線トンネルのインバート部に設置した水盛式沈下計測計による鉛直変位計測点[1], [2], [3]を本線トンネル, Aランプシールド発進部, 到達部を示す平面図中に示したものである。なお、この図には前述のAランプシールドの幾何学的な線形の特徴により区分した4つの区間が示されている。計測点[1]は、Aランプシールドが直線区間から曲線区間に変化する箇所である。また、計測点[2]は、本線トンネルとAランプシールドが最近接する箇所であり、計測点[3]は到達部を計測している。図-15は、Aランプシールドが本線トンネルに最近接するリング範囲R281~R316において、本線トンネル内に設けた変位計測点[4], [5], [6]の設置位置を示したものである。なお、計測点[2]および[4]は同一セグメント内に設置されている。図-16は、図-14および図-15の変位計の計測点断面図を示したものである。図-14の計測点[1], [2], [3]では、本線トンネルのインバート部に鉛直変位計測器を設置している。図-15の計測点[4], [5], [6]では、トータルステーションを用いて本線トンネル内空断面のクラウン部、45°、スプリングライン部の3箇所に設置したターゲットの変位を計測した。

図-17および図-18は、計測点[1]と[2]における鉛直変位の計測結果(実線)と計測点に対応した箇所の解析結果(破線)を比較したものである。図中におけるプラス方向は隆起、マイナス方向は沈下を示している。

図-17の計測点[1]は、表-7に示したAランプシールドのリング範囲1)と2)の境界点に位置し、Aランプシールドの平面と縦断線形が変化した直後であり、離隔距

離も大きいのでギャップ要素の強制変位の影響は顕著でないことがわかる。一方、現場計測結果においては、A

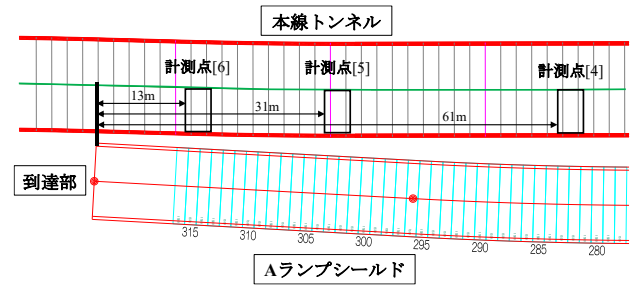


図-15 変位計測点設置位置(本線上・平面)

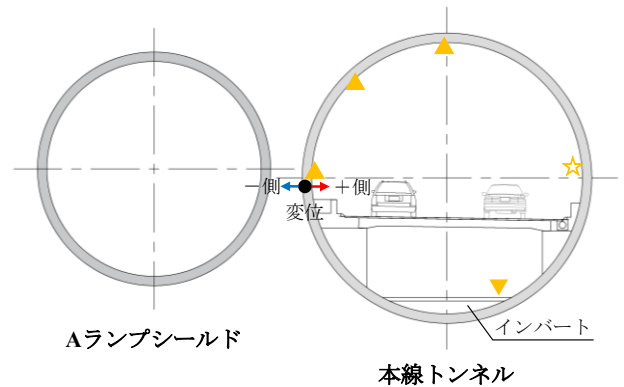


図-16 変位計測点設置位置(断面)

