

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

2022年7月

遠藤 啓一郎  
Keiichiro ENDO

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

2022年7月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

遠藤 啓一郎  
Keiichiro ENDO

# 目次

<b>第1章 序論</b> . . . . .	1
1.1 本研究の背景 . . . . .	1
1.1.1 シールド工法の歴史と現状 . . . . .	1
1.1.2 首都高速道路におけるシールド工法の採用と課題 . . . . .	3
1.2 既往の研究 . . . . .	5
1.2.1 施工過程を考慮した既往の研究 . . . . .	5
1.2.2 併設シールドトンネルに対する既往の研究 . . . . .	9
1.3 本研究の目的と研究の対象工事 . . . . .	14
1.3.1 本研究の目的 . . . . .	14
1.3.2 研究の対象工事 . . . . .	16
1.3.3 シールドトンネル工事の実績と対象工事の比較 . . . . .	22
1.4 論文の構成 . . . . .	23
<b>第2章 近接施工による影響の整理</b> . . . . .	27
2.1 近接施工の概論 . . . . .	27
2.2 新設シールドトンネルの近接影響 . . . . .	32
2.3 首都高速道路における併設トンネルの近接影響の考え方 . . . . .	34
2.3.1 近接影響の検討方針 . . . . .	34
2.3.2 併設トンネルの近接影響を踏まえた設計 . . . . .	36
<b>第3章 馬場出入口トンネル掘進による施工前検討の概要</b> . . . . .	39
3.1 馬場出入口の各シールドトンネルの概要 . . . . .	39
3.2 二次元 FEM を用いた影響検討 . . . . .	46
3.2.1 本線トンネルに対する近接影響の検討方針 . . . . .	46
3.2.2 常時断面力の算定 . . . . .	47
3.2.3 増分断面力の算定 . . . . .	54
3.2.4 算定結果 . . . . .	59
3.3 本線トンネルの変形量を考慮した検討 . . . . .	64
3.3.1 検討の概要 . . . . .	64
3.3.2 解析諸条件 . . . . .	65
3.3.3 解析結果 . . . . .	69
3.4 事前検討を踏まえた A ランプシールドトンネルの施工 . . . . .	72
3.4.1 シールドマシンの仕様 . . . . .	72

3.4.2	A ランプシールドの掘進概要	74
3.4.3	A ランプシールドの掘進管理	76
3.4.4	曲線部の施工	78
3.4.5	裏込め注入工の施工	79
3.4.6	A ランプシールド掘進時の対応	81
3.5	事前検討から施工までの評価	88
<b>第4章</b>	<b>三次元解析の概要と結果</b>	<b>91</b>
4.1	併設トンネルの特徴を踏まえた解析検討	91
4.1.1	三次元解析実施の背景	91
4.1.2	三次元解析手法の選定	92
4.2	三次元解析モデルの構築	98
4.2.1	解析に使用した条件	98
4.2.2	解析ステップ	114
4.2.3	解析の試算結果	115
4.2.4	出入口トンネルの掘削解析におけるギャップ要素の導入	118
4.2.5	出入口トンネルの掘削解析におけるギャップ要素諸係数の決定	127
4.3	出入口トンネルの掘進が本線トンネルに及ぼす影響の評価	131
4.3.1	解析結果の比較に使用した現地計測箇所の概要	131
4.3.2	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との比較	133
4.3.3	本線トンネル内に設けた変位計測点との比較	138
<b>第5章</b>	<b>離隔距離に基づく影響評価</b>	<b>143</b>
5.1	二次元解析と三次元解析の比較	143
5.2	二次元はりばね解析による事前検討結果の評価	145
5.3	併設トンネルにおける離隔距離に着目した影響評価	146
5.4	無次元量の関係図を用いた近接影響の評価	151
5.5	併設トンネルの施工実績に基づく解析結果の評価	153
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>154</b>
	謝辞	157
	参考文献	158

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

### 1.1.1 シールド工法の歴史と現状

近年、高速道路や一般道路において新たに建設する路線は、トンネル構造によって構築される事例が増えている。道路におけるトンネル構造は、一般的に山や自然の障害物を通過するために用いられるが、その他にも周辺環境への配慮や都市空間の有効活用の観点からも採用されている構造である。トンネルの工法は、開削工法、山岳工法、シールド工法、沈埋工法などがあるが、それぞれに特徴があり、特に都市部においては、地上への影響が他の工法と比べて少ない、シールド工法が多く採用されている。

シールド工法は、1818年にフランス人の技師である Marc Isambard Brunel によって発明され、1825年に世界で初めて適用された。日本国内においては、1917年に国鉄羽越線折渡トンネル工事にて圧気工法併用の手掘り式シールド工法が初めて採用され、1936年には世界初の海底鉄道トンネルである、関門トンネルで使用し、その後本格的に使用している。また日本では、土圧式シールド工法や泥土圧式シールド工法を開発するなど、世界でも高いシールド技術を持っており、制約が多い施工が困難な事例も増えている。例えば、急曲線な施工においては、曲線半径 17m の施工事例<sup>1)</sup>や土被りが 66m となるために曲線半径 50m および勾配 20%を有する事例<sup>2)</sup>等があり、現状の施工状況に伴い、シールド技術開発も進んでいるところである。

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、特に都市内においては、工事のために使用可能な土地が限られていることから、地上に存する街路および構造物、加えて多くの民家に対して施工の影響を考慮する必要がある。また現在、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。シールド工法によって構築されるトンネルの中で、特に道路シールドトンネルは、複数の車線により直径 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。シールドトンネルの構築による影響は、他のトンネル工法と比較して小さいと考えられているが、トンネル径が大きい場合や近接構造物が多い場合は、地盤変状による影響が大きいため、特に留意が必要である。

また、近接構造物に対しては、制約条件や特殊な状況の場合においても安全に工事を進めるために、掘進による地盤の挙動を踏まえた近接構造物に対する影響を正確に把握することが重要である。掘進による地盤の挙動は、施工前にこれまでの施工事例等を参考として影

響を検討し、施工計画に反映させることが一般的である。しかし、地下化が進むにつれて近接する構造物も増加し、特殊な条件下となるシールドトンネルの施工は、これまでの施工事例が少ないことから、掘進による影響算出手法の確立には至っていないのが現状である。

## 1.1.2 首都高速道路におけるシールド工法の採用と課題

首都高速道路は、都市内に高速道路を構築していることから、構造比率が図 1.1.2-1 に示すように 95%を占めており、高速国道と比較して 3 倍以上の割合となっている。その中で、トンネル構造物は全体の 14%を占めており、全体の構造比率に対し、高架橋に続いて長い延長であり、総延長は 47.3km となる。

首都高速道路におけるトンネル構造は、開削工法、沈理工法、山岳工法、シールド工法によって、それぞれ各現場に適した工法を用いて構築されており、その中でもシールド工法が最も長く、トンネルの総延長の半分以上を占める 28.9km となっている。また、首都高速道路のシールドトンネルは、他の工法に対してトンネル 1 本あたりの延長が長いことが特徴である。採用されている箇所が最も多い開削トンネル工法においては、1 本あたりの平均トンネル延長が 0.4km であることに対し、シールドトンネル工法は 4.1km となっている。これは都市内で大断面シールドトンネルを構築する場合には、地上の制約から開削トンネルにて構築する立坑を極力少なくする必要があり、掘進が長距離となっていることが要因である。

首都高速道路におけるシールド工法は、中央環状新宿線において初めて採用された。中央環状新宿線は、図 1.1.2-2 のとおり、大きく高速 4 号新宿線から高速 5 号池袋線間、高速 3 号渋谷線から高速 4 号新宿線間に分け、シールドトンネルの掘進は 6 つの地区に分けて掘進した。その中で、中落合地区で採用したシールド工法は、施工時点で世界最大となるシールド外径 12.02m の泥土圧式シールド工法であった。当時の大断面シールドは、泥水式シールド工法が主流であったが、都市内特有の課題である用地に制約があり、泥水式シールド工法を掘進するための設備を配置する十分な場所を確保できなかったことから、泥土圧式シールド工法を採用した。

中央環状線は、全線を通じて高速 5 号池袋線から高速湾岸線にかけて、シールド工法を主に採用したトンネル構造となっている。建設は高速 4 号新宿線から高速 5 号池袋線間から始まり、その後、高速 3 号渋谷線から高速 4 号新宿線間、高速 3 号渋谷線から湾岸線間と順番に施工を進めた。トンネルを構築した主な地層は、N 値 50 以上の硬質な地盤であり、高速道路本線として運用することから、縦断勾配も緩やかであった。しかし、いずれの施工箇所も都市内であるため、電気、ガス、上下水道、通信等のライフラインが多く埋設されていることから、既設地下構造物と近接することが多くあり、各企業者の取り決めに沿った多くの近接影響を検討してきた。また、事前の影響検討においては、既設構造物に対して影響を与える結果が算出される場合も多く、その場合は必要な対策を講じ、安全に施工を進めてきた。

また現在、首都高速道路では、2020 年 3 月に開通した横浜北西線以降、シールドトンネルを建設していないが、高速都心環状線の日本橋区間において、2019 年 10 月に高架橋にて構築されている高速都心環状線を地下化する改築事業が事業化され（以下、日本橋区間地下

化事業) , 2035 年度までにシールドトンネルを含めた地下化に伴う構造物を構築し, 2040 年度までに既設の高架構造である都心環状線を撤去する予定である. 日本橋区間地下化事業における地下化する範囲においては, 多くの埋設されているライフラインに加え, 地下鉄や地上の橋梁など, 多くの構造物が存在している. また, 地下化にあたっては, 大部分をシールド工法によって構築する予定であり, シールド工法の範囲は, 多くの既設構造物を避けつつ構築することから, 平面線形および縦断線形がこれまで以上に急になっている. 日本橋区間地下化事業では, 線形が悪条件の中で安全に施工するために, 全ての近接構造物に対し, 掘進による影響を事前に適切に把握することが, 大きな課題となっている.

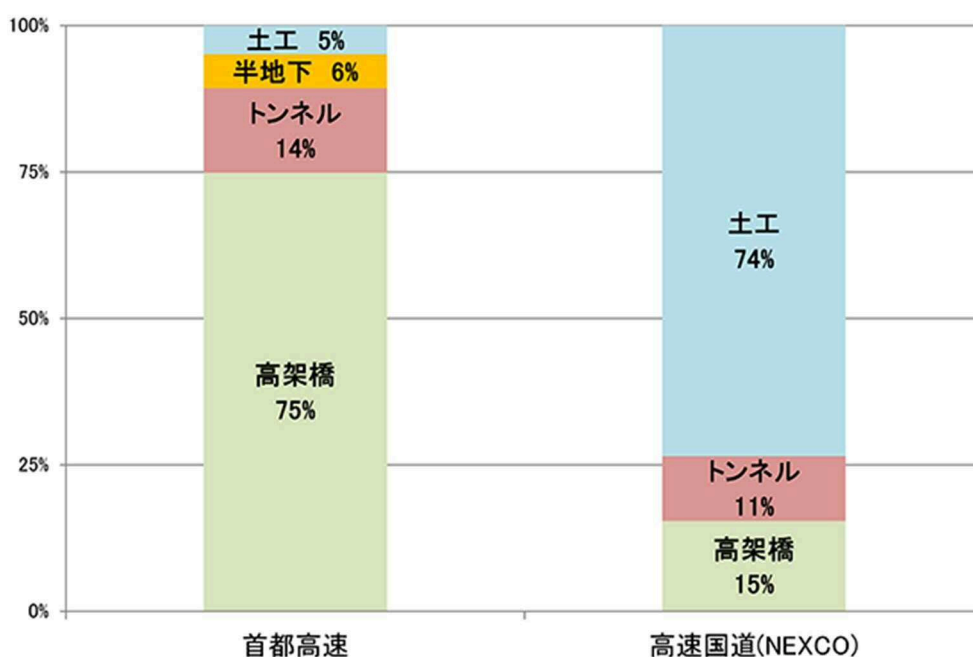


図 1.1.2-1 首都高速道路の構造比率 (2021 年 4 月時点)

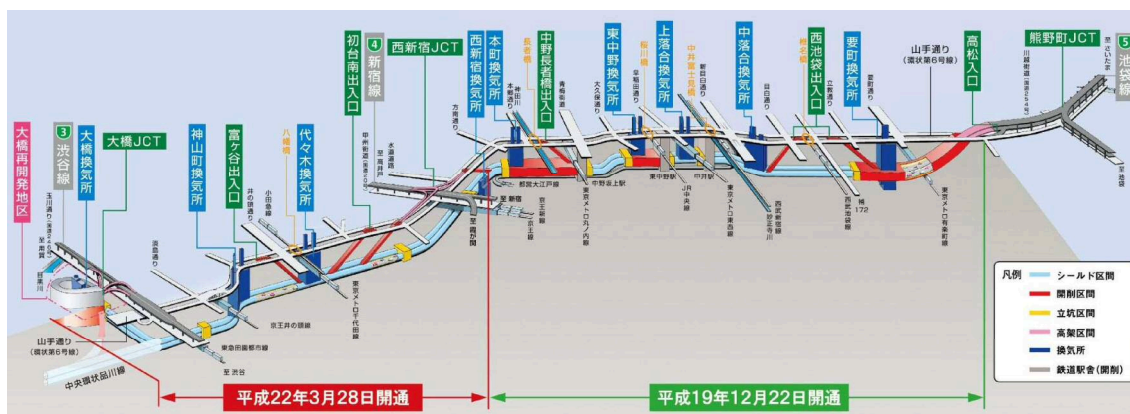


図 1.1.2-2 首都高速中央環状新宿線概要図



## 1.2 既往の研究

### 1.2.1 施工過程を考慮した既往の研究

シールド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（以下、FEM）を用いた数値解析によって算出されることが多い。FEMを用いた数値解析では、変形挙動を再現するにあたり、特に施工条件を適切に考慮することが重要と考えられている。

シールドトンネルの掘進は、シールドマシンによる掘進の挙動や掘進に伴う地盤内の特異な挙動など、複雑な要素を多く含んでおり、施工場所によって変化するため、FEM解析にて一概に全ての挙動を正確に再現することは困難である。しかしながら、施工条件を適切に考慮して再現することは、事前に正しい挙動を把握するうえでは不可欠であり、各現場の特性に応じて適用していく必要がある。

FEM解析においては、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、赤木と小宮は三次元FEMを用いて、ジャッキ推進力によるシールド機の掘進とシールドマシン切羽における地盤の取り込み状況を図1.2.1-1のようにモデル化することで、地盤の変位状況、間隙水圧の変化状況およびシールド機の姿勢の変化状況は実測結果に近い値を算出した<sup>3)4)</sup>。シールド機の掘進は、実際のシールド工事で施工されたジャッキ推進力およびジャッキパターンをシールド機要素の後方の該当する節点に節点力として作用させることによって表現し、地盤の取り込み状況は、掘削要素を等方な弾性体として弾性係数を決定し、各計算ステップにおける掘削要素の体積変化と形状変化量から取り込み量を再現した。これによってシールド機通過中の地盤の変形、間隙水圧の変化はシールド機掘進時に大きく発生し、シールド機掘進時のシールド機の姿勢の変化に強く依存することを解明している。

また、地盤の取り込み状況は、赤木と小宮の結果を用いて、吉野と小宮は現場施工管理への適用の観点から、解析結果を用いて掘削土量を評価する方法を提案している。解析パラメータによるシールド機の掘進速度、掘削土量に及ぼす影響を検討し、解析結果が現場施工に適用できることを示している<sup>5)</sup>。

シールドトンネルの施工過程においては、シールド機の挙動も複雑であり、杉本とAphichantは、実際のシールドトンネル施工における、シールドマシンの挙動を再現するために、シールド機動力学解析モデルを開発した<sup>6)</sup>。論文内で提案されたシールド機動力学モデルは、パラメータに適正値を入力することで、シールド機挙動を合理的に表現できるものとなっている。この研究において開発されたモデルは、裏込め注入によるシールド機の挙動に与える影響についても用いられている<sup>7)</sup>。

一方で、宮川らは裏込め注入による影響に着目し、図1.2.1-2に示すモデルの概要図のとおり、シールド機後方のセグメントおよびセグメントと地盤の空隙を埋める裏込め注入材