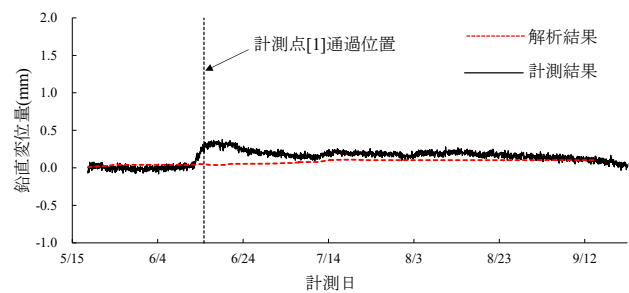


図-17 計測点[1]における鉛直変位量の比較

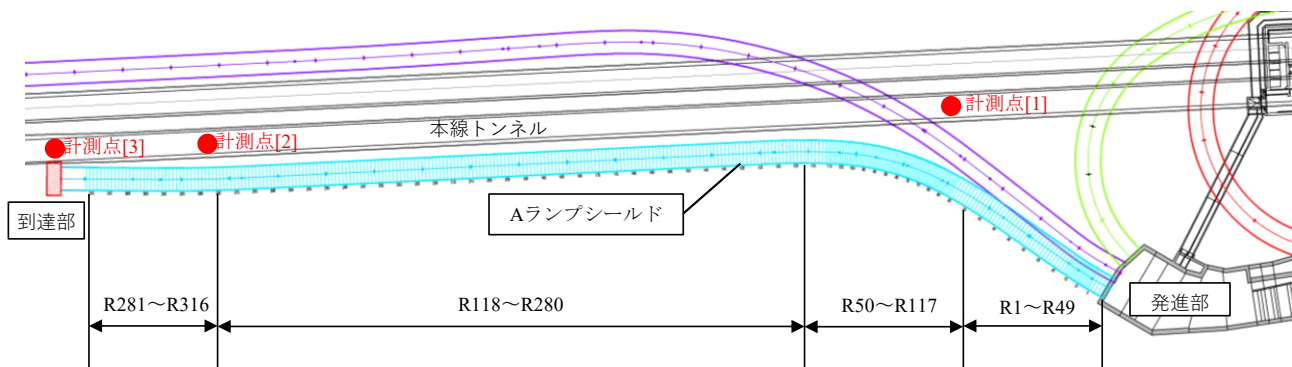


図-14 変位計測点設置位置(インバート部・平面)

ランプシールドが計測点[1]を通過する6月12日から6月17日にかけて、本線の鉛直変位は約0.4mm隆起し、その後緩やかに隆起した変位が戻っている。図-19の計測位置を含む横断面内におけるAランプシールドと本線トンネルの位置関係に示すとおり、双方のトンネルの純離隔距離が約25mで大きく離れた位置を掘進しているが本線トンネルインバート近傍部には、計測点[1]通過直前から通過後にかけて、約0.3mmの微小な隆起が発生していることがわかる。このわずかな変位は、計測点[1]付近におけるAランプシールドの切羽圧の影響であると考えられる。Aランプシールドは、計測点[1]に向けて約7%の勾配を有しながら、本線トンネルの躯体の方向に掘進している。そのため、Aランプシールドの切羽圧が本線トンネル上の地盤に影響し、直上の応力がわずかに減少したことで、隆起したと推定される。

図-18の計測点[2]は、図-20に示すとおりAランプシールドと本線トンネルとの合流部に近い場所であり、本線

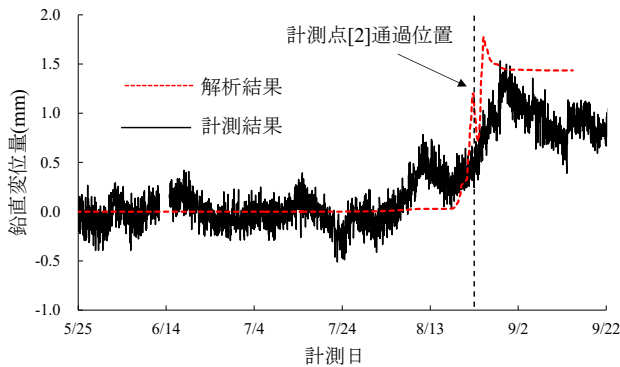


図-18 計測点[2]における鉛直変位量の比較

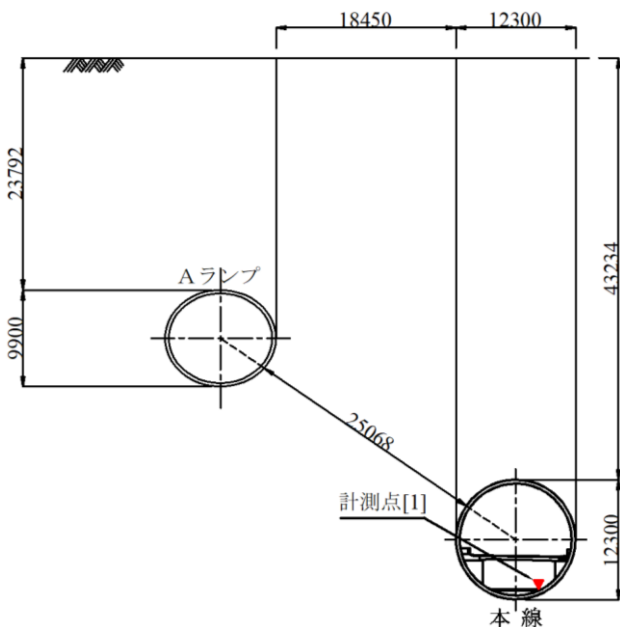


図-19 計測点[1]を含む横断面におけるAランプシールドと本線トンネルの相対位置

トンネルとの離隔距離がAランプシールド外径の半分以下の約4mで非常に小さい。解析結果ではAランプシールドが計測点[2]に到達前の8月20日付近から隆起し、その後最大約1.8mm程度の隆起変位を示し、計測点からAランプシールドが離れるにつれて収束していくが、解析ではギャップ要素変位は、強制変位を与えたまま拘束条件として、外周節点が固定するので、1.5mm程度の隆起で収束している。一方、計測結果はAランプシールド接近に伴って±0.5mm程度の変位が発生し、計測点[2]に到達した点を挟んで最大1.5mm程度の隆起が観測された後に、Aランプシールド通過後に1mm程度の隆起量に収束している。このことから、計測点[2]を含む表-7のリング範囲3)におけるギャップ要素の10.4mm程度の強制変位で計測結果とほぼ対応した結果が得られたことがわかる。

次に、Aランプシールドが本線トンネルに最接近した表-7のリング範囲4)に含まれる計測点[4]、[5]、[6]で本線下り線車道部にて計測したトンネル内空クラウン部とスプリングライン部の鉛直、水平変位の実測値と計測地点に対応する箇所を得られた解析結果を比較した結果を図-21、22、23に示す。なお、計測点[4]、[5]、[6]は、本線トンネルにおける到達部からの距離がそれぞれ61m、31m、13mの位置となっており、出入口トンネルと本線トンネルの離隔距離はそれぞれ約4m、3m、1mと減少していく。

図-21は、本線トンネルクラウン部に設置した3つの計測点における鉛直変位の解析結果と計測結果を比較し

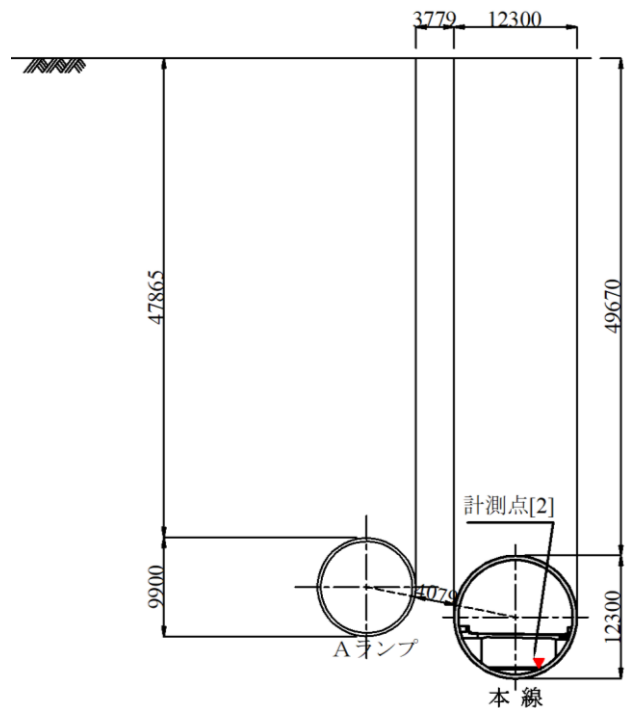


図-20 計測点[2]を含む横断面におけるAランプシールドと本線トンネルの相対位置

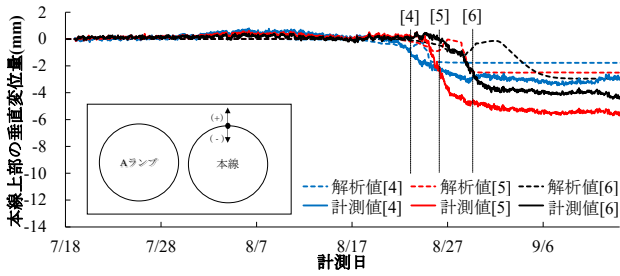


図-21 本線トンネルクラウン部の鉛直変位の比較

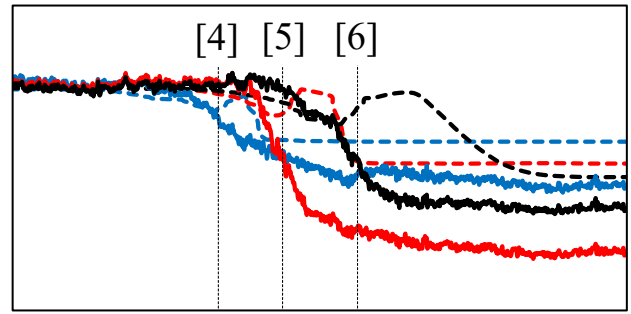


図-24 図-21における計測点付近の拡大図

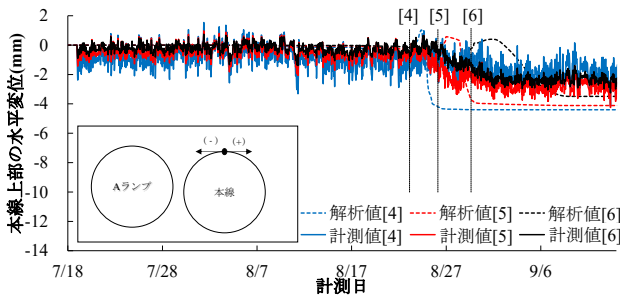


図-22 本線トンネルクラウン部の水平変位の比較

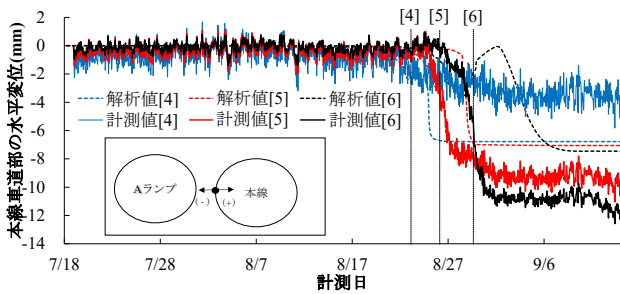


図-23 本線トンネルスプリングライン部の水平変位の比較

たものであり、本線トンネルの外側側への変形をプラスで示し、内側側への変形をマイナスで示している。解析結果は、Aランプシールドが各計測点に達するまでは、わずかにマイナス方向に変形し、計測点を過ぎた後からプラス方向に変形後、マイナス方向に変形し、その後収束している。一方、計測結果も同様に計測点までは大きな変形が生じていないが、計測点に達する前からマイナス方向に変形し、その後収束している。図-21を拡大した対象箇所を図-24に示す。

図-22は、本線トンネルクラウン部に設置した計測点における水平変位の解析結果と計測結果を比較したものであり、本線トンネルクラウン部のAランプ遠隔側の変形をプラスで示し、近傍側の変形をマイナスで示している。解析結果は、変形量にわずかな違いがあるが、ほぼ図-21の鉛直変位と同様な傾向となっている。一方、計測結果は、計測点位置に応じた水平変位の違いは鉛直変位と比べて顕著でなく、いずれの計測点においてもAランプ側への変形量が最大で-3mmとなっている。