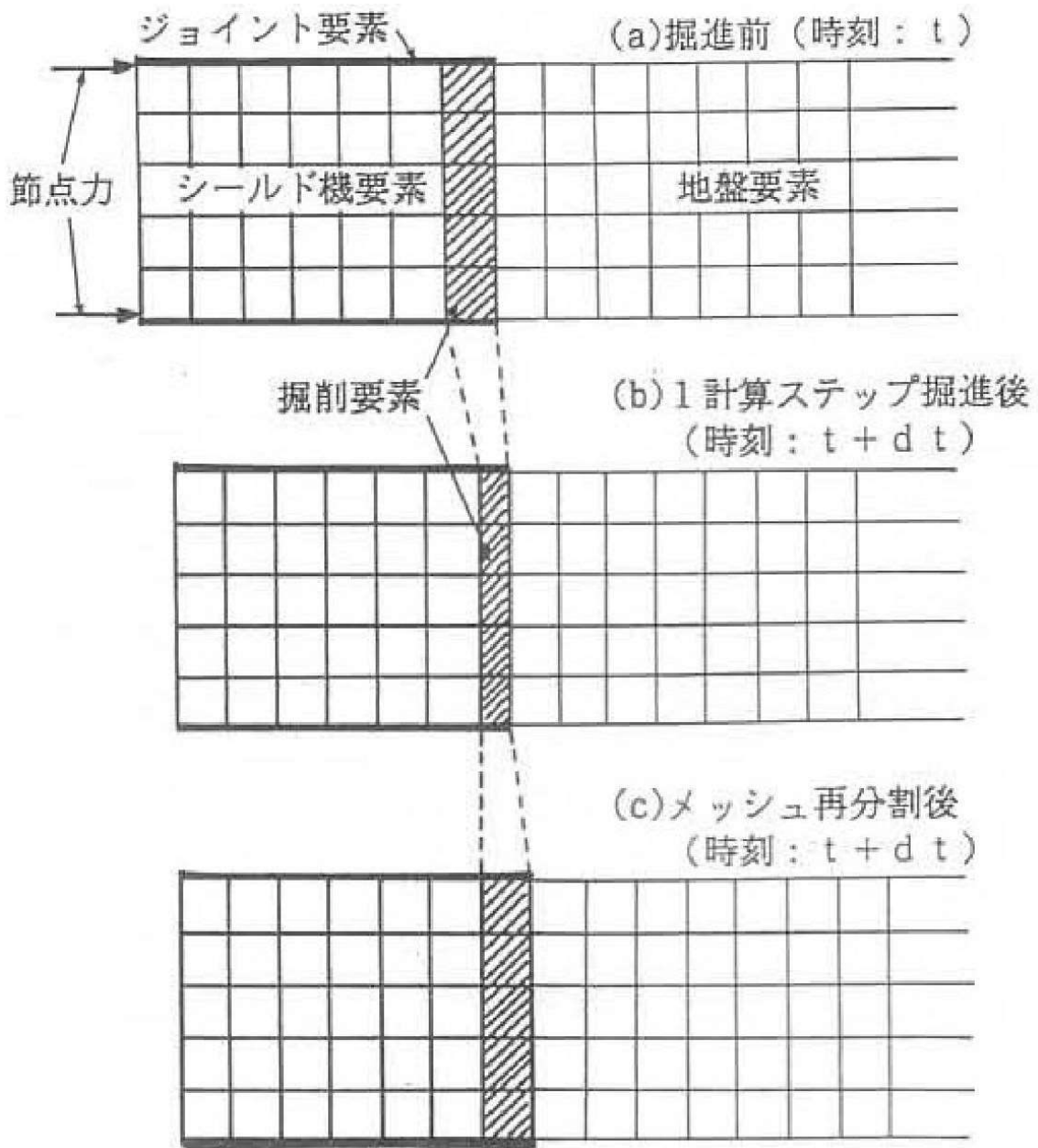


図 1.2.1-1 掘削状況のモデル化<sup>4)</sup>

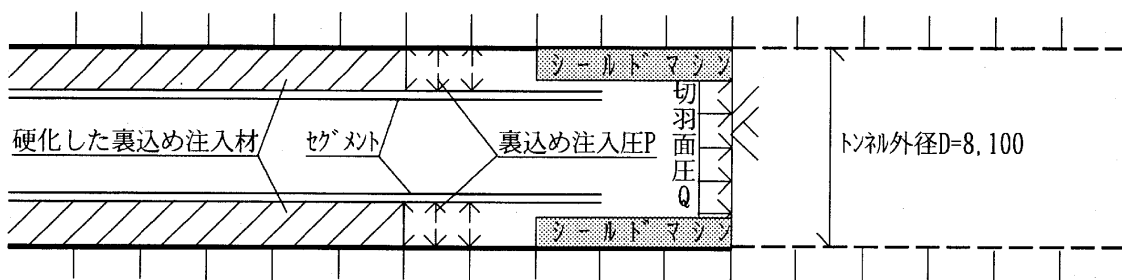


図 1.2.1-2 宮川らの施工過程のモデル化<sup>8)</sup>

をモデル化することで、周辺地盤の変形状態を表現しており<sup>8)</sup>、地盤の挙動においては、Alireza らがシールド掘削中における地盤内の排水条件等を三次元 FEM 解析に反映することで、地盤の挙動をより正確に把握できることを提案している<sup>9)</sup>。

その他にも、FEM 解析においては、より忠実に施工過程を再現した解析を行うことを目的として、シールドトンネルの掘進の施工過程によって生じるシールド機とセグメント間の境界の接触問題として取り扱う検討もなされている<sup>10)~12)</sup>。これは FEM において、事前に接触位置を想定できる場合に利用していたギャップ要素、インターフェイス要素、ジョイント要素に代わり、事前に接触位置を想定できない場合への適用を考慮した検討である。近年のシールドトンネルの施工における課題の一つである、近接構造物に与える影響等の問題に対する解決策として、シールド機の掘進に伴うシールド機のスキンプレートと周辺地盤との接触摩擦の影響を考慮し、接触面に摩擦係数を設定して解析を行うことで、接触問題の数値解析が可能であることを具体例で示している。

シールドトンネルにおいては、このように FEM 解析においてシールド機の掘進による施工過程の再現が多く研究されており、実際の施工に近い挙動を再現することの重要性を示している。しかしながら、複雑な施工過程を全て完全に再現する解析事例はなく、実施の施工における特徴を踏まえながら、解析モデルや手法などを検討する必要がある、特殊な施工状況においては、特に留意する必要があるといえる。

FEM 解析ではシールドトンネルの掘削における施工過程を考慮する一方で、施工時の荷重の考慮についても検討されている。施工時の荷重はセグメントの設計において特に留意する必要がある、矢萩らは施工時荷重の影響が大きいと考えられる計測した現場の結果を用いて、施工時荷重の影響を三次元 FEM 解析によってシミュレーションを行っている。対象とした施工時荷重は、ジャッキ推力、テールシールドの拘束力、裏込め注入圧を対象として解析結果と現場計測結果を比較し、検証することで局部的に作用する施工時荷重の影響を評価した<sup>13)</sup>。更に同様の施工時荷重に加え、ジャッキ偏心量および偏角を踏まえた検討もされている<sup>14)</sup>。また、シールドトンネル構築時の様々な施工時荷重の中で、長屋らはセグメント組立時に着目し、セグメントの組立時からテール通過時までの施工時荷重を、セグメントリングを梁要素、地盤、形状保持装置、固化した裏込め注入材等の抵抗を地盤ばねによって表現した簡便な 2 リングモデルを提案した<sup>15)</sup>。

その他、シールドトンネルは、近年の大深度化やセグメントの幅広化等に加え、構造物の高齢化に伴う維持管理性にも配慮する必要がある、二次元接触解析および三次元 FEM 解析を組み合わせることによって、施工時荷重によるセグメントの応力分布やひび割れの発生位置を検討する手法も提案されている<sup>16)</sup>。

一方、シールドトンネルの施工後においても検討が必要な場合もあり、本研究の対象工事である馬場出入口のように、シールドトンネルを拡幅するために用いる切上げ工法は、複雑な変形挙動を示すため、土橋と桑野のように三次元 FEM 解析を用いて施工過程を考慮した図 1.2.1-3 の一例に示すステップ解析を行い、シールドトンネルに対する作用荷重の変化と

変形の相互作用を表現している事例もある<sup>17)</sup>。

これらの研究においては、シールドトンネルの掘進による地盤の挙動や切掘り工法によって生じる影響を正確に把握するために、施工過程を考慮することの重要性を示しているとともに、FEM 解析に施工過程を考慮することの難しさも示している。FEM 解析における施工過程の再現は、大きくモデルへの反映と解析ステップの考慮によるものが多いが、裏付ける根拠は現場計測値を用いることから、正確かつ必要な計測を要するため、計測値を用いて検討することを計測前に見据え、計測計画に反映する必要がある。

シールドトンネルの構築による地盤の挙動は複雑であるため、より詳細に現場状況を再現するためには、現場条件に適した考慮すべき施工過程の検討をし、複数の施工過程のそれぞれを、FEM 解析に反映した結果と計測値を比較することで、信頼性および正確性を確認し、整理する必要がある。

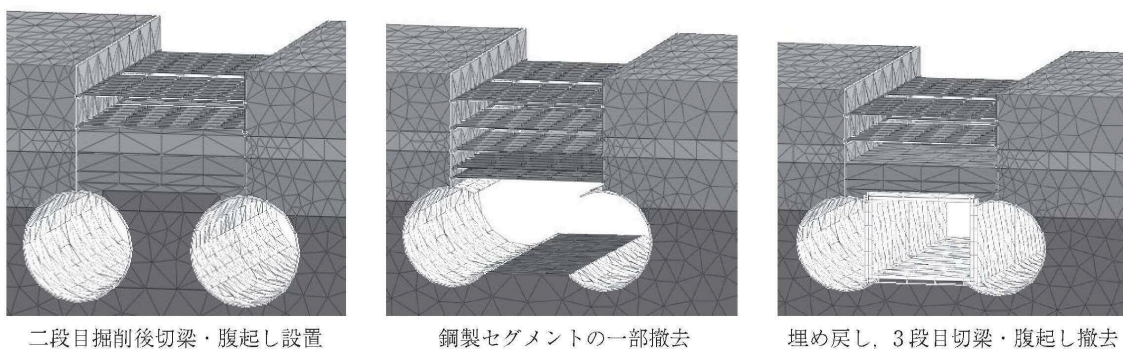


図 1.2.1-3 ステップ解析の一例<sup>17)</sup>

## 1.2.2 併設シールドトンネルに対する既往の研究

シールドトンネルの計画においては、周辺への影響をなるべく少なくするために、既設の構造物を確認し、可能な限り隔離を設けることで、影響を最小限とすることが望ましい。しかしながら都市内においては、既設構造物も多く、既に構築されているシールドトンネルと近接して併設する事例も近年においては増加している。併設するシールドトンネルはインフラ構造物が多いため、後続するシールドトンネルの構築による先行したシールドトンネルに対する影響が懸念されてきた。都市内においては、地下化が進んでいたことから古くから検討されているが<sup>18)</sup>、今後は都市内以外においても地下化の増加が想定される。地下化による影響は、例えば道路トンネルのような大断面のシールドトンネルにおいて、より一層大きいと考えられ、併設シールドトンネルの影響を事前に把握するために、これまで様々な手法で検討されている状況である。

併設シールドトンネルでは、後続するシールドトンネルの掘進の影響を考慮する必要があり、特に施工時荷重による影響が大きいと考えられている<sup>19)</sup>。木村らは施工時荷重の地盤を介して先行したトンネルへ作用することに着目し、はりばねモデル<sup>20)</sup>を用いて軟弱地盤における解析手法を提案した<sup>21)</sup>。なお、解析手法は実験結果によって計算に用いる荷重と地盤ばね定数を検討し、先行したトンネルの挙動の把握に努めている<sup>22)</sup>。また、堀地らは同様に軟弱地盤を対象とし、シールドトンネルの直交異方性に着目し、局所偏荷重作用区間を均一な円筒シェルと仮定して等価弾性ばね定数を与えた疑似三次元骨組構造モデルを提案している<sup>23)</sup>。このような軟弱地盤を対象とした検討は、シールドトンネルが河川を横断する時などに使用されることもあり、施工環境も悪いことから検討が進められてきた。

近年においては、地下化の影響から比較的深い良質な地盤にシールドトンネルを施工する場合もあり、寺田らはトンネル縦断方向に分散ばねの考え方を新たに取り入れ、良質地盤を対象とした併設シールドトンネルの施工時荷重の影響を検討する解析手法を提案した事例もある<sup>24)</sup>。

このような研究結果を通じて、現在においては、併設シールドトンネルの影響を考慮したセグメントの設計において、はりばねモデルによる解析手法が標準的に用いられている<sup>25)</sup>。また、実際の設計においても特にセグメントにおいては、近年の建設コストの縮減や断面の縮小等による損傷や耐久性低下の観点から注視されている。なお、設計に用いるモデルは、松本らによってモデルの比較検討もなされているように<sup>26)</sup>、施工条件等を適切に設定することに留意する必要がある。

併設シールドトンネルの影響は、三次元 FEM 解析によっても検討されており、宮川らは、三次元 FEM 解析を用いて、新たに解析手法を提案した<sup>27)</sup>。三次元 FEM においても図 1.2.1-2 に示した裏込め注入の施工過程も考慮され、計測結果と比較し、概ね一致の結果が得られている。また、吉野と小宮は、赤木と小宮による解析モデルを用いて、併設シールドの施工過程を考慮した三次元 FEM 解析を行い、個々のシールドトンネルの掘削が地盤変状等と与

える影響や地盤変状等を確認している<sup>28)</sup>。このように、併設シールドトンネルの影響を確認する三次元 FEM 解析における計測結果と解析結果の一致の背景においては、1.2.1でも述べた、施工過程を考慮することが重要であるといえる。

併設シールドトンネルは、地下化に伴い今後特殊な状況も増えると想定され、これまでもにおいても例えば京都市営地下鉄東西線においては、約土被り 30m の中で外径約 5.8m の 4 本の全てのシールドトンネルが図 1.2.2-1 のように併設した事例がある。この事例においては、施工中に計測を行い、施工結果を踏まえて解析モデル、応力開放率、地盤物性値を整理し、解析的に再現することで、影響予測手法を整理した<sup>29)30)</sup>。

解析は研究の信頼性を確認するためにも現場の実測結果を用いることが多いが、記録として残した実測結果が少ないことから、実験による検討手法も用いられている。舟橋らは併設シールドトンネルの影響について、模型地盤を作成したうえで、3種類の離隔距離で影響を確認し、離隔距離の影響と先行したトンネルの剛性の影響について確認した<sup>31)</sup>。また、小笠原らは、都市内においては、併設するシールドトンネルが軟弱地盤となる可能性もあることから、遠心载荷実験によって砂地盤と粘性土地盤を実験によって比較した。トンネルの掘進再現は、図 1.2.2-2 示す掘進装置によって模擬し、さらに弾性 FEM 解析によってシミュレーションを実施することで、解析結果と比較することで先行したトンネルの曲げモーメントの変化を確認している<sup>32)~35)</sup>。また、併設トンネルの影響を検討する実験は、様々な状況に対応するために併設トンネルの位置関係と距離を変化させることによって、トンネルと地盤、周辺構造物間の相互作用を実験結果と解析結果で整理している事例もある<sup>36)</sup>。

このように、併設するシールドトンネルにおける既往の研究は、特殊な事例も含め、研究されているが、特に大断面であり、かつ特殊な線形等の併設シールドトンネルの研究は少なく、併設する両トンネルの線形は単純であり、複雑で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シールド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

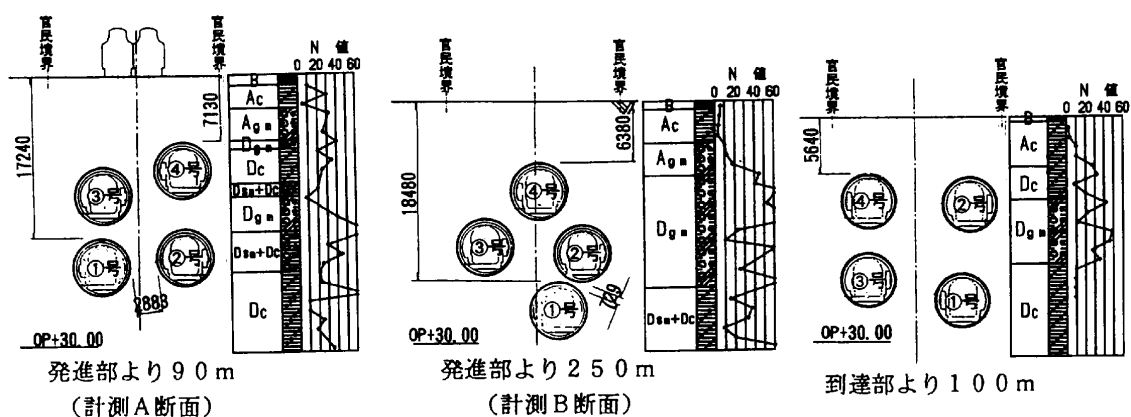


図 1.2.2-1 4 本併設シールドトンネルの断面図<sup>29)</sup>

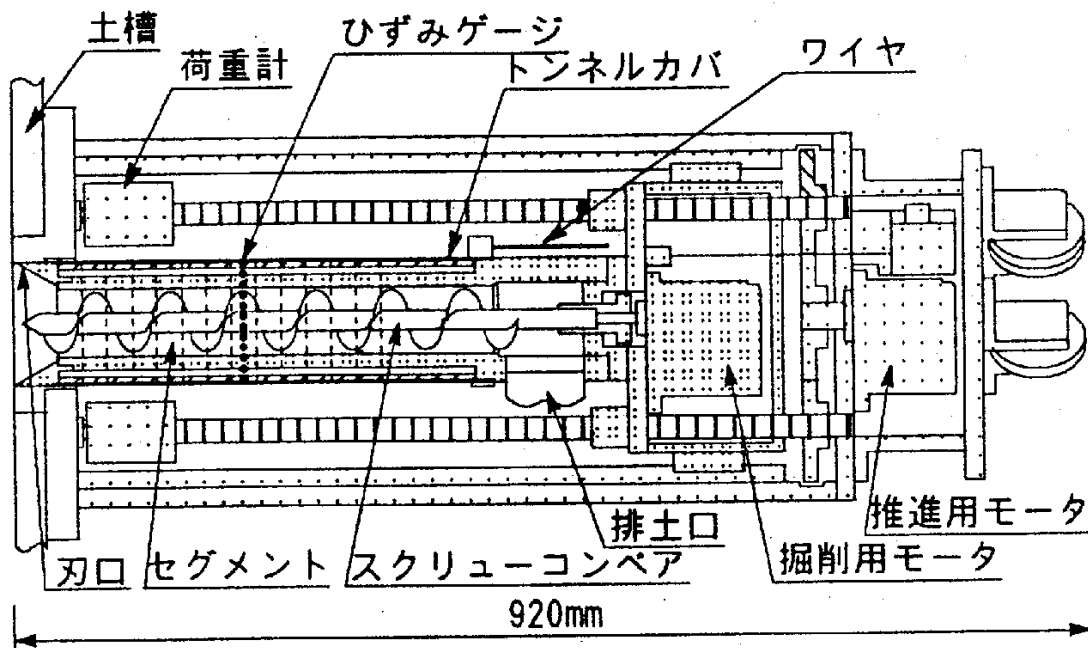


図 1.2.2-2 トンネル掘進装置概要図<sup>35)</sup>

のと考えられる。一般的なシールドトンネルの影響検討は、二次元 FEM 解析で再現が可能だが、複雑な線形を FEM 解析で正確に再現するためには、三次元 FEM 解析が必要となり、モデル化も複雑であることから、解析に要する労力も大きい。また、二次元 FEM 解析で再現するには、定めた断面にてモデル化するため、最も影響がある断面を想定して検討することになり、連続して構築されるシールドトンネルの掘進による影響を正確に再現しているとは言い難い。