図-23は、Aランプシールド掘進の影響が最も大きく

反映される本線トンネルのスプリングライン部の車道部の高さに設置した計測点における水平変位の解析結果と計測結果を比較したもので、本線トンネル内空側の変形をプラスで示し、外面側の変形をマイナスで示している。

なお、それぞれの図中における[4]~[6]の計測日の位置は、計測点を通過した位置を示している。解析結果は、トンネルクラウン部での変位状況と同様な傾向を示しているが、いずれの計測点においても収束した最大変形量が約-7mmとなり、最も大きい変形が残留している。一方、計測結果は計測点位置に応じた残留水平変位量の違いが顕著であり、離隔が大きい計測点[4]は-4mm、計測点[5]では-10mm、最接近した計測点[6]では-12mmとなっている。実際のAランプシールド施工においては、本線トンネルとの合流部での接合に向けて計測点[4]、[5]付近を通過する際にはシールド機のヨーイング、ピッチングなどの姿勢をリアルタイムで本線トンネルの計測結果を確認しながら、きめ細かく制御している。具体的には、中折れ装置については、上下の中折れ角度を合流部付近で最大 $0.5^\circ$ 、左右の中折れ角度を最大 $0.6^\circ$ で掘削しており、上下左右ともに $0.05^\circ$ 単位の角度設定で調整しつつ、掘削に反映している。また、コピーカッターによるシールドの両側部および天端部の余掘りは、到達部付近において、Aランプシールドにおける、本線トンネルの近傍側において40mm、遠隔側および上部では100mmで設定し、掘削した。これは到達部において、特に厳密なシールドマシンの掘進管理を要したことから、余掘りを確保することで、到達時の精度およびマシンの姿勢を確保するためである。一方、解析においては、テールボイドをギャップ要素にて評価しており、中折れ装置およびコピーカッターの使用量に対する評価していない。

このため、Aランプシールド機テールボイド発生状況は変化するので、本線トンネルクラウン部やスプリングライン部での観測される計測値は解析値と異なった値となったものと考えられる。

また、本線トンネルスプリングライン部での水平変位の計測値と解析値の比較を示した図-23は、他計測箇所である図-21および図-22の結果と比較し、最大変位値が計測値と解析値で最も大きい差が生じている。変位量の