実際にこれまでの道路トンネルの工事においては、出入口や分合流部などを構築するにあたり、線形が変化するため、図 1.2.2-3 から図 1.2.2-5 に示すように地表面に影響が少ないシールドトンネルを用いることなく、非開削による切上げ工法や併設したシールドトンネルを切抜げて拡幅する技術を採用していることが多かった<sup>37)~39)</sup>。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。

また、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 FEM 解析による検討が多く用いられている。しかし、都市内の地下構造物の増加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 FEM 解析を用いた検討事例も増えてきている。FEM を用いた数値解析は、一般的に二次元と三次元を比較した場合、三次元解析では要素数が増大し、変数が幾何級数的に増大することから、得られる解析精度は高くなる。そのため、トンネルの施工ステップを考慮した検討手法として、正確に影響を確認するためには、三次元 FEM 解析を用いた手法が望ましいが、これまでの実績および簡便に算出でき

る二次元 FEM 解析による検討が効率的と考えられている。しかし、今後増加すると考えられる特殊な条件による施工に対し、望ましい FEM 解析手法として、二次元と三次元の結果を具体的に比較することで検証した事例は見当たらないことから、特徴を踏まえた併設シールドトンネルにおける適切な影響検討手法については、解明されていないと言わざるを得ない。

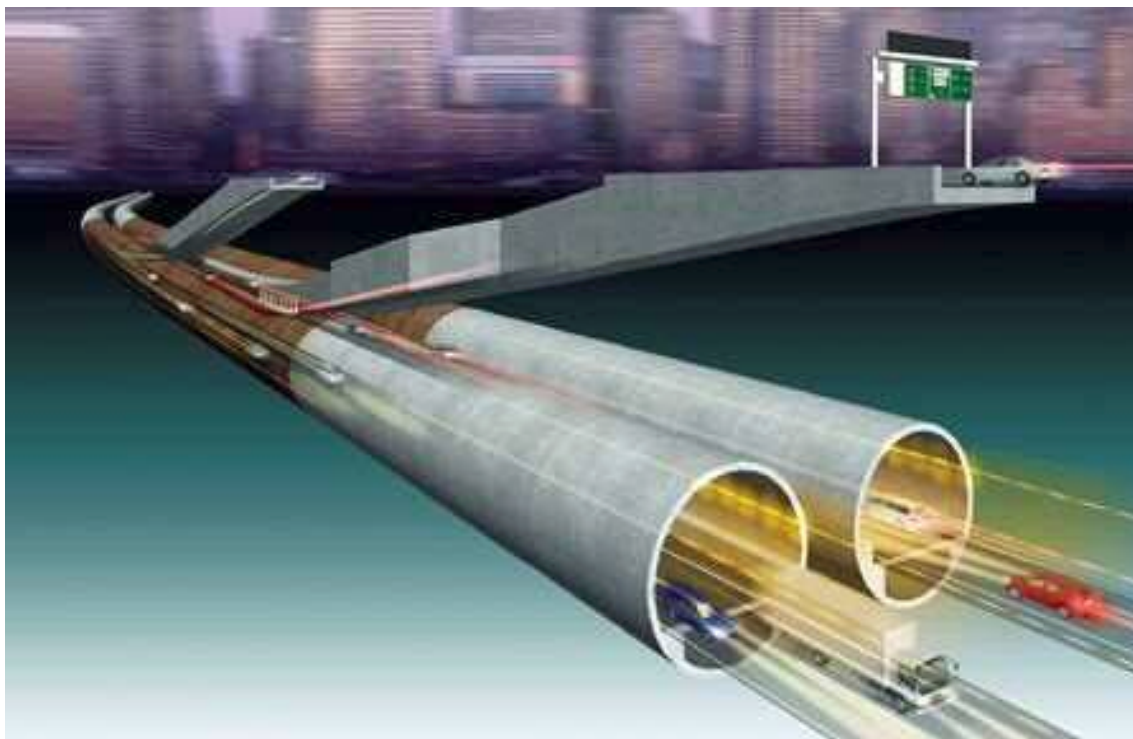


図 1.2.2-3 中央環状品川線五反田出入口地下イメージ図



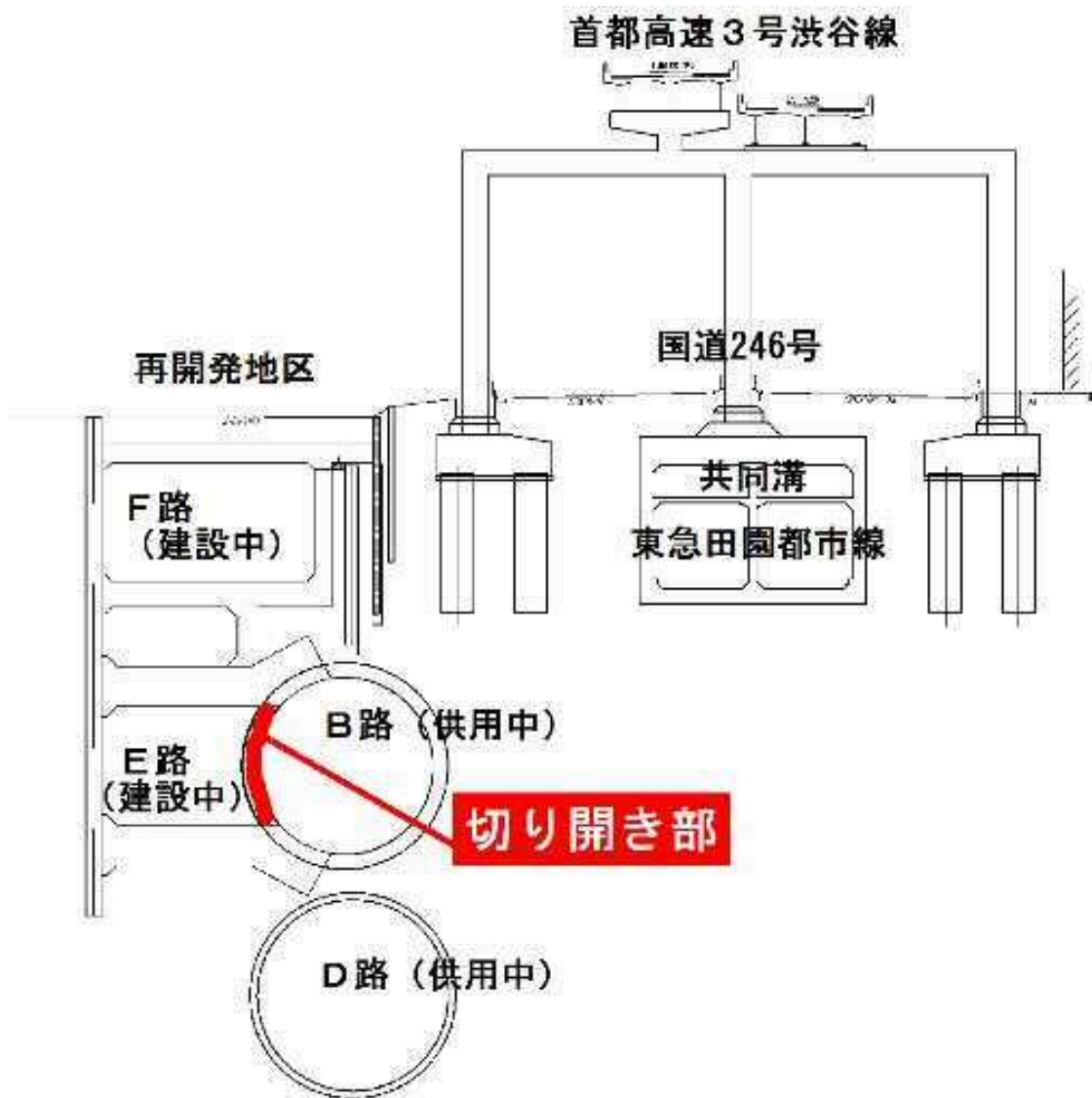


図 1.2.2-4 中央環状線における供用中路線の切拡げ



図 1.2.2-5 中央環状線品川線における連結路の構築

## 1.3 本研究の目的と研究の対象工事

### 1.3.1 本研究の目的

本研究では、研究の背景を踏まえた、今後増加すると考えられる、大断面の新設シールドトンネルが既設構造物に対し、複雑な線形を有して離隔が変化しながら掘削する影響を解明することを目的とする。なお、既設構造物は様々な種類があるが、地下構造物の増加および地上への影響が少ないシールドトンネルの増加の傾向を踏まえ、併設したシールドトンネルを対象とした。

併設シールドトンネルの影響は、地下化の増加に伴い、併設シールドトンネルの離隔が変化することに対する影響を確認する必要があると考え、研究における着眼点とした。着眼点とした併設トンネルの離隔の変化は、地上から発進する新設のランプシールド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）を事例として用いることで、再現することとした。また、併設トンネルの三次元離隔変化の事例による検討は、これまで再現するに至っていない複雑な線形を有した新設シールドトンネルが、近接する既設構造物に及ぼす影響を確認するために、三次元 FEM 解析の結果を詳細に検討することで、解明できると考えた。

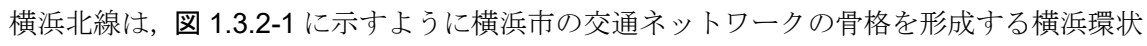
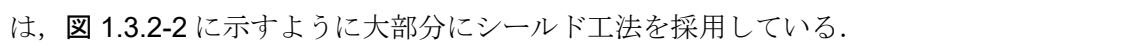
具体的には、急曲線、急勾配など非常に困難な施工条件下において掘進した首都高速道路で施工した馬場出入口のシールドトンネルを対象とし、新たに併設トンネルの三次元離隔変化の特徴を踏まえて実施した三次元 FEM 解析結果と現場実測結果を比較することにより、併設トンネルの三次元離隔変化を伴う、特異な状況における三次元 FEM 解析結果について妥当性を確認した。また、二次元はり一ばね解析によって馬場出入口のシールドトンネルの施工前に事前検討した、近接する横浜北線の本線シールドトンネルに及ぼす影響の検討結果を用いて、三次元 FEM 解析による本線シールドトンネルに対する影響結果を比較することで、影響検討手法の妥当性について考察した。さらに、地中構造物の近接施工の中でも特に、併設シールドトンネルにおける影響範囲の考え方について、解析結果と現場実測結果から検証および考察し、離隔距離に基づく評価を実施し、更に一般的な併設シールドトンネルの影響検討に使用することを目的として、本研究の結果を用いて、無次元量の関係図を作成した。

このように具体的な事例を用いて、施工結果、施工前の検討、本研究の結果をそれぞれ比較して考察することは、本研究の目的であるこれまで解明されていない複雑な線形を有して掘削する新設シールドトンネルが、既設の構造物に対して及ぼす併設トンネルの三次元離隔変化の影響検討手法が確立できると考えられる。また、離隔距離に基づいて評価し、整理することは、一般的な併設トンネルの影響検討においても、簡便に影響を確認できる手法を提案す

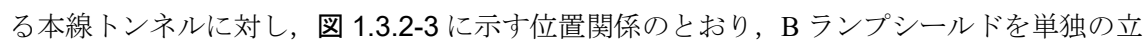
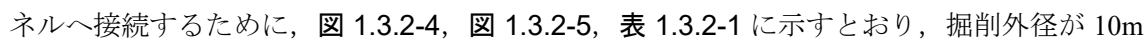
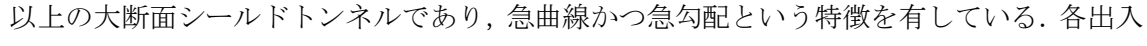
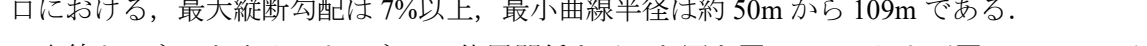
ることができると考え、実際の施工に活用することを目的とした。

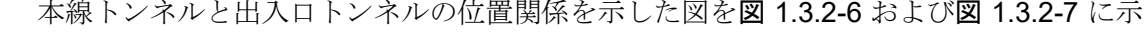
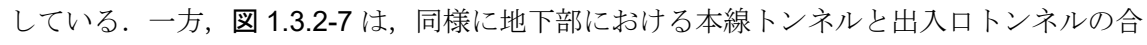
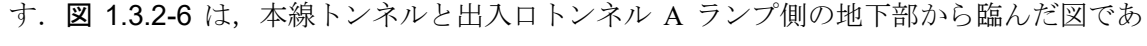
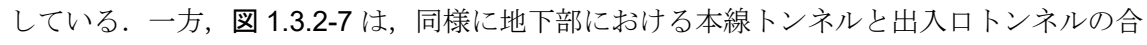
### 1.3.2 研究の対象工事

本研究では、算出する数値解析の結果が妥当であるか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、首都高速道路における神奈川地区にある路線であり、2017年3月に開通した延長約8.2kmのうち7割以上の約5.9kmがトンネル構造によって構築された路線である。横浜北線は、 1.3.2-1 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。路線内には生麦ジャンクション付近に位置する「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。なお、横浜北線のトンネル構造は、 1.3.2-2 に示すように大部分にシールド工法を採用している。

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。なお、出入口でシールド工法を採用することは、首都高で初めてである。

ランプシールドはそれぞれ、港北行き本線トンネルの入口となるAランプシールド、出口となるBランプシールド、生麦行き本線トンネルの入口となるCランプシールド、出口となるDランプシールドに分かれている。なお、施工においては、既に掘進が完了している本線トンネルに対し、 1.3.2-3 に示す位置関係のとおり、Bランプシールドを単独の立坑から最も早く掘削し、同一の立坑から、Dランプシールド、Cランプシールド、Aランプシールドの順番で掘削している。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、 1.3.2-4、 1.3.2-5、 1.3.2-1 に示すとおり、掘削外径が10m以上の大断面シールドトンネルであり、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から109mである。

本線トンネルと出入口トンネルの位置関係を示した図を 1.3.2-6 および 1.3.2-7 に示す。 1.3.2-6 は、本線トンネルと出入口トンネルAランプ側の地下部から臨んだ図である。出入口トンネルは、発進部から本線トンネルの合流部へ向けて大きく勾配を有して近接している。一方、 1.3.2-7 は、同様に地下部における本線トンネルと出入口トンネルの合流部付近から、本線トンネルを横断方から臨んだ図である。出入口トンネルは、発進部から本線トンネルへ向けて曲線を描きながら急激に本線トンネルへ近接している。このように