大きな変化は、計測点を通過した後発生しているが、各計測点はAランプシールドと本線トンネルの離隔距離が約4m以下であり、ほぼ併設している状態である。スプリングライン部の水平変位は、併設するトンネルと位置が最も近く、掘進の影響により最も大きな変位量が発生する。実施工においては、掘削と同時に裏込め材が注入され、時間とともに硬化してトンネル躯体を含めて有限の剛性を有する結果となるが、解析においてはギャップ要素を強制変位させた後に外周部の節点が固定されている。このため、マシンテール通過後の新設のAランプシールドの施工プロセスに伴う既設本線トンネルとの相互作用が適切に再現されていないことから、特に新設シールド掘進の影響の大きいスプリングライン部の水平変位実測値との違いが大きくなったものと推定される。今後解析においては、裏込め注入材の硬化時間を再現するために、強制変位から外周部の節点の固定までの時間を解析に反映することで改善できると考えられる。

なお、ギャップ要素を強制変位させた後の外周部の節点の固定により、ギャップ要素が影響する計測点通過時においては、計測値を再現できた結果となった。

(2) 併設トンネルにおける離隔距離に着目した影響評価

2.(1)で述べたように、併設トンネルでは離隔距離に応じて既設のトンネルへの影響が変化するため、離隔距離に応じた影響範囲を定めている。ここでは、前述した地盤工学会による影響範囲の例を参考に、併設トンネルの三次元離隔変化における影響評価の手法と考え方について、実測と解析結果をもとに検討する。

Aランプシールドにおいては、前述したとおり、離隔が三次元的に変化しながら本線トンネルに近接し、平面的な離隔が最終的に約1.2mとなる。そのため、施工前の検討においては、Aランプシールドの掘進による本線トンネルへの影響を二次元はりばね解析によって確認し、検討結果を施工の管理値に反映して施工された。

ここで、三次元有限要素法解析によって算出した本線トンネルの鉛直および水平変位量、直径の変化量と実測結果を既設本線トンネルと新設Aランプシールドの離隔距離に対応させて整理した結果を図-25、図-26、図-27に示す。図中には、解析で得られた本線トンネルクラウン部での鉛直変位(実線)、スプリングライン部での水平変位(破線)の離隔に応じた変化にあわせて、計測点[2]、[3]における実測値をプロットしている。

図-25は、最終的にAランプシールドと本線トンネルの平面離隔距離が、約1.2mに近接した地点までのAランプシールドの掘進による本線トンネルの鉛直および水平変位量を示している。ここで横軸に示している本線とAランプの純離隔距離とは、図-19および図-20に示すよ

うにそれぞれの中心を結んだ線における、セグメント外殻間の距離である。鉛直変位は、上側の変位をプラスで示し、水平変位は、本線トンネル内側への変位をプラスで示している。解析における結果では、双方共に、離隔距離が小さくなるにつれて変位量がマイナス方向へ増大している。鉛直方向の変位は、掘進当初から緩やかにプラス方向へ変位しており、最終的な変位量は1mmとなり、非常に微小な変位量となっている。このわずかな変位は、Aランプシールドが本線トンネルに対して平面的に近接しながら深さ方向に掘進した際のマシン姿勢制御の影響により、本線トンネルクラウン部にわずかに変形

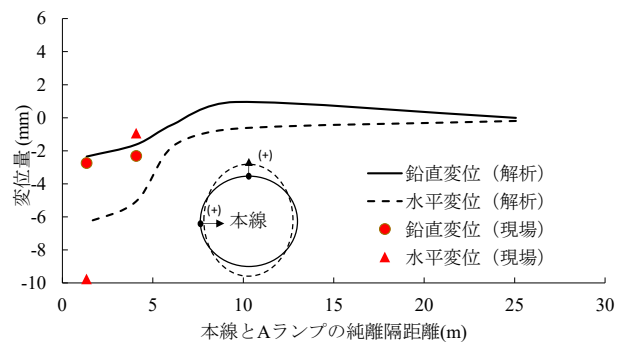


図-25 Aランプとの純離隔距離に応じた本線トンネルクラウン部、スプリングライン部の変位量の変化

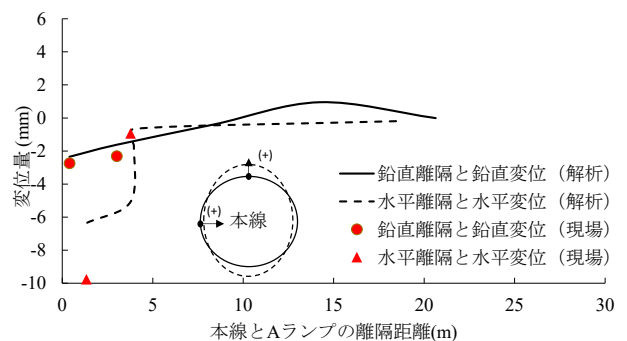


図-26 Aランプとの離隔距離に応じた本線トンネルクラウン部、スプリングライン部の変位量の変化

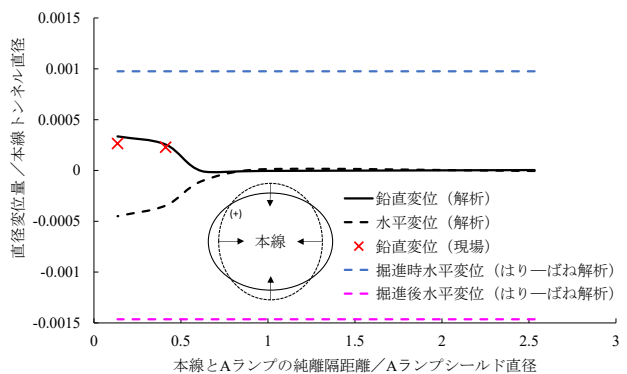


図-27 無次元化したAランプとの純離隔距離に応じた本線トンネル直径変化率の変化

が生じていることを示している。その後、離隔距離が約10m (Aランプシールド外径, 約1D) 付近から緩やかにマイナス方向に変位している。一方、水平方向の変位は、掘進当初から緩やかにマイナス方向へ変位し、鉛直変位と同様に、離隔距離が約1D 付近から顕著にマイナス方向に変位し、0.6Dを下回ると到達部まで大きく変位している。

図-26は、図-25と同様に最終的にAランプシールドと本線トンネルの平面離隔距離が、約1.2mに近接した地点までのAランプシールドの掘進による本線トンネルの鉛直および水平変位量を示している。図-25では横軸に示した本線とAランプシールドの離隔を純離隔で示した図に対し、離隔を水平離隔と鉛直離隔に分けて整理したものである。ここで水平離隔とは、本線トンネルとAランプのセグメント外殻の水平離隔距離を示し、鉛直離隔とは、本線トンネルとAランプのセグメント外殻深さの差を示している。鉛直変位は、上側の変位をプラスで示し、水平変位は、本線トンネル内側への変位をプラスで示している。

解析の結果は、図-25と同様の結果に近いが、水平離隔の水平変位に注目すると離隔距離が約4m付近で、少ない離隔変化に対し、変位が大きく発生していることがわかる。大きな変化が発生している部分の水平離隔距離は、約4.0mから約3.8mであり、大きく変化していない。一方、純離隔距離は約6.2mから約4.1mに変化した箇所であり、離隔距離が0.5D (DはAランプシールド外径) 以下となる地点である。水平および鉛直の離隔と純離隔を別々に整理した結果から、併設したトンネルの変位は、三次元に離隔が変化する場合、特に水平変位において平面離隔距離だけでなく、純離隔距離にも注目して影響を考えるべきである。

なお、図-25、図-26ともに鉛直および水平変位の実測値は、離隔距離が小さい方がより大きな変位を示し、更に水平変位が鉛直変位と比較してより大きな変位量を示しており、鉛直変位については解析値とほぼ対応した結果になっている。

図-27は、本研究で得られた成果を一般化するために、解析と実測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ものである。なお、離隔距離は、純離隔として算出している。計測値の変位量は、図-14、図-15に示した計測点[2]および[3]の本線トンネルのインバート部の鉛直変位の結果と計測点[4]および[6]本線トンネルのクラウン部の鉛直変位を合成することで、本線トンネルにおける鉛直方向の直径変形量を算出している。一方、水平方向の直径変形量は、Aランプシールドの逆側(本線トンネル進行方向右側)において計測を実施し

ていないことから、算出していない。なお、計測点[3]および計測点[6]は異なる箇所であるが、Aランプシールドと本線トンネルの離隔距離が大きく変わらないことから、同一箇所相当として算出している。一方、解析の変位量は、本線トンネルのどの位置においても変位量の算出が可能であることから、本線トンネルにおける上下と左右の解析結果の変位量を合成して算出している。

図中には、施工前に検討したはりばね解析による本線トンネルの構造耐力上許容される変形量に基づく直径変化率も参考のために示している。なお、はりばね解析の結果は、水平変位量が支配的な影響を与えるので、水平変位量のみを示している。また、はりばね解析の結果は、施工前検討時において、掘進時と掘進後にそれぞれ最大変位が発生すると考えていた。掘進時は、Aランプシールドの切羽圧によって、本線トンネルの内側への変位を想定してため、プラス側の値、掘進後は本線トンネルの外側への変位を想定してため、マイナス側の値となり、図示している。