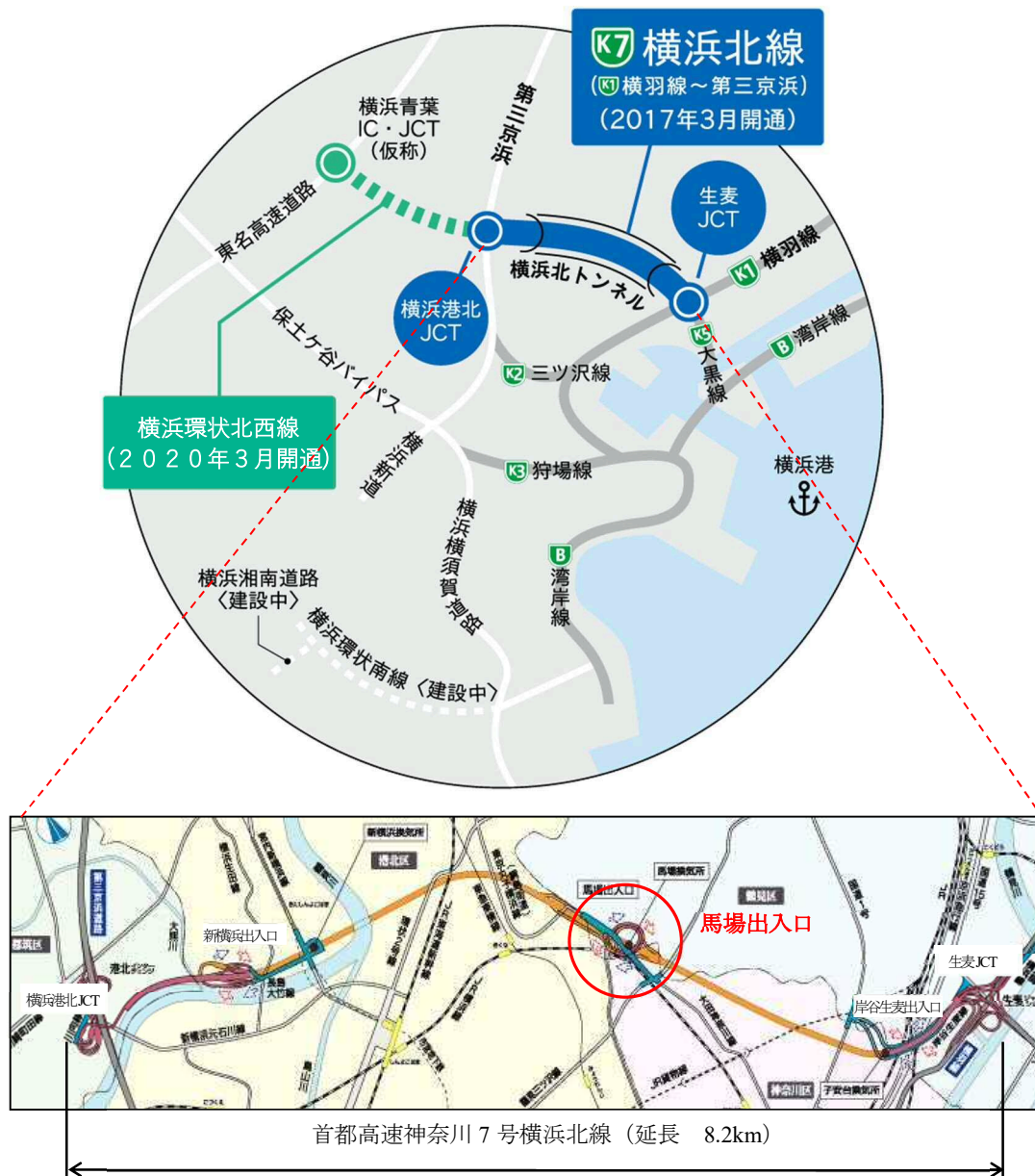


図 1.3.2-1 首都高速神奈川7号横浜北線位置図

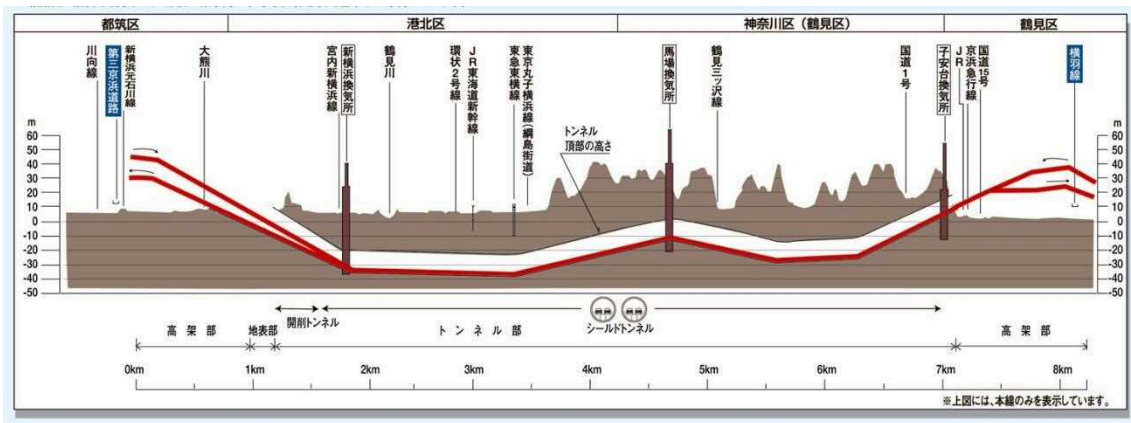


図 1.3.2-2 首都高速神奈川7号横浜北線縦断図

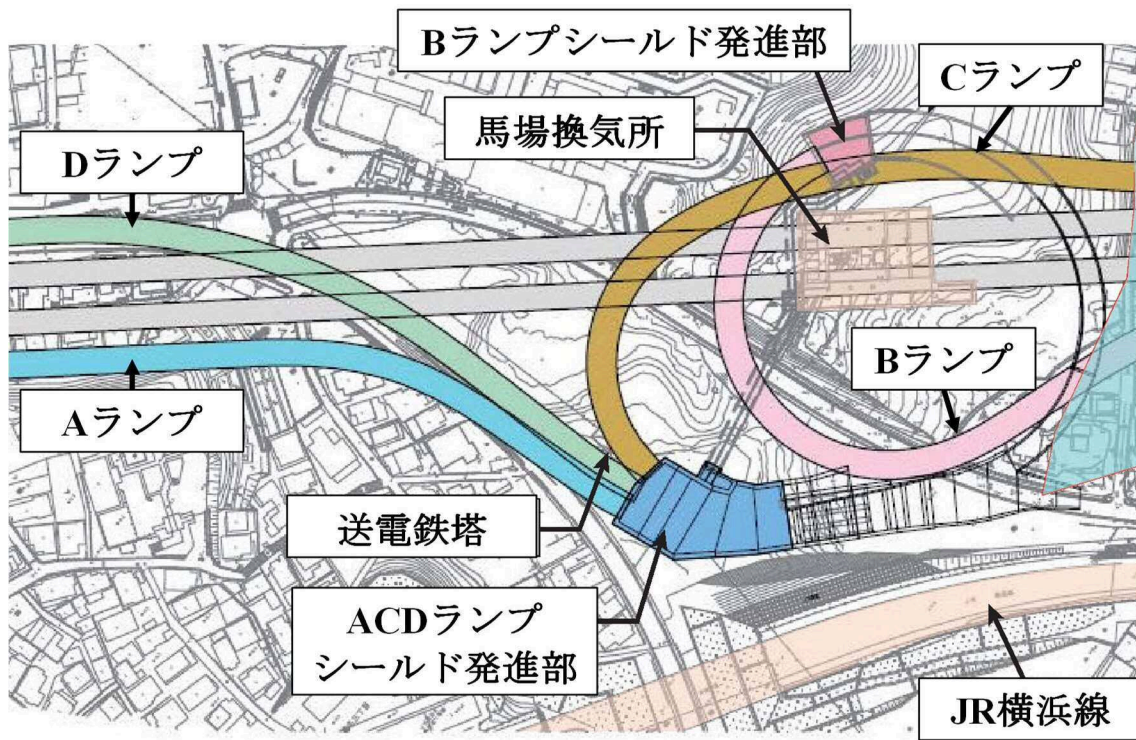


図 1.3.2-3 ランプシールドの発進部

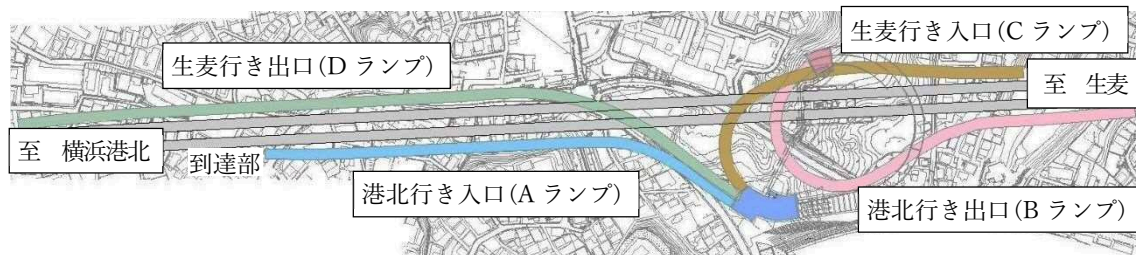


図 1.3.2-4 馬場出入口全体平面図

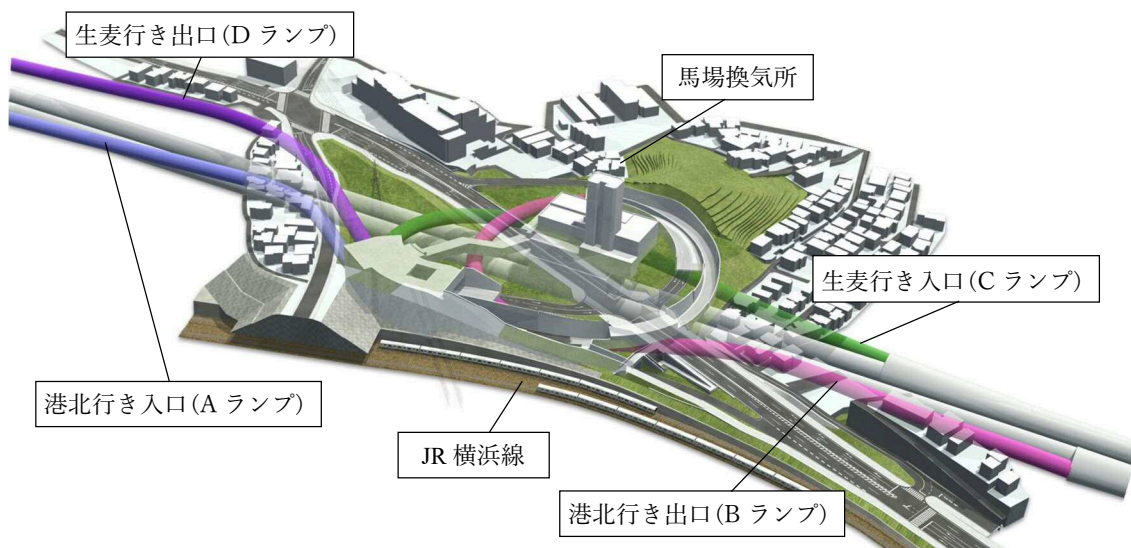


図 1.3.2-5 馬場出入口概要図

表 1.3.2-1 馬場出入口の規格

	A ランプ	B ランプ	C ランプ	D ランプ
延長	459.8m	463.7m	366.8m	706.3m
土被り	20.1~51.1m	1.3~35.5m	15.4~30.9m	4.3~43.6m
掘削外径	10.13m	10.83m	11.13m	10.13m
セグメント内径	9.1m	9.80m	10.1m	9.10m
最大縦断勾配	7.4%	7.6%	8.1%	7.5%
最小曲線半径	80m	50m	51m	109m
本線トンネルとの最小平面離隔距離	1.2m	0.3m	1.0m	0.3m

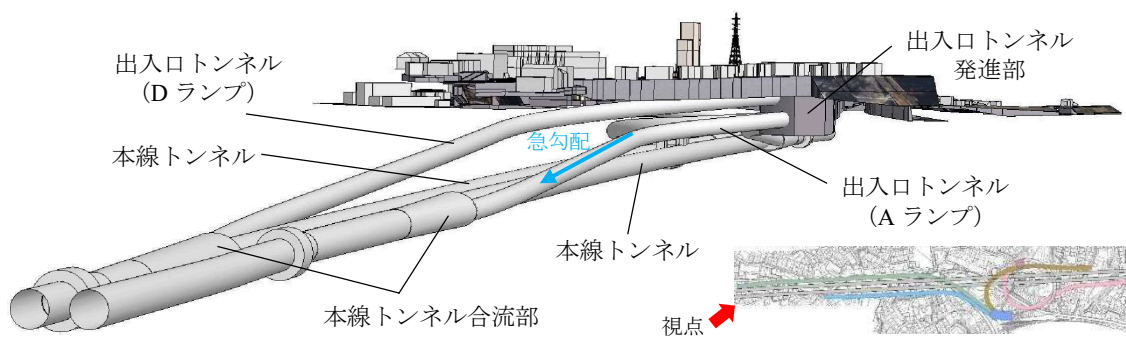


図 1.3.2-6 本線トンネルと出入口トンネルの位置関係

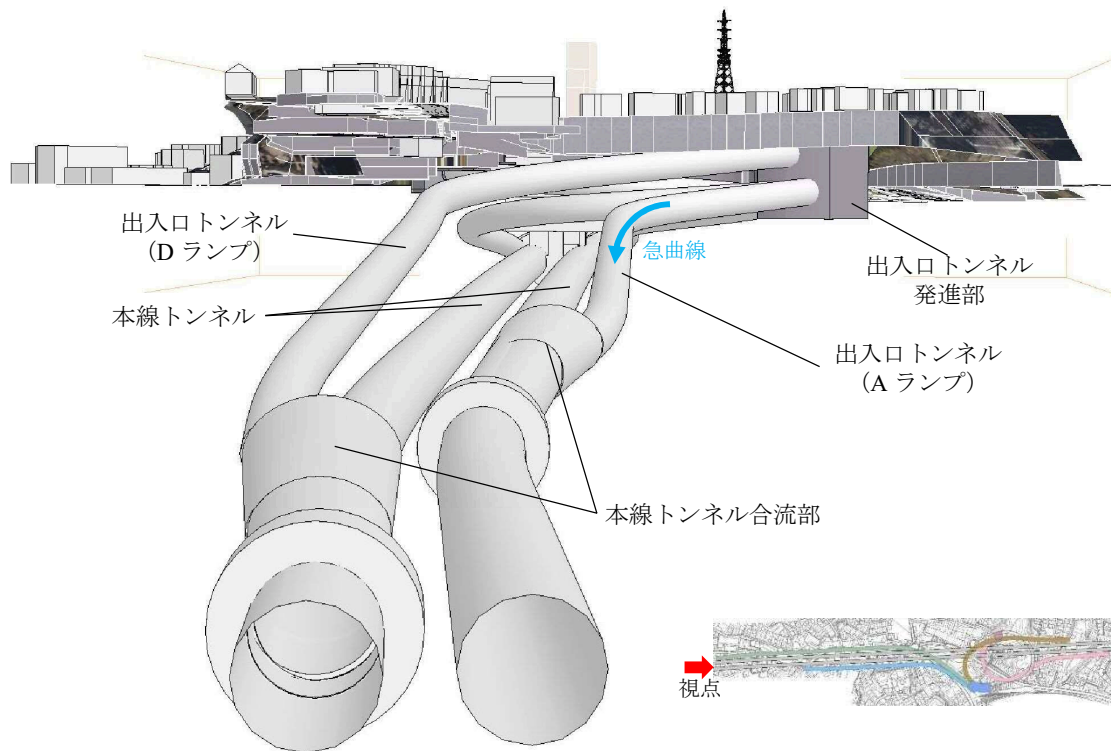


図 1.3.2-7 本線トンネルと出入口トンネルの位置関係

平面的および縦断的に近接することで、出入口シールドトンネルの掘進に伴い、本線トンネルと出入口トンネルの離隔が三次元的に変化していることがわかる。

また、本線トンネルと馬場出入口は、切抜け工法を用いて本線トンネル側から拡幅している到達部にランプシールドが到達し、接続されている。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 1.3.2-8 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、A ランプシールドに限っては、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、B、C、D ランプシールドと異なり、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特に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った。



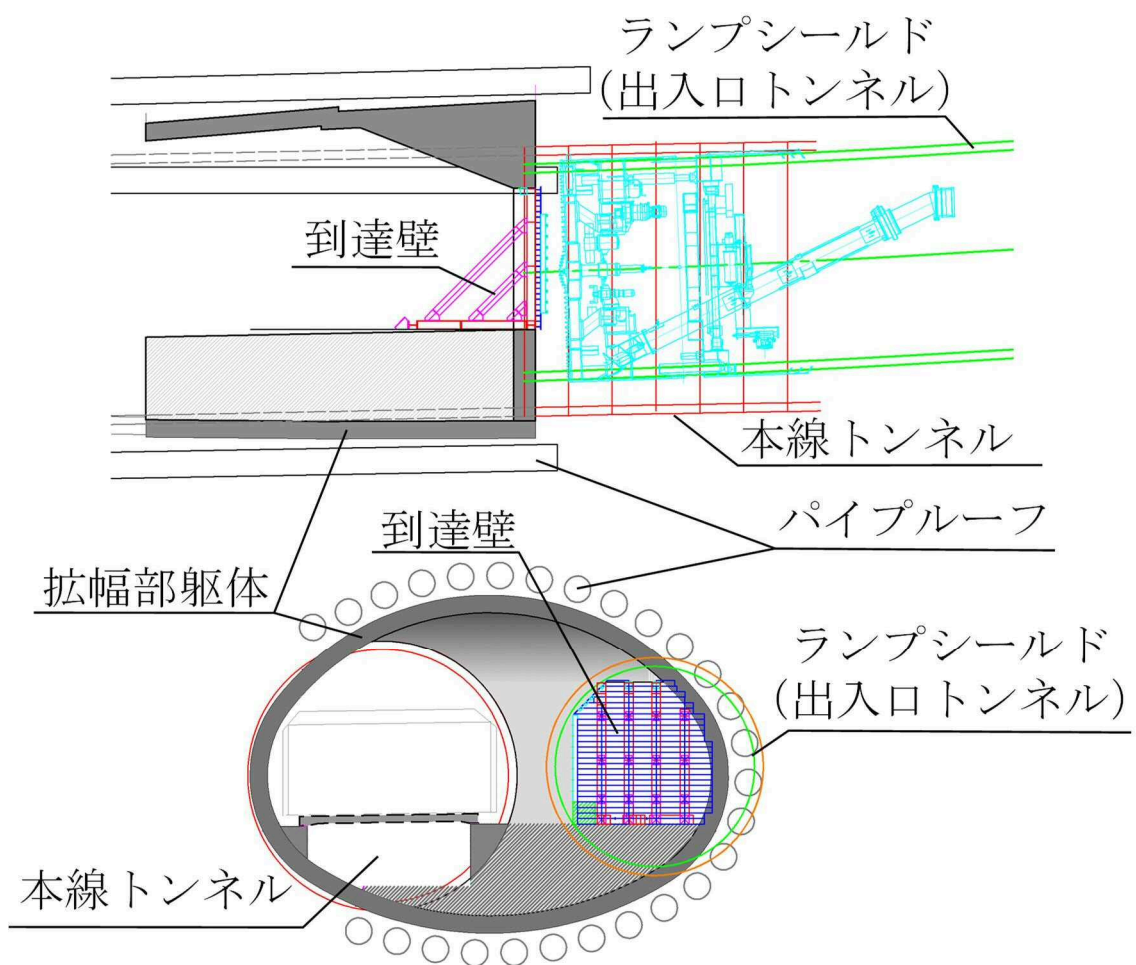
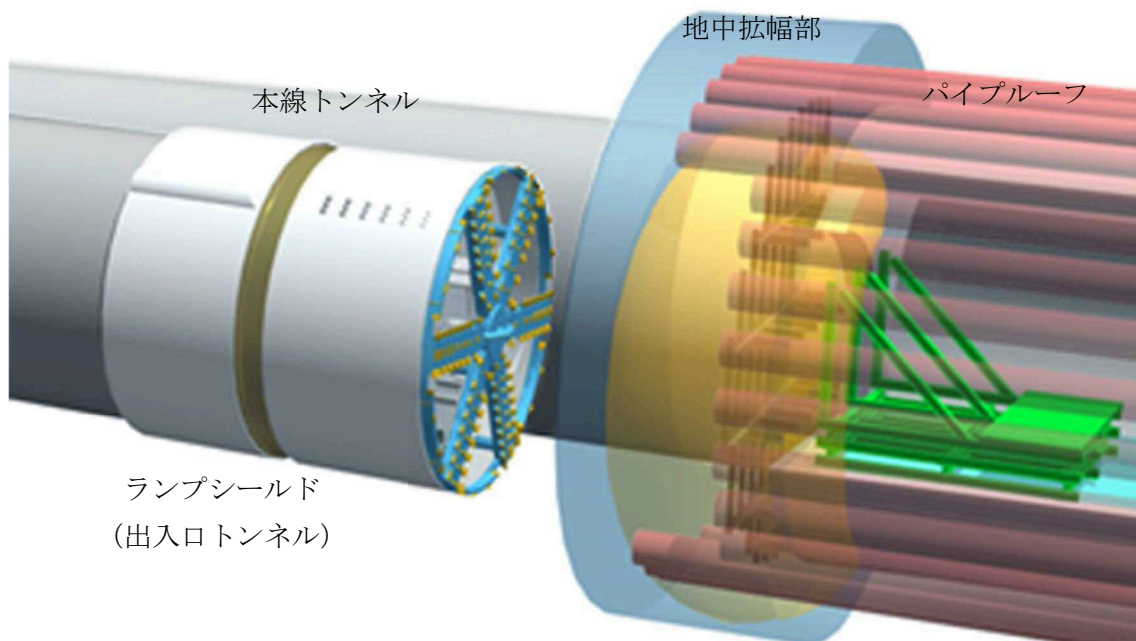
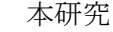



図 1.3.2-8 ランプシールド到達部概要図

### 1.3.3 シールドトンネル工事の実績と対象工事の比較

本研究では、併設トンネルの三次元離隔変化に着目し、馬場出入口工事を選定した。三次元離隔変化は、掘進するトンネルの線形によって生じるものだが、シールドトンネル工事の実績<sup>40)</sup>によると、これまで上下水道や電力等のトンネルが交差点等において、小さい曲線を設けることもあり、シールド外径が小さい事例が多い。しかし中折れ装置、余掘り装置等による対策によってシールド外径が10m以上の大断面においても最小曲線半径が150m以下の事例も多くあり、今後は更に本工事と同様に厳しい制約条件の工事が増えることも予想される。また、離隔が小さい併設トンネル工事の実績<sup>40)</sup>では、シールド外径が10m以下である実績が多い一方で、シールド外径が10m以上となる大断面シールドにおいても、0.5mの離隔で約300m併設している事例もある。

本研究の対象工事は、 および  で位置関係を示したとおり、急曲線および併設トンネルの事例の双方に該当し、事例としては更に特殊な事例であると言える。本研究の対象工事と同様の特殊な併設トンネルの施工は、現在構造物の地下化に加え、既存の地下構造物の高齢化に伴い、既設の地下構造物を更新する場合においても、現状の制約がある中で構築することになるため、増えることが予想される。しかしながら、特殊な事例であるため、既設構造物に対する影響においては、信頼性のある検討手法の確立には至っていない。

シールド工法は、他のトンネルの工法と比較し、地上への影響が小さいことから、採用事例も増えている。シールドトンネルの掘進においては、例えば低土被り区間や軟弱地盤への施工であれば、地盤改良等の補助工法によって安全性を確保するが、既設構造物に対する事前対策の場合、補助工法による施工が既設構造物に影響を与える可能性もあるため、適切な事前対策を実施するために、正確に影響を把握することが重要である。

## 1.4 論文の構成

ここに、本論文の構成を以下に示す。

**第1章**では、シールド工法の変遷と首都高速道路における、シールド工法の採用事例および現状から生じている課題について述べた。次に、課題に対し、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と目的を述べ、これまで研究されていない事項と研究の必要性を述べる。次に本研究の目的を達成するために選定した対象工事である、首都高速道路の馬場出入口工事を紹介した。また、最後に本論文の各章の概要について述べた。

**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述べる。

**第3章**では、本研究の対象工事において、実際に施工前に検討した二次元FEMおよびはりばねモデルを用いた解析結果を述べる。次に事前検討を踏まえた施工内容および対策を述べ、近接した本線シールドトンネルへの影響結果および講じた対策内容について、評価する。

**第4章**では、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して、適切に影響を評価するために実施した三次元FEM解析の詳細を述べる。また、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した結果を述べる。

**第5章**では、第3章におけるはりばねモデルを用いた解析結果と第4章で算出した三次元FEM解析の結果を用いて比較し、検証する。検証結果から、一般的に施工前に実施する解析手法の妥当性について述べる。また、三次元FEM解析の結果を用いて併設するトンネルの離隔距離に基づき無次元量の関係図を提案する。また、提案した無次元量の関係図について、馬場出入口工事のB、C、Dランプシールドの施工実績を用いて比較することで、妥当性と適用性を述べる。

**第6章**では、まとめと今後の展開を述べる。

## 【第1章 参考文献】

- 1) 譽田孝宏, 粥川幸司, 杉本光隆, 中村益美, 岡田章: 急曲線シールド掘進に伴うトンネル覆工挙動の現場計測, トンネル工学報告集, 第15巻, pp. 367-354, 2005.
- 2) 岡田久延, 岸孝雄, 吉田良三, 藤塚豊裕: 大深度、急曲線、急勾配シールドの施工, トンネル工学研究論文・報告書, 第6巻, pp. 393-398, 1996.
- 3) 小宮一仁, 赤木寛一: 有限要素法によるシールドトンネルの掘削のシミュレーションと地盤挙動解析, 第5回計算力学シンポジウム報文集, 日本科学技術連盟, pp.243-248, 1991.
- 4) 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. 51-56, 2001.
- 5) 吉野修, 小宮一仁: 3次元土～水連成有限要素法によるシールド掘進解析, トンネル工学研究論文・報告集, 第11巻, pp. 59-68, 1993.
- 6) 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.
- 7) 佐藤有美, アピチャート・サラムーン, 杉本光隆: シールド機動力学モデルに基づく裏込注入のシールド機挙動に与える影響評価, トンネル工学研究論文・論文集, 第11巻, pp. 38-42, 2001.
- 8) 宮川房夫, 久保康文, 水谷進, 吉村和彦, 粥川幸司: 泥水式シールド超近接施工の掘進過程を考慮した3次元FEM解析, トンネル工学研究発表会論文・論文集, 第4巻, pp. 63-70, 1994.
- 9) 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.
- 10) 吉田保, 田中弘, 草深守人, 武田洋: 接触問題として扱ったシールド掘進時の地盤変状解析, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第4巻, pp. 71-78, 1994
- 11) 黒川信子, 草深守人, 田中弘, 吉田保: シールド掘進中の負荷土圧に伴う近接構造物への影響検討解析手法, トンネル工学研究論文・報告書, 第6巻, pp. 321-326, 1996
- 12) 武田洋, 草深守人, 吉田保, 田中弘, 黒川信子: 有限要素法による接触問題の数値解析法とシールドトンネルへの適用, 土木学会論文集, No. 603/III-44, pp. 1-10, 1998.
- 13) 矢萩秀一, 荻野竹敏, 沼澤憲二郎, 深井直光, 斉藤正幸: シールドトンネルの施工時荷重の影響に関する現場計測結果と考察, トンネル工学論文集, 第17巻, pp. 63-74, 2007.
- 14) 石村利明, 森本智, 角湯克典: 三次元シェルモデルを用いた施工時荷重の影響に関する一考察, 土木学会年次学術講演会公演概要集, 第3部, pp. 327-328, 2012.
- 15) 長屋淳一, 橋本正, 小山幸則, 建山和由, 塚田泰博: 施工時荷重によるシールドトンネル覆工の挙動事例とその解析方法の提案, 土木学会論文集 F1, Vol. 71, No. 3, pp. 94-111, 2015.

- 16) 木股浩孝, 仲山貴司, 津野究, 粥川幸司, 小西真治: シールドテールとセグメントの接触を考慮した施工時荷重の解析的検討, 土木学会論文集 F1, Vol. 69, No. 1, pp. 73-88, 2013.
- 17) 土橋浩, 桑野玲子: 三次元 FEM 解析による大深度シールドトンネル拡幅工法の作用の評価に関する研究, 生産研究, 第 67 巻 4 号, pp.233-234, 2015.
- 18) 橋本定雄: 軟弱地盤における上下隣接シールド施工の実測と計測結果について, 土木学会論文集, 第 352 号/ III-2, pp. 1-21, 1984.
- 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. 65-66, 2016.
- 20) 小泉淳, 村上博智, 西野健三: シールドトンネルの軸方向特性のモデル化, 土木学会論文集, 第 394 号/III-9, pp. 79-88, 1988.
- 21) 木村定雄, 矢田敬, 小泉淳: 併設して施工されるシールドトンネルの影響解析, トンネル工学研究発表会論文・論文集, 第 1 巻, pp. 89-94, 1991.
- 22) 木村定雄, 山下雄一, 清水幸範, 小泉淳: 併設シールドトンネルの影響評価について, トンネル工学研究論文・報告書, 第 6 巻, pp. 327-332, 1996.
- 23) 堀地紀行, 平嶋政治, 松下芳亮, 石井恒生: 軟弱粘性土地盤における併設シールドトンネルの現場計測とセグメントリングの疑似三次元構造解析モデル, 土木学会論文集, No. 418/III-13, pp. 201-210, 1990.
- 24) 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.
- 25) 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. 90-101, 2016.
- 26) 松本嘉司, 小山幸則, 清水満, 小林宏基: 併設シールドが先行トンネル断面力に及ぼす長期的影響の検討, トンネル工学研究発表会論文・報告書, 第 4 巻, pp. 211-216, 1994.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) 山口巖, 山崎糸治, 福島健一, 小林隆, 杉嶋敏夫: 併設シールドの影響予測解析と実際の挙動, トンネル工学研究発表会論文・報告書, 第 5 巻, pp. 39-46, 1995.
- 30) 山口巖, 山崎糸治, 小林隆, 松下惇次, 杉嶋敏夫: 4 本併設シールドの地盤-トンネル挙動分析と併設シールドの設計・施工への応用に関する研究, 土木学会論文集, No. 561/III-38, pp. 47-62, 1997.
- 31) 舟橋秀磨, 大繩泰平, 木村定雄, 小泉淳: 併設シールドトンネルの影響評価について(その 1) -先行トンネルに作用する荷重の評価方法について-, 土木学会年次学術講演会公演概要集, III-636, pp. 1272-1273, 1995.
- 32) 小笠原政文, 佐々木一哉, 藤井義文, 真川三雄: 超近接シールドの作用土圧に関する遠心力実験(その 1) 砂質地盤中の水平に隣接する円形セグメント, 土木学会年次学術講

- 演会公演概要集, III-B162, pp. 324-325, 1996.
- 33) 小笠原政文, 佐々木一哉, 藤井義文, 畑中善徳, 近信明: 超近接シールドの作用土圧に関する遠心力実験 (その2) 砂質地盤中の水平に隣接する円形セグメント, 土木学会年次学術講演会公演概要集, III-B163, pp. 326-327, 1996.
  - 34) 小笠原政文, 津野和宏, 藤井義文, 畑中善徳, 野村成樹: 超近接シールドの作用土圧に関する遠心力実験 (その3) 砂質地盤中の水平に隣接する円形セグメント, 土木学会年次学術講演会公演概要集, III-B102, pp. 204-205, 1997.
  - 35) 小笠原政文, 津野和宏, 藤井義文, 平井卓, 畑中善徳: 粘性土における併設シールドトンネルの作用土圧に関する研究, トンネル工学研究論文・報告集, 第7巻, pp. 47-54, 1997.
  - 36) 岩田敏和, 中井照夫, ホサインシャヒン, 菊本統, 石井健嗣: 新しい双設トンネル掘削実験とその解析, 土木学会論文集, Vol67, No.3, pp. I-33- I-44, 2001.
  - 37) 深山大介, 石橋正博, 島越貴之: 首都高中央環状線五反田出入口トンネル構造の概要, 地下空間シンポジウム論文・報告集 21, pp. 91-98, 2016.
  - 38) 安井雅士, 遠藤啓一郎, 住野英明, 半田陽介: 並走するシールドトンネルを非開削で一本化: 大橋連結路, 建設機械施工, vol.65, No.10, pp. 66-70, 2013.
  - 39) 鈴木康洋, 佐々木順一, 越田健: 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, 2014 May, Vol.54, No.8, pp.16-19, 2013.
  - 40) 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. 24, 2016.
  - 41) 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. 25, 2016.

## 第2章 近接施工による影響の整理

### 2.1 近接施工の概論

日本は産業革命を受けて、インフラの整備が飛躍的に進み、それにともない、特に都市部においては人口が集中することによる多くの構造物が構築されてきた。現在、インフラを含めた構造物は高齢化が進み、これからの安全を確保するためにも大規模な修繕、更新が必要となっている。ここでは、最終的に近接影響を評価するにあたり、一般的な近接施工の考え方をまとめる。

これまで都市部において絶え間なく構造物が増えている中で、維持管理をするためには、近接する既設の構造物への影響を配慮しつつ施工する必要がある。近接施工は、例えば地盤工学会<sup>1)</sup>において、“既設構造物の機能に間接的に重大な影響を与える可能性を持つ場所での施工、つまり地盤の変位、変形による影響を対象とした施工”と定義している。

首都高速道路は、都市内に大規模な構造物として構築されていることから、近接構造物の対象となることが多くあり、十分な検討を行ったうえで、適切な計画・設計・施工すべく、協議図書の作成を施工者に依頼している。首都高速道路における近接施工の概略検討手順を図 2.1-1 に示す。検討手順においては、調査後にまず近接程度の判定を行うこととしている。近接程度の判定は、最も古い近接施工の指針<sup>2)</sup>で三段階に分けて判定しており、首都高速道路を含め、その後に作成された指針等にも三段階に分けた判定が準用されている。首都高速道路における三段階の判定例を表 2.1-1 に示す。三段階の判定は、変状の影響が及ばないと考えられる範囲である無条件範囲、まれに影響があると考えられる範囲である要注意範囲、変状の影響が及ぶと考えられる範囲である制限範囲に設定されている。なお、近接の程度の範囲は、新設の構造物および既設の構造物の種類、新設構造物と既設構造物の判定対象の設定等により、様々な判定方法が考えられる。また、構造物の種類においては、土工、基礎、トンネルなどの工法によってもそれぞれ影響が異なることから、新設する工法の影響を考慮したうえで検討することが望ましいと考えられる。

近接施工の判定結果によっては、詳細な検討を求められるが、近接施工による既設構造物への影響を正確に把握するためには、現場状況を把握する事前調査が必要である。例えば、既設構造物が健全性を保てる影響量は、構造物の種類や構築された時期によって大きく異なるため、対象構造物の管理者へ確認する必要がある。また土質調査は、土質の状況によって地盤への応力の伝達状況が変化するため、詳細な影響を把握するためには必要な調査であるといえる。

都市内の既設構造物の調査においては、高度経済成長期に急速に構築された構造物も多く、新設した際の記録が残っていないことも多いことから、特に注意が必要である。得られ

た情報から復元設計をした場合においても、これまでの修繕状況を踏まえた現在の損傷度合も考慮すべきだが、正確な許容影響量を把握することは困難である。そのため、このような場合においては、既存の資料の調査に加え、現地調査をすることが望ましい。現地調査では、地上の構造物であれば目視による確認が容易であるが、地下構造物の場合は、試掘やボーリング調査等で確認する必要がある。首都高速道路においては、都市内で施工することか

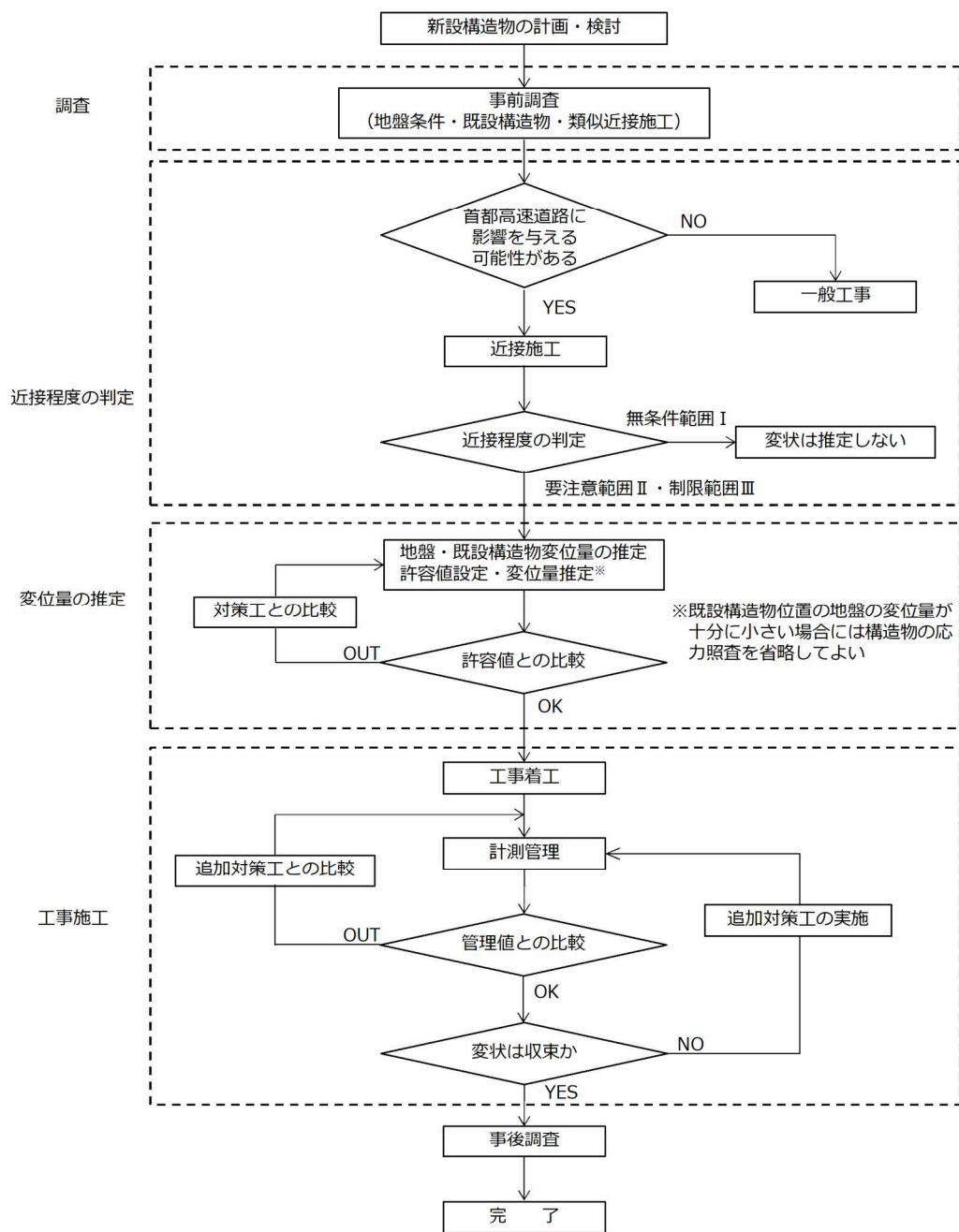


図 2.1-1 近接施工の概略検討手順イメージ



表 2.1-1 近接程度による考え方

近接程度	考え方
無条件範囲 I	新設構造物の施工により既設構造物に対し、変状の影響が及ばないと考えられる範囲をいう。よって、設計・施工に特別の任意を一般に要しないが、必要に応じて既設構造物の変状の観測を行う範囲のことである。
要注意範囲 II	新設構造物の施工により既設構造物に対し、変状の影響が及ばないと考えて良いが、まれに影響があると考えられる範囲をいう。よって、設計にあたり既設構造物に変状を与えないよう構造形式を選択するなどして新設構造物を設計し、施工時には既設構造物に有害な影響を与えないよう新設構造物の施工法による対策などを実施して変状の観測を行う範囲のことである。
制限範囲 III	新設構造物の施工により既設構造物に対し、変状の影響が及ぶと考えられる範囲をいう。よって、設計にあたり既設構造物に変状を与えないよう構造形式を選択するなどして、新設構造物の設計を行うとともに、既設構造物の変状を定量的に推定し安全性を検討しなければならない範囲のことである。施工時には、既設構造物に有害な影響を与えないように、新設構造物の施工法による対策を実施する。さらに、影響検討の結果に基づき、地盤の強化・改良、土留工の剛性増加や遮断工などの対策や、やむを得ない場合には既設構造物への補強のいずれかを併せて実施し、変状の観測を行う範囲のことである。