この図には、計測点[2]、[3]における無次元化した離隔距離に応じた鉛直方向の直径変化率の実測値がプロットされているが、解析結果とほぼ対応した結果となっていることがわかる。また、本研究で用いた事例で算定された既設トンネルの構造耐力に対応する無次元化した離隔距離で決まる許容直径変化率も示されているので、既設トンネルが十分な耐力を確保できることが確認できる。

したがって、実測と解析結果をもとに得られた図-27は無次元化されていることから、シールドトンネル直径と併設トンネルの三次元離隔変化が異なる同種の併設シールドトンネルの事例においても、この図を利用して簡便に新設シールドによる既設トンネルの構造耐力を含む影響評価を行うことが可能となる。

図-27の適用範囲は、今回の検証においてAランプシールドの事例のみで評価していることから、新設するシールドトンネルおよび既設のシールドトンネルが10~12mであり、最短離隔距離が約1mの場合となるが、その他の事例を用いて更に検証することで適用範囲が広がると考えられる。

### (3) 併設トンネルの施工実績に基づく解析結果の評価

馬場出入口のトンネル工事は、三次元的に離隔が変化するシールドが実際に車両が通行している本線トンネルに近接しながら掘進する類を見ない工事である。このため、実際の馬場出入口トンネルの施工においては、併設トンネルの三次元離隔変化による、新設シールドトンネルの掘進の影響を事前に正確に把握することが困難であったため、近接施工による本線トンネルへの影響を懸念し、本線トンネルへの近接施工に伴い、出入口トンネルの掘進速度を落として掘進したことにより、長い施工期

間を要した。馬場出入口トンネルは、4つのランプシールドトンネルを1箇所ずつ掘進しているため、後行のランプシールドトンネルにおいては、施工済みのランプシールドトンネルの実績を参考にしつつ、掘進を進めた。そのため、最後に掘進したAランプトンネルの掘進では、施工済みのランプシールドトンネルの実績から、本線トンネルに近接するまで通常の掘進速度を保ちつつ掘進することを可能とし、施工期間を短縮している。

本研究で用いた解析は、トンネル掘削に伴う周辺部への影響を再現するギャップ要素を解析に導入することで、シールド工事に伴う地盤変形の影響の再現を可能としたが、併設トンネルの三次元離隔変化による掘進影響が明確になることで、対策立案の重要な指標となる。図-27に示した併設トンネルにおける新設シールドの近接影響評価を無次元化した結果の利用に加えて施工前に同種の三次元解析を行うことは、新設するシールドトンネルの掘進計画にも反映でき、解析の結果をもとに、適正な掘進速度で掘進することで、施工期間の短縮に寄与することも期待できる。

#### 4. まとめ

本論文では、既に供用されている本線トンネルに対して、併設トンネルの三次元離隔変化による掘進影響を各種の要因を考慮した三次元有限要素法解析と実測結果との比較をもとに解明し、シールドトンネルの近接施工時の影響評価方法について検討した。本研究によって得られた知見を要約すると、以下のとおりである。

1) 三次元有限要素法解析においては、既設のシールドトンネルに対し、併設トンネルの三次元離隔変化による掘進影響を算出する場合、トンネル掘削に伴う周辺部への影響を再現する、ギャップ要素を解析に導入することで、シールド工事に伴う地盤変形の影響をより適切に評価できることを示した。

2) 解析に導入するギャップ要素は、以下の項目で構成することで、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ができた。

[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

3) 併設するトンネルへの影響は、当初の検討において、近接するトンネル側の変形に伴い、遠隔側も変形すると考えられたが、実測と三次元解析の結果、近接するトンネル近傍側が大きく変化し、遠隔側においては既設トンネルの三次元的な剛性により微小な変形に留まり、ほぼ変形しないことを確認した。

4) 併設トンネルの三次元離隔変化による掘進の影響を

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位量を整理し、それぞれの離隔距離に対する影響確認の必要性を示した。

5) 本研究で得られた無次元化した離隔距離に応じた鉛直方向の直径変化率の関係図を利用して、シールドトンネル直径と離隔距離が三次元的に異なる同種の併設シールドトンネルの事例においても、三次元解析とあわせてこの図を利用して簡便に新設シールドによる既設トンネルの構造耐力を含む影響評価を行うことが可能となる。

6) 解析に導入するギャップ要素は、裏込め注入材の硬化時間、中折れ装置、コピーカッターの使用量を反映した改良を加えることで、より実際の施工過程を再現できるが、施工前の設定が難しいことから、検証が必要である。