ら特にインフラ地下埋設物と近接することが多く、管理者の台帳にて確認するだけでなく、不明管も考慮し、土留めや橋脚基礎構築時においては、試掘を必ず実施している。

一方、地盤の調査は近接施工のみに限らず、構造物を構築するうえで、重要な指標である。しかし、目的に応じて必要となる情報は異なるため、新設工事の種類、地盤変形の要因を踏まえて、検討に必要な情報を整理したうえで調査をする必要がある。例えばシールドトンネルを構築する場合は、切羽の崩壊、応力開放の変形、掘削による帯水層の遮断や不透水層への地下水の流入にともなう、地下水位が低下することによる沈下等を考慮し、地質情報に加え、地盤の変形特性や地下水の詳細情報も必要となる。特に地盤の変形特性は、施工前の近接施工の影響検討の際に用いるパラメータであり、結果によって影響結果に大きな差が生じるため正確な情報が求められる。

近接施工による影響は、新たに構築する構造物や構築方法、近接の対象となる構造物、交差や併設の近接する状態などによって多くの組み合わせがあり、それぞれ影響が異なる。そのため、近接施工の影響においては、対象となる構造物や前提となる条件を整理することで、より精度の高い変位を算出することが可能となる。しかし、実際の施工においては、対象と

なる構造物の正確な情報が得られないことが多くあり、加えて複雑な地盤条件等によって推定が困難となる場合もある。

近接施工の影響算出手法として、施工箇所周辺における施工事例を用いて周辺地盤への影響を予測する場合もあるが、簡便な検討であることから信頼性に欠け、さらに複雑な条件の場合は、精度の高い結果は期待できない。そこで、近接施工による影響を把握する手法としては、数値解析を用いて影響量を算定し、評価する手法が一般的である。数値解析は、コンピューターの高度化により、算出時間が短縮され、最も信頼性の高い手法であるといえる。

近接施工における地盤変形の予測方法で多く用いられる手法のひとつに FEM が挙げられる。FEM は、微分方程式を用いて近似値を算出する手法であり、境界条件の反映の容易さから、地盤の変形挙動を容易に求めることが可能である。コンピューターの発達もあり、FEM の解析ソフトウェアも販売されるなど、益々使用される手法となっている。近接施工による影響の算出においては、精度の高い結果が求められるが、コンピューターが発達したことから、結果に大きく影響するパラメータの設定と施工過程の考慮が特に重要となっている。

パラメータの設定は、精度が高ければ比例して影響結果の精度も高まるが、影響結果と密接に関係するため、注意が必要である。例えば、仮定要素を含む場合、設定根拠が解析実施者によって異なり、影響結果にも大きく影響しかねないことから、根拠を明確にすることで、最終的に確認を可能とすることが重要である。また、パラメータの精度を上げるためには、調査結果を反映することであり、同一箇所での調査、適切な試験をすることで、正確なパラメータを得ることが可能である。

施工過程の考慮については、解析上で再現するために、FEM においては第 1 章で述べたように解析モデルへ反映することで、提案されることが多い。施工過程を考慮する項目が多ければ比例して解析結果の精度も上がると想定されるが、厳密には連続体力学理論を基礎としている FEM では、地盤の掘削を全て同様に再現して解析することは不可能である。そのため、施工条件の特異性を整理し、その特異性に準じた施工過程を考慮したうえでモデル化し、検証して有効性を確認することが必要である。

以上を踏まえ、近接施工の影響を確認することで、実際の施工においては、施工前に対策すべき事項を適切に整理することが可能となるが、近接施工における対策は、新設する工事種別によって発生し得る変状が異なることから、対策を行う時期や対策工法を留意する必要がある。例えばシールドトンネル工事では、発生し易い変状として、切羽の崩壊や土砂の呼込み、周辺地盤の緩み等が考えられる。切羽の崩壊や土砂の呼込みは、地盤改良や密閉型シールドの採用、周辺地盤の緩みは、シールドマシン設備に同時裏込め注入装置等を設置することで対策をすることが多い。なお、道路シールドトンネルのように大断面の場合、近接施工の影響は特に大きくなり、周辺地盤の強化を目的とした地盤改良や既設構造物の補強等を施すこともある。

最終的な施工前の確認としては、対策した結果を踏まえて、再び施工による既設構造物へ

の影響を確認し、管理者が指定する許容値内に収まっていることが施工における前提条件となる。しかし、影響検討に誤りが生じていた場合、既設構造物に多大な影響を与えてしまうことや反対に必要以上の対策を行ってしまう場合があるため、それぞれ異なる条件における適切な影響算出手法が求められている。

## 2.2 新設シールドトンネルの近接影響

第1章にて述べたように近年地下空間の有効活用にともない、新設するトンネルが既設構造物に近接する事例が多くある。近接施工における影響は、前述したとおり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にあたり、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。影響範囲の判断は、各管理者が定めるところによるが、ひとつの指標となる土木学会においては、併設するシールドトンネルの検討において、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<sup>3),4)</sup>。

また、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影響の程度を判定する考え方についても、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>5),6)</sup>。

これまで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、1.2.2にて工事事例を挙げたとおり、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い。道路などの大断面シールドトンネルの場合、近接構造物に損傷を与えた場合、影響が大きいため、例えば首都高速道路においては、中央環状新宿線において多くの既設構造物と近接したが、特に地下鉄においては慎重な施工を心掛けた<sup>7)</sup>。また、中央環状品川線の建設時においては、品川線本線シールドトンネルと連結する路線となる大橋シールドトンネルが近接して、合計4本のシールドトンネルが併設することになり、周辺への影響が懸念された<sup>8)</sup>。なお、いずれの事例においても基本的には、二次元FEM解析を用いて影響検討を事前に確認している。

シールドトンネルの近接施工に対する既設構造物の挙動は、例えば擁壁や上下併設シールドトンネルに対する沈下量等について、工事实績から予測手法を検討しており<sup>9)10)</sup>、また一方で、既存のシールドトンネルに対する影響も様々な事例を用いて整理されている<sup>11)</sup>。

このような近接施工の影響は、地盤条件や施工条件の影響を受けるが、類似の事例があれば、既設構造物への影響を予測することができ、FEM解析と併用することで更に精度の高い結果が期待できる。しかし、地下化が進んでいる現代において、馬場出入口トンネルのような大断面併設シールド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、これまでも述べているように、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。

## 2.3 首都高速道路における併設トンネルの近接影響の考え方

### 2.3.1 近接影響の検討方針

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、 $1D$ 以上のトンネル中心間の離隔（以下、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>12)</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>13)</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。

首都高速道路は都市内に構築されていることから、新たに構築する構造物が既設の首都高速道路の構造物に近接することが多くあるため、様々な影響範囲を設定している。例えば新設構造物がシールドトンネルの場合、トンネル掘削による応力開放の影響範囲は、掘削面からはほぼトンネル外径程度の領域であると想定し、影響範囲を設定している。

併設トンネルにおける近接影響検討においては、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、地盤状況や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。新設構造物の施工法がシールドトンネル工法の場合における地下構造物の範囲区分を図 2.3.1-1 および図 2.3.1-2 に示す。

例えば、地盤が硬質で良好な場合や地盤改良を行った場合において、トンネルの離隔距離が小さい状況では、後行トンネルの掘進による影響が大きくなると考えられ、トンネル周辺の地盤状況を把握することは重要である。また、併設パターンにおいては、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。なお、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ことから、施工するうえでの検討は十分に注意する必要がある。

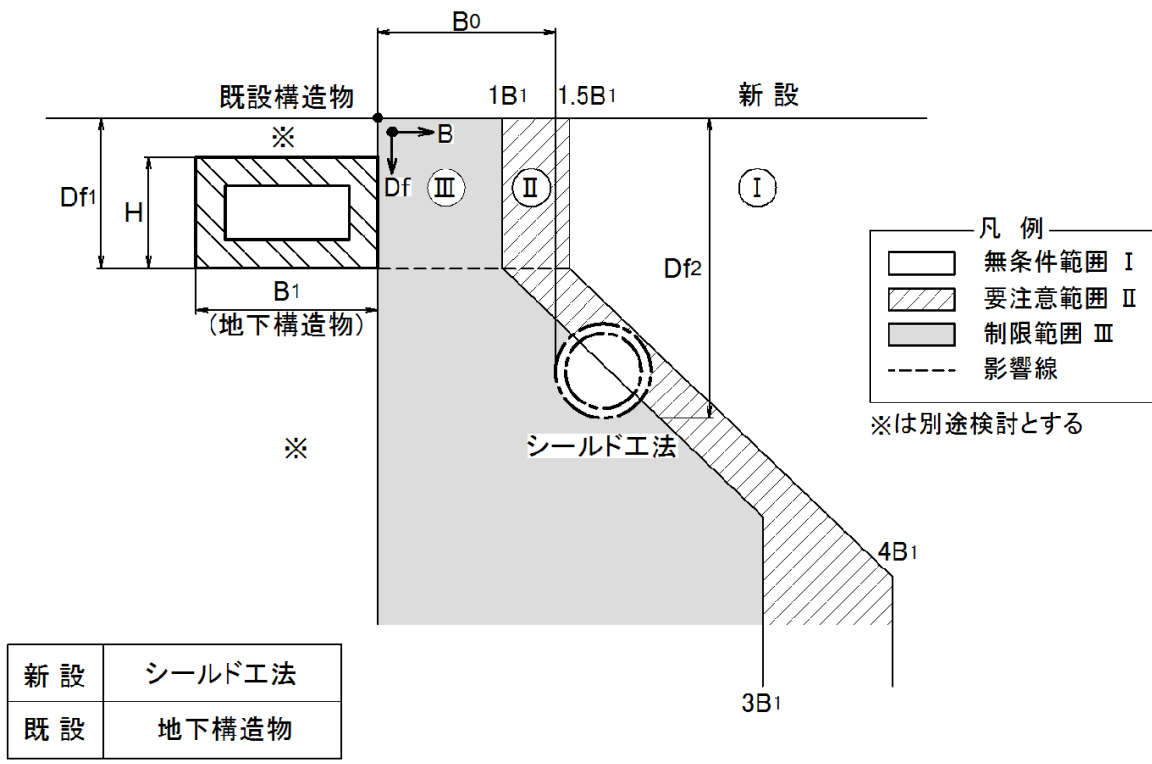


図 2.3.1-1 既設地下構造物と新設シールドの影響範囲分別

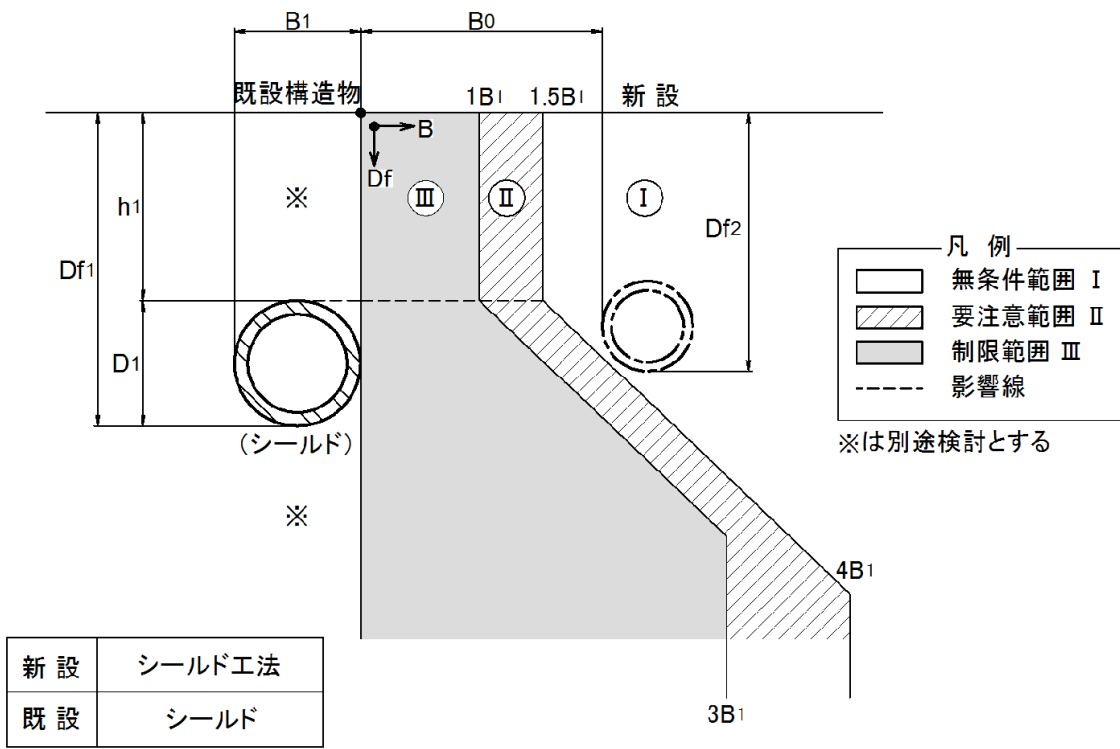


図 2.3.1-2 既設シールドと新設シールドの影響範囲分別

### 2.3.2 併設トンネルの近接影響を踏まえた設計

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 FEM 解析を基本としている。併設トンネルの影響を踏まえた設計方法は、図 2.3.2-1 に示すように、はり—ばねモデルによる単設断面力に FEM 解析から求められる併設時の増分断面力を加算し、設計断面力とする方法を基本としている。

FEM 解析は二次元での検討を基本としており、先行トンネルの掘削と覆工、後行トンネルの掘削や裏込め注入圧の作用を踏まえることとしている。特に応力解放率においては、解析結果に大きく影響することから、首都高速道路においては、過去に中央環状新宿線の現場計測結果とのフィッティング解析により算定した応力解放率を参考値として用いることが多い<sup>14)</sup>。応力開放率は、設定する値によって影響結果に大きく影響するが、大断面シールドを対象とした研究においては、東京地下鉄のシールドトンネルの施工計測結果から FEM 解析に用いる算出式を提案されている<sup>15) 16)</sup>。応力開放率はトンネル掘削に伴う地山の三次元的な挙動を模擬しているものであり、適切な値を設定するために、応力開放率と土被り高に対するトンネル径の比もしくは全土被り圧に対するゆるみ土圧の人の関係<sup>17)</sup>や施工条件の異なる場合における検討も行われており<sup>18)</sup>、地質状況、土被り比、掘進位置によって異なるため、トンネル条件を十分に考慮する必要があることが示されている。また、応力開放率を用いた二次元解析が、三次元的な挙動を適切に模擬しているか、実際に三次元解析の結果と比較することで、確認した事例もある<sup>19)</sup>。

このように二次元の FEM 解析における応力開放率は多く検討されており、実際の施工においては、現場条件が工事によって異なるため、これまでの検討内容と整合性を図りながら定数等を調整していくことが望ましく、一概に採用することは難しい状況である。一方で、首都高速道路における FEM を用いた解析の検討では、これまでの実績から先行トンネル掘削時の応力解放、覆工剛性、解析範囲の設定を標準化している。

まず、先行トンネルの掘削時の応力開放は、泥水圧、掘削による応力解放、裏込め注入圧、土水圧等の種々の要因をふまえた総合的な解放力として設定している。FEM 解析を用いた検討において、増分断面力を算出するうえでは、最終ステップを後行トンネル掘削までとし、 $(1-\alpha)$  の応力解放は行わず、先行トンネルも同様であると考えられる。そのため、先行トンネル覆工時には応力解放  $(1-\alpha)$  を行わない方が実現象に近いと判断し、設定している。

覆工の剛性においては、無限大、EI、EI の低減が考えられるが、覆工の剛性を小さくした場合、覆工に発生する断面力は小さくなり危険側となる傾向が見受けられることから、安全側として EI を用いることとしている。また、解析範囲の設定は全体幅および下方境界高さを実績に基づき設定しており、全体幅は、トンネル側部から  $45^\circ + \alpha$  の範囲とし、トンネル下方境界高さは、 $2D$  としている。

このように、設計においては、実績に基づき定めているものが多いものの、実際には検証が不足しており、異なる条件によっては、併設トンネルに対し、想定以上の影響が発生する



可能性も考えられる。そのため、実績から異なる条件となる特殊な線形、地盤条件等が考えられる場合、検討においては特に注意が必要である。

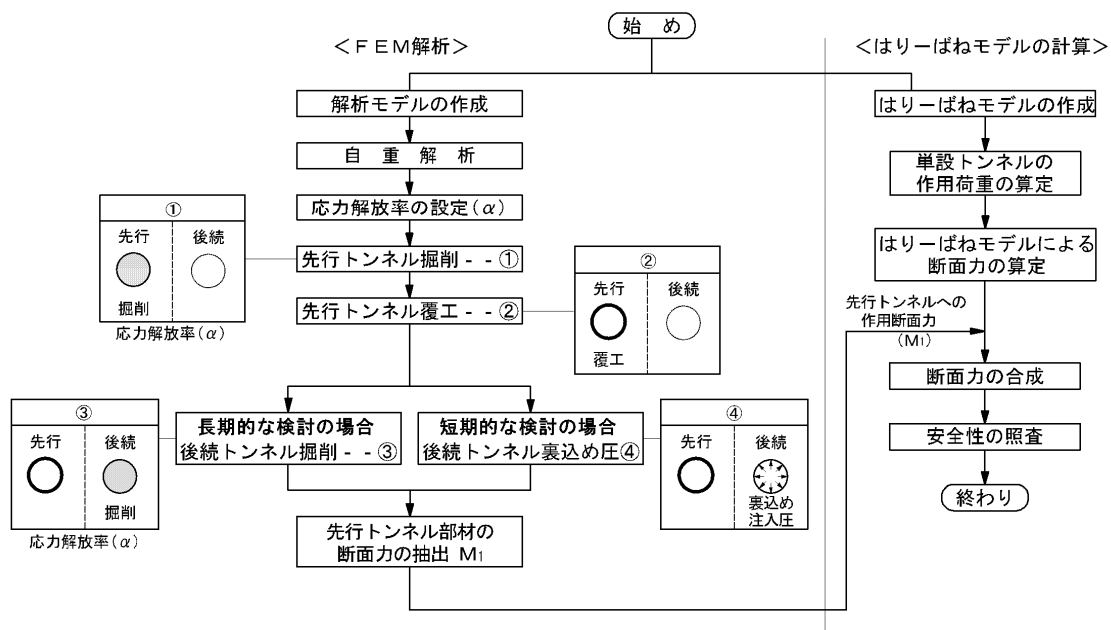


図 2.3.2-1 併設トンネル影響検討フロー

## 【第2章 参考文献】

- 1) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 28 近接施工，pp. 1, 2011.
- 2) 日本国有鉄道：近接橋台橋脚の設計施工指針（案），1973.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 28 近接施工，pp. 5-8, 2011.
- 6) 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.
- 7) 石原陽介，角田浩，小西由人：泥水圧式シールド通過に伴う地下鉄躯体への影響，土木学会年次学術講演会公演概要集，第 6 部，pp. 97-98, 2004.
- 8) 石田高啓，斉藤亮，守田貴裕：超近接して施工する 4 シールドトンネルの併設の影響，土木学会年次学術講演会公演概要集，第 3 部，pp. 835-836, 2009.
- 9) 小峰隆幸，助川博之，綿引秀夫：近接施工における既設構造物の挙動について，トンネル工学研究論文・報告集，第 7 巻，pp. 389-394, 1997.
- 10) 角田浩，森健太郎，川口博行，小川卓，久原高志：三次元沈下曲面を用いたシールド掘進に伴う近接構造物の沈下量予測方法，トンネル工学論文集，第 14 巻，pp. 132-137, 2004.
- 11) 中村信義，川村努，泊弘貞，村上博智：近接施工の影響を受けるシールドトンネルの検討手法の提案とその適用例，土木学会論文集，No. 686/VI-52，pp. 66-77, 2001.
- 12) (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.
- 13) 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.
- 14) 田嶋仁志，岸田政彦，川田成彦，小林靖典，斉藤正幸：併設シールドトンネルの影響評価方法に関する検討，トンネル工学研究・報告集，第 13 巻，pp. 407-412, 2003.
- 15) 中山隆，中村信義，中島信：泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について，土木学会論文集，No. 397/VI-9，pp. 133-141, 1988.
- 16) 藤木育雄，横田三則，米嶋賢二，村田基代彦：軟弱地盤でのシールドトンネル掘進に伴う周辺地盤の変形について，トンネル工学研究発表会論文・報告集，第 1 巻，pp. 83-88, 1991.
- 17) 猪熊明，田子島充：シールドトンネル弾性有限要素解析の入力設定に関する研究，トンネル工学研究論文・報告集，第 9 巻，pp. 249-252, 1999.
- 18) 藤井郁男，真下英人，石村利明，真弓英大：シールド掘削における地盤変状予測，トンネル工学研究論文・報告集第 9 巻，pp. 243-248, 1999.
- 19) 市田雄行，小原伸高：トンネルの 2 次元掘削解析における応力開放率に関する一考察，トンネル工学報告集，第 25 巻，I-31，pp. 1-8, 2015.

# 第3章 馬場出入口トンネル掘進による施工前 検討の概要

## 3.1 馬場出入口の各シールドトンネルの概要

本研究の対象とした馬場出入口トンネル工事は、第1章にて述べたように、4つの出入口を全てシールド工法にて構築している。第3章では、出入口トンネル掘進による施工前に実施した検討について述べるが、まず各トンネルのそれぞれの概要について述べる。なお、本研究の対象となるAランプシールドにおいては、事前検討を踏まえた施工結果の詳細を3.4以降に後述する。

馬場出入口において最初に掘進した出入口トンネルは、港北行き本線トンネルの出口となるBランプシールドである。Bランプシールドの平面図および縦断図を図3.1-1および図3.1-2にそれぞれ示す。図3.1-1に示す平面図のとおり、Bランプシールドは、特に急曲線である線形が特徴であり、 $R=50\sim 71\text{m}$ の区間が掘削範囲の約半分を占めている。また、発進から到達までの掘進箇所によって異なる特徴があり、最初の事業用地内を抜けた後に、神奈川県道111号大田神奈川線（以下、大田神奈川線）を通過し、街路を挟んだ事業用地内を掘削した後、再び大田神奈川線下を通過し、民地下を掘削する線形である。

一方、図3.1-2に示すとおり、縦断線形は5.9～7.6%で常に急勾配となっており、縦断線形も大きな特徴がある。また、事業用地を抜けた後の浅い土層は、軟弱粘性土で構成されている。掘進開始すぐの区間においては、低土被り区間が続き、到達部付近における硬質な上総層以外の区間は、地盤も不安定であるため、掘進に留意する必要があった。

以上のようにBランプシールドは、4つの出入口シールドトンネルの中でも最も厳しい条件であり、加えて地盤状況を把握していない最初の掘進であることから、掘進には事前対策を実施するなど、特に留意して施工した。

まず、低土被り区間においては、写真3.1-1および図3.1-3で示すように最小土被り1.3mであることから、セグメントの浮き上がり対策を実施した。図3.1-4で示すシールド発進から延長30m区間のトンネル直上では、厚さ50cmの防護コンクリートを設置した。また、シールドトンネルの掘進前に、周辺において排水井戸を設置することで、急激な地下水位の上昇による浮力の増加を防ぐ処置をした。

次に、街路部および軟弱粘性土区間の掘進管理が課題であったことから、発進後の事業用地内においてトライアル施工を行うことで掘進による影響を確認し、軟弱粘性土区間の掘進管理に反映することとした。また、街路下を通過する際には、路面に計測点を設け、常

時監視しながら掘進を行うことで、安全に施工した。なお、民地の沖積粘性土区間においても密に計測点を配置して監視することで、大きな影響もなく、掘進を完了させることができた。

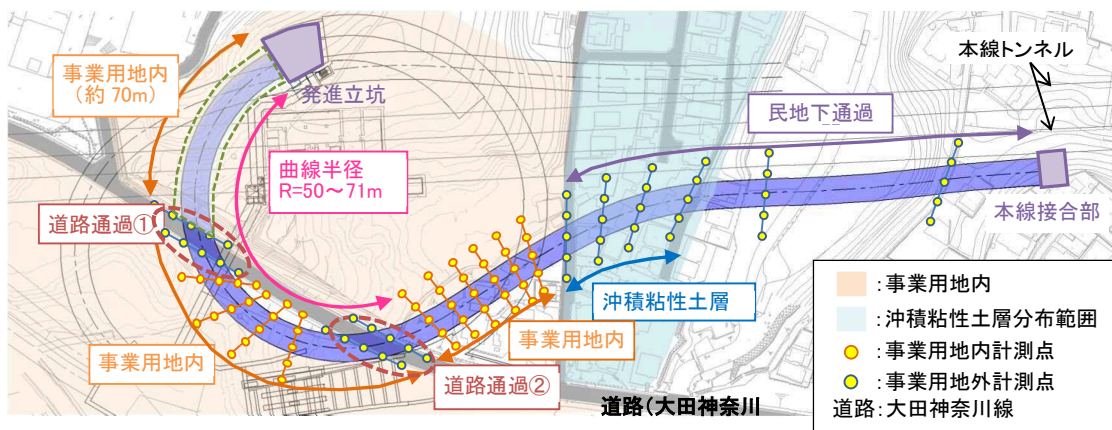


図 3.1-1 B ランプシールド平面図

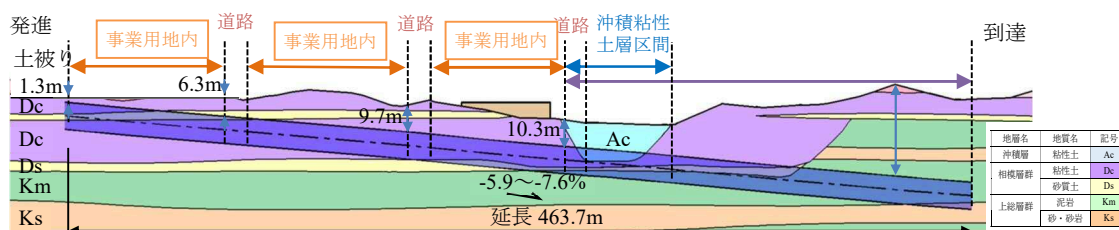


図 3.1-2 B ランプシールド縦断面図



写真 3.1-1 B ランプシールド発進部の状況

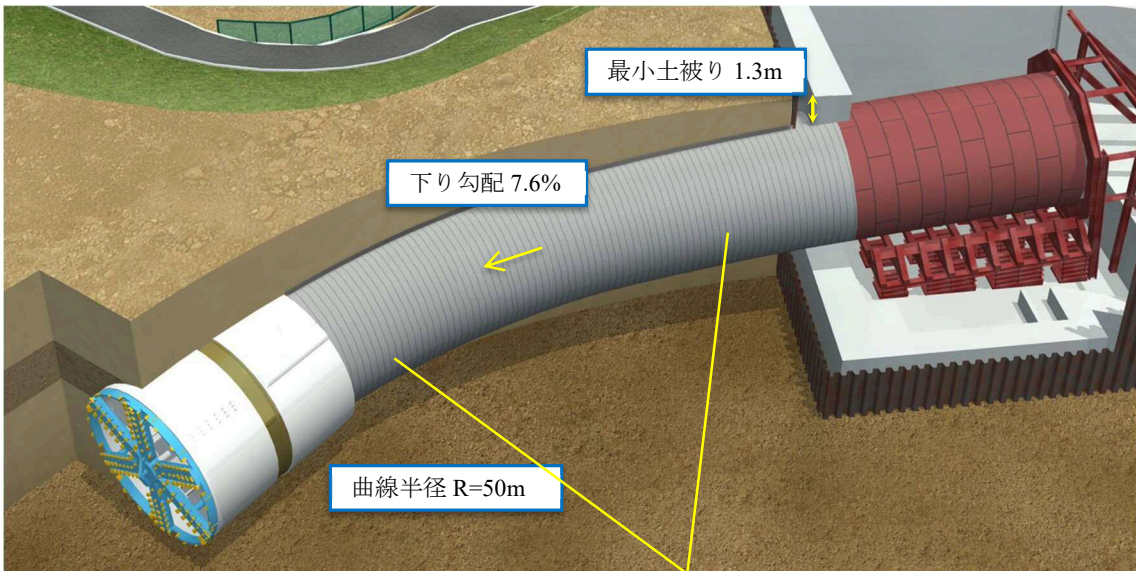


図 3.1-3 B ランプシールド発進部イメージ図

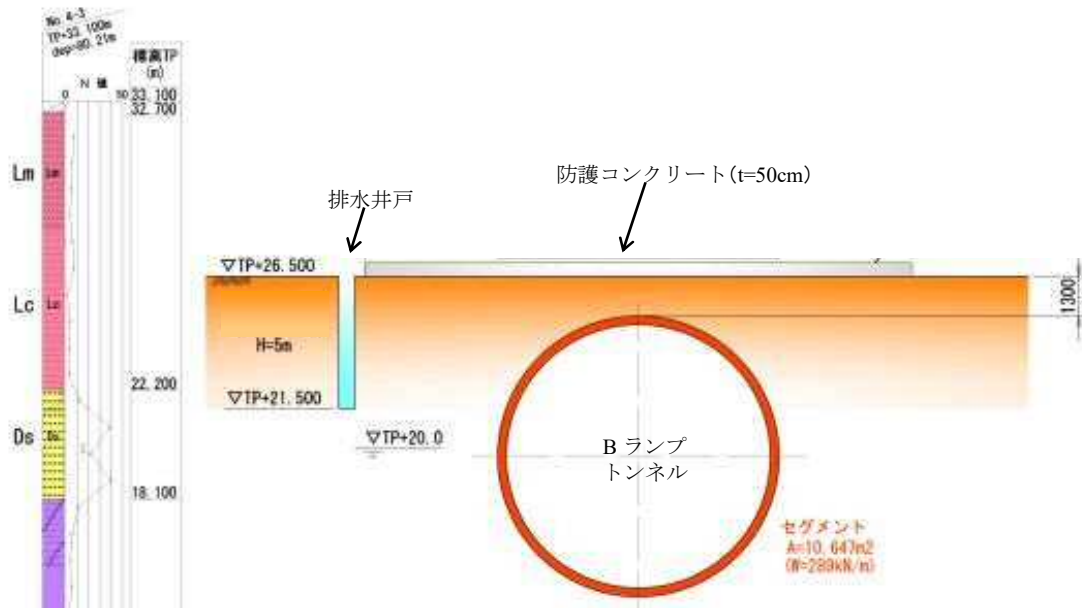


図 3.1-4 B ランプシールド発進部浮き上がり対策

B ランプシールドを除く 3 本のシールドトンネルは、大田神奈川線を挟んだ事業用地内からの掘進となり、図 3.1-5 のとおり同一の立坑からの掘進となる。3 本のシールドトンネルは、本研究の対象工事とした港北行き本線トンネルの入口となる A ランプシールド、生麦行き本線トンネルの入口となる C ランプシールド、出口となる D ランプシールドである。立坑が構築されている用地内には、東京電力の送電鉄塔（以下、鉄塔）が既設構造物として存在しており、近接施工となるため、シールドトンネルの掘進は事前の FEM 解析を用いて近接影響検討を実施し、鉄塔への影響と工程に最も有利となる D ランプシールド、C ランプシールド、A ランプシールドの順番に施工することとした。

3 本のシールドトンネルの掘進で最も早い D ランプシールドの平面図を図 3.1-6 に示す。D ランプシールドは、発進立坑から約 100m の区間が事業用地内の掘進であり、その後は街路となる綱島街道を約 320m 進み、民地下を掘進する。D ランプシールドの掘進における最も大きな課題は、発進後約 15m に位置する鉄塔への影響を踏まえた掘進であった。鉄塔との近接状況を図 3.1-7 に示す。同じ立坑から発進する A、C、D ランプシールドの中で、D ランプシールドは鉄塔と最も近接し、最小離隔は 4.7m となる。また、最小離隔における土被りは 7.9m であり、地表から天端まで軟弱なローム層が堆積している。鉄塔の近接施工対策は、鉄塔の 4 本の基礎が独立していたことから、不動沈下等の変状が発生しやすいため、写真 3.1-2 のように基礎をコンクリート版で一体化する補強を行った。また、鉄塔基礎の 4 箇所の変位を常に確認するために、トータルステーションによる自動計測を実施した。

C ランプシールドにおいては、図 3.1-8 に示す平面図、図 3.1-9 に示す縦断図のとおり発進から約 100m の区間は、大田神奈川線を除いて事業用地内の掘進である。その後、延長約

140m の位置で先行して掘進した B ランプシールドを下越しし、民地下を掘削する急曲線の平面線形である。また、C ランプシールドは、D ランプシールドと同様に発進直後に位置する鉄塔の近接施工に加え、大田神奈川線付近および民地下にある沖積粘性土層下の掘進が特徴である。その中でも最も大きな課題である、C ランプシールドの掘進に伴う B ランプシールドへの影響は、最小離隔が約 5.5m であるため、B ランプシールド内に 20 箇所の坑内計測点を設け、水準測量にて変位を確認しつつ、適切な掘進管理をすることで、大きな影響がなく完了することができた。