**謝辞:** 本研究を進めるにあたり、施工前の検討内容についてご助言をいただいた清水建設(株)の関係各位に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 赤木寛一, 小宮一仁: 有限要素法によるシールド工事の施工過程を考慮した地盤挙動解析, 土木学会論文集, No. 481/III-25, pp. 59-68, 1993.
- 2) Afshani, A., Dobashi, H., Komiya, K. and Akagi, H.: Numerical analysis of the effect of earth pressure balanced shield tunneling on stress-deformation behavior, *Journal of JSCE*, Vol. 2, pp. 224-238, 2014.
- 3) 杉本光隆, Aphichat Sramoon: 施工実績に基づくシールド機動力モデルの開発, 土木学会論文集, No. 673/III-54, pp. 163-182, 2001.
- 4) 寺田雄一郎, 大恵勝, 水上博之, 吉田公宏: 近接したシールドの挙動に関する研究, 土木学会論文集 F1, Vol. 72, No. 3, pp. 123-135, 2016.
- 5) 宮川房夫, 川口廣, 水谷進, 吉村和彦, 粥川幸司: 泥水式シールドの超近接施工における地盤変状とその掘進過程を考慮した3次元FEM解析, 土木学会論文集, No. 528/VI-29, pp. 17-30, 1995.
- 6) 吉野修, 小宮一仁: 有限要素法による併設シールドの施工過程を考慮した掘削解析, 土木学会年次学術講演会公演概要集, 第3部, pp. 327-328, 2002.
- 7) 土木学会: トンネル標準示方書「共通編」・同解説/「シールド工法編」, pp. 65-66, 236-237, 2016.
- 8) 土木学会: トンネルライブラリー第23号セグメントの設計[改訂版]—許容応力度設計法から限界状態設計法まで—, pp. 34, 2010.
- 9) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル, 2002.
- 10) 首都高速道路株式会社: トンネル構造物設計要領(シールド工法編), pp. 2-32, 2018.
- 11) 地盤工学会: 地盤工学・実務シリーズ 28 近接施工, pp. 5-8, 2011.
- 12) 鉄道総合研究所: 都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル, 2007.
- 13) 寺山徹, 山本泰幹, 今田徹: シールドトンネルラン

- ブ接続部の非開削拡幅工法の開発と設計土圧, トンネル工学報告集, 第 14 巻, 土木学会, pp. 367-374, 2004.
- 14) Liu, H. Y., Small, J. C. and Carter, J. P.: Full 3D modelling for effects of tunneling on existing support systems in the Sydney region, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, pp. 399-420, 2008.
- 15) Rowe, R. K. and Kack, G. J.: A theoretical examination of the settlements induced by tunneling: Four case histories, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, No. 2, pp. 299-314, 1983.
- 16) 今田徹, 元山宏, 三木克彦, 金井誠: シールドトンネル覆工荷重に与えるゆるみの影響に関する研究, 土木学会論文集, No. 439/III-17, pp. 79-88, 1991.
- 17) Lee, K. M., Rowe, R. K. and Lo, K. Y.: Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29, No. 6, pp. 929-940, 1992.
- 18) 土木学会: トンネル標準示方書「共通編」・同解説 / 「シールド工法編」, pp. 152, 2016.
- 19) 土木学会: トンネル標準示方書「共通編」・同解説 / 「シールド工法編」, pp. 211-212, 2016.
- 20) Ingles, O. G. and Metcalf, J. B.: *Soil Stabilization: Principles and Practice*, 1972.
- 21) 土木学会: トンネル標準示方書「共通編」・同解説 / 「シールド工法編」, pp. 53, 2016.

(Received November 9, 2020)

(Accepted July 20, 2021)

## RAMP SHIELD TUNNELING EFFECTS ON AN EXISTING PARALLEL TUNNEL WITH 3D SEPARATION VARIATIONS

Keiichiro ENDO, Hirokazu AKAGI, Alireza AFSHANI, Hiroshi DOBASHI  
and Grant HASAN

This paper studies the interaction effects between a newly excavated shield tunnel near the Baba entrance of the Metropolitan Expressway and the existing twin deep tunnels of the Yokohama Kita Line. It was a challenging issue to understand the influence of the proximity tunnel excavation of the Baba entrance on the existing main tunnels of the Yokohama Kita line.

In this study, a three-dimensional numerical model of Baba entrance underground ramp is prepared. In the model, the excavation of new tunnel route is divided into four zones according to the (a) degree of tunnel alignment in vertical and horizontal directions, (b and c) volume and magnitude of grouting pressure, a prescribed displacement was introduced to the soil around the tunnel in each zone. The predicted lining deformation of existing main tunnels induced by new excavation was compared with the field measurement results. The proximity tunneling effects are discussed by using the comparison between the numerical simulation results and the field observations with the 3D variations of the separation in the twin tunnels.