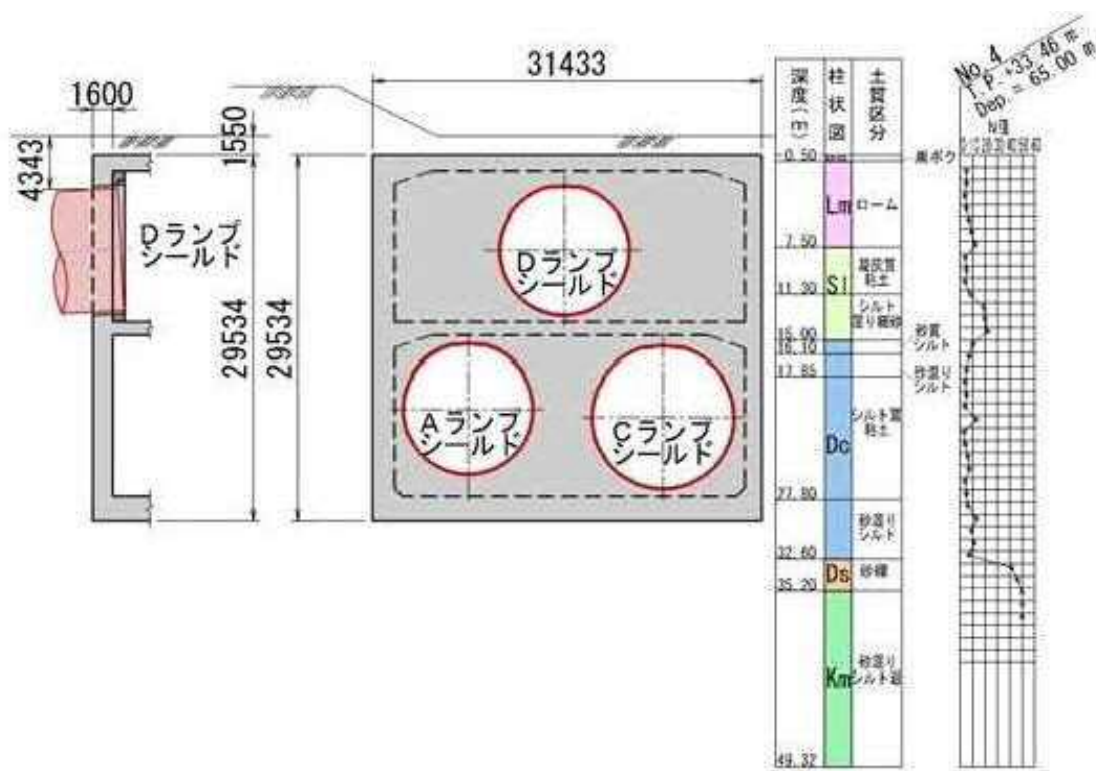


図 3.1-5 ACD ランプシールド発進立坑断面図

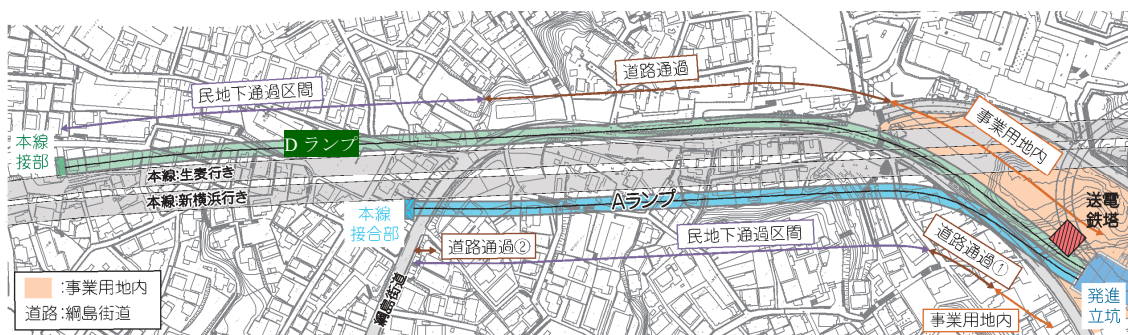


図 3.1-6 D ランプシールド平面図

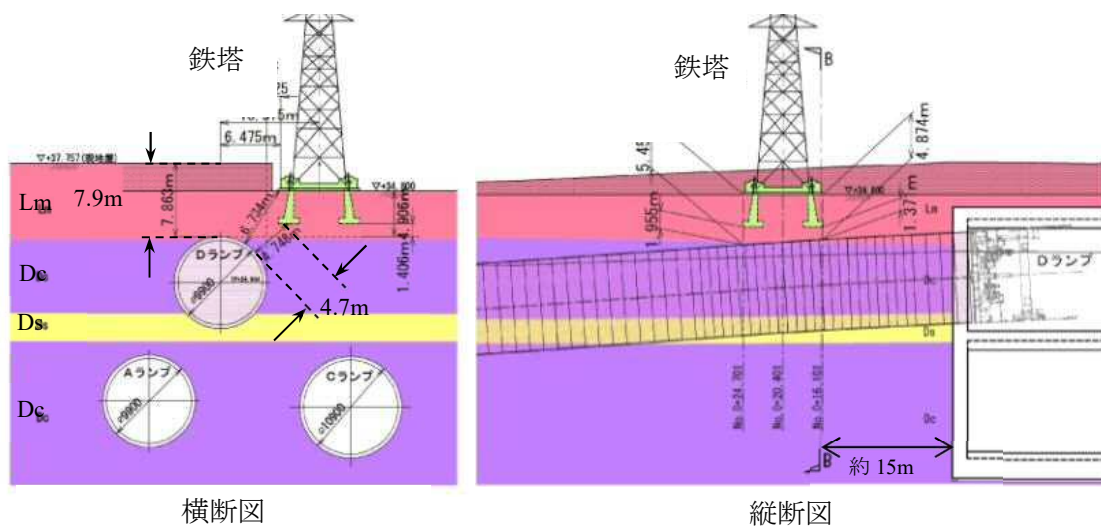


図 3.1-7 鉄塔と出入口トンネルの近接状況



写真 3.1-2 鉄塔の補強状況



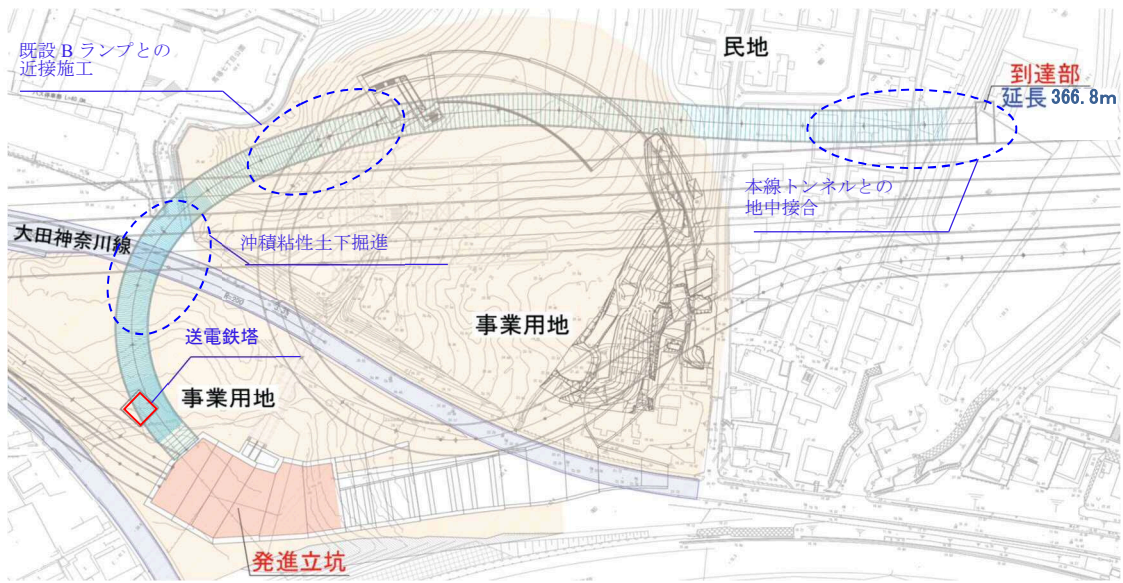


図 3.1-8 C ランプシールド平面図

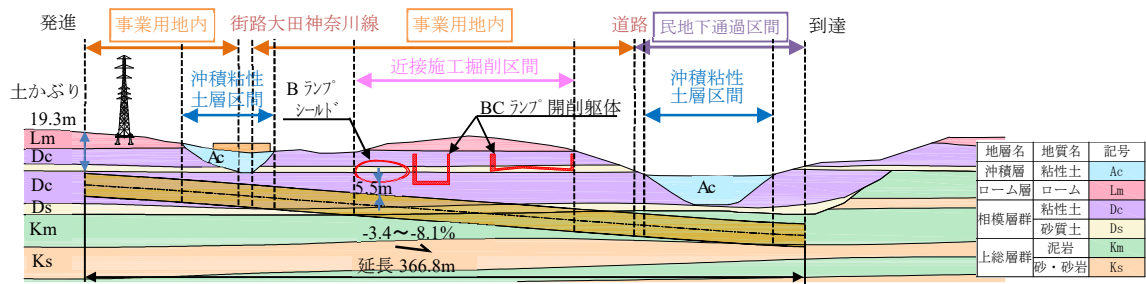


図 3.1-9 C ランプシールド縦断面図

## 3.2 二次元 FEM を用いた影響検討

### 3.2.1 本線トンネルに対する近接影響の検討方針

本研究の対象とした馬場出入口トンネル工事は、4本のランプシールドトンネルが本線トンネルに対し、それぞれ異なる条件で近接するため、全てを近接影響検討することは時間を要することが想定された。そのため、施工前における最初の検討では、代表的な1箇所を検討することとした。1箇所を選定するにあたり、最も懸念した課題であった本線トンネルへの影響に対し、最大の影響を与える時期が最も近接する到達部と仮定し、更に4本のランプシールドトンネルの中で最も本線トンネルとの平面離隔距離が最小となる B ランプシールドを代表として検討することとした。

検討方法は、図 2.3.2-1 にて示した首都高速道路の標準的な検討手法である、二次元 FEM 解析により、ランプシールド掘削による本線トンネルへの影響を増分断面力として算出し、別途算定するはりばねモデルにより自重、土圧、水圧等による常時断面力と合成することで、本線トンネルのセグメントの安全性の照査を実施する手法とした。

### 3.2.2 常時断面力の算定

B ランプシールドの構築による本線トンネルの影響を算出するにあたり、まず常時断面力を算定した。常時断面力は、本線トンネルが設計検討時に算出しなければならなかったため、計画段階で得られている情報から算出することとした。解析条件等を以下にそれぞれ示す。

#### (1) 検討断面

検討断面は、本線トンネルのセグメントの安全性の照査を実施するにあたり、最も B ランプシールドと本線トンネルが近接する到達部を対象として、**図 3.2.2-1** のとおり定めた。検討断面における本線トンネルと B ランプシールドの平面離隔は 0.334m である。また、設計条件は**表 3.2.2-1** のとおり定めた。側方土圧係数および地盤反力係数は、各トンネルが Km 層および Ks 層に位置しており、N 値が 50 以上である非常に硬質であることから、トンネル標準示方書を定められている値の範囲で、側方土圧係数を小さくなる値、地盤反力係数は大きくなる値を採用した<sup>1)</sup>。なお、対象となる地盤は、**図 3.1-2** に示したとおり、上総層の泥岩、砂・砂礫である。

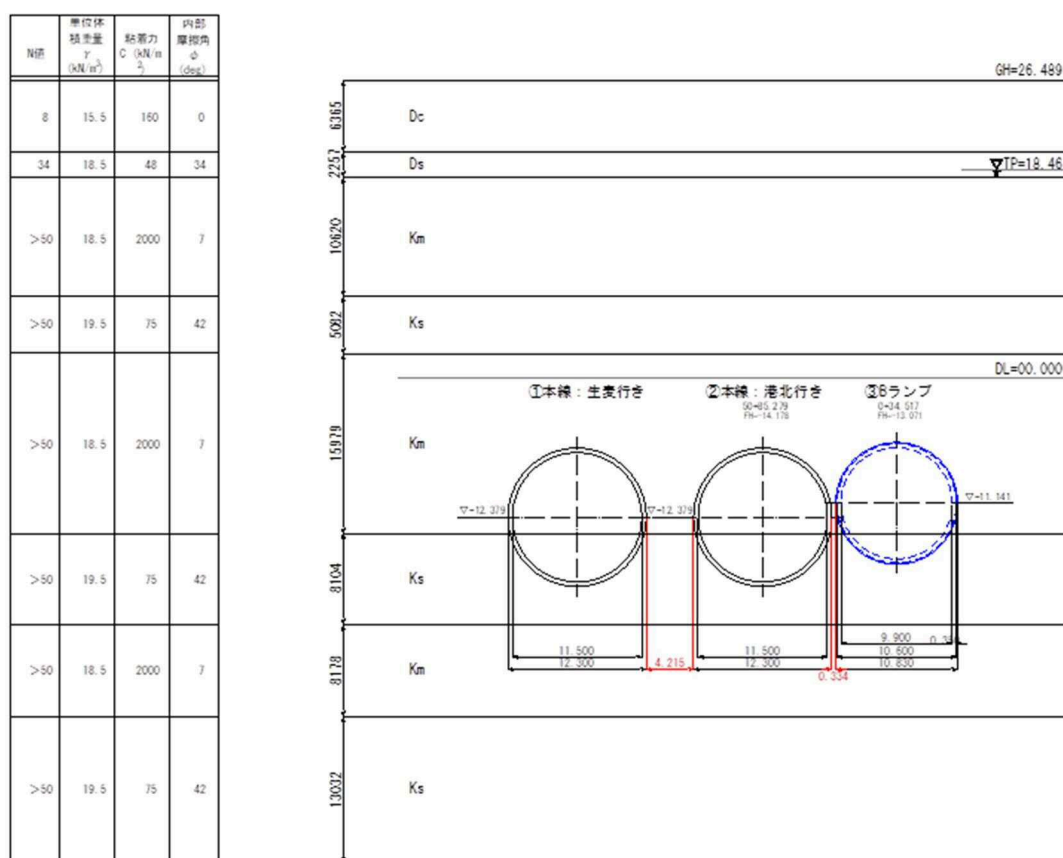


図 3.2.2-1 検討断面図

表 3.2.2-1 常時断面力算定時の設計条件

土被り	H = 32.718m	
地下水位 (GL-8.028m)	Hw = 24.690m	
上載荷重 (地表面)	Po = 20kN/m <sup>2</sup>	
特殊荷重 (管頂より 5 m 上方)	P = 80kN/m <sup>2</sup> (緩み高さの計算時に考慮)	
側方土圧係数 (Km 層)	λ = 0.35	
側方土圧係数 (Ks 層)	λ = 0.35	
	外荷重解析時	自重解析時
地盤反力係数 法線方向 (Km 層)	k1 = 50.000 MN/m <sup>3</sup>	k2 = 5.000 MN/m <sup>3</sup>
地盤反力係数 法線方向 (Ks 層)	k1 = 50.000 MN/m <sup>3</sup>	k2 = 5.000 MN/m <sup>3</sup>
接線方向 (Km 層)	k1 = 16.667 MN/m <sup>3</sup>	k2 = 1.667 MN/m <sup>3</sup>
接線方向 (Ks 層)	k1 = 16.667 MN/m <sup>3</sup>	k2 = 1.667 MN/m <sup>3</sup>

(2) 荷重の算定

本線トンネルに作用する荷重は、1 リング当たりで算出し、荷重の算定においては、土のアーチング効果が期待できるため、Terzaghi のゆるみ土圧を用いた。本線トンネルのセグメント緒元を表 3.2.2-2、算出した作用荷重の一覧と作用荷重分布図を表 3.2.2-3 および図 3.2.2-2 にそれぞれ示す。また、セグメントの安全性の照査は、継手の照査も行うことから、セグメント継手の回転ばね定数およびリング継手のせん断ばね定数を表 3.2.2-4 のように設定した。

表 3.2.2-2 本線トンネルセグメント緒元

項 目		単 位	諸 元 値
セグメント外径	D <sub>o</sub>	mm	12,300
セグメント内径	D <sub>i</sub>	mm	11,500
セグメント幅	B	mm	2,000
セグメント高	h	mm	400
図 心 半 径	R <sub>c</sub>	mm	5,950
分 割 数	n	分割	9

表 3.2.2-3 作用荷重の算定結果

項 目		単位	荷重値	
			1m 当り	1 リング当り
頂部鉛直土圧	$P_{e1}$	$\text{kN/m}^2$	108.456	216.912
底部鉛直土圧	$P_{e2}$	$\text{kN/m}^2$	14.994	29.988
頂部水平土圧	$q_{e1}$	$\text{kN/m}^2$	38.555	77.110
底部水平土圧	$q_{e2}$	$\text{kN/m}^2$	75.537	151.074
頂部水圧	$P_{w1}$	$\text{kN/m}^2$	248.900	497.800
底部水圧	$P_{w2}$	$\text{kN/m}^2$	367.900	735.800
円周単位当り重量	$w_g$	$\text{kN/m}^2$	10.400	20.800

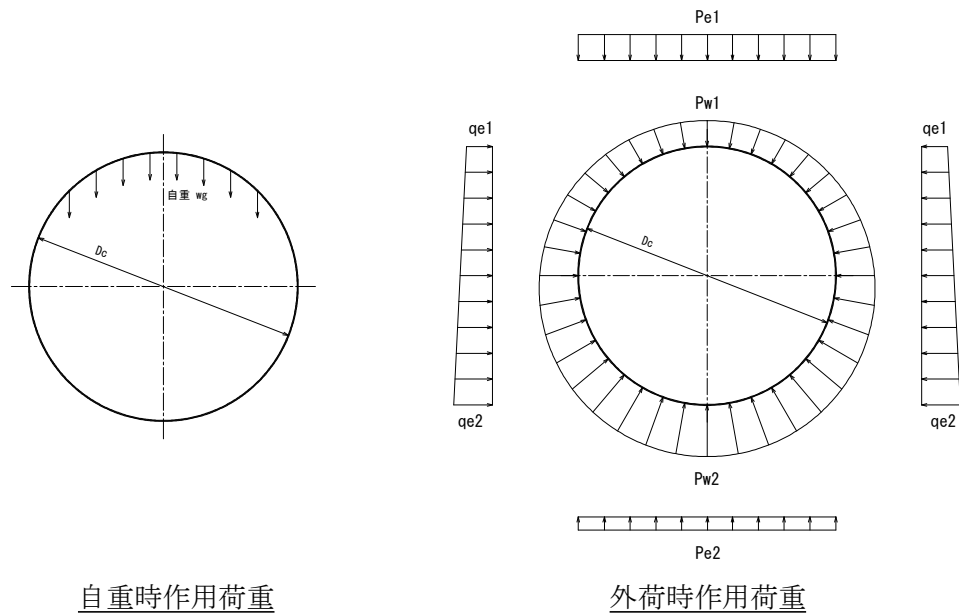


図 3.2.2-2 作用荷重分布図

表 3.2.2-4 回転ばね定数およびリング継手のせん断ばね定数

自重時	回転ばね定数の第一勾配	$K_{\theta 2}$	$(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad})$	733,900
外荷重時	回転ばね定数の第一勾配	$K_{\theta 1}$	$(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad})$	$\infty$
	回転ばね定数の第二勾配	$K_{\theta 2}$	$(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad})$	733,900
	第一勾配と第二勾配の変化点のモーメント	$M_c$	$(\text{kN}\cdot\text{m})$	291.78
リング継手 1 箇所あたりのせん断ばね定数	法線方向	$K_{sr}$	$(\text{kN}/\text{m})$	790,000
	接線方向	$K_{st}$	$(\text{kN}/\text{m})$	0

### (3) 常時断面力の算定

解析モデルは、セグメントをはり、セグメント継手およびリング継手、地盤をばねで表した「はりばねモデル」とし、セグメントリングはトンネル延長方向に接続して設置されているセグメントをモデル化した。なお、モデルは甲乙組を考慮し、2リングとした。解析に用いたはりばねモデルを図 3.2.2-3 に示す。また、解析に用いた構造図、荷重図、常時断面力図を図 3.2.2-4 から図 3.2.2-7 にそれぞれ示す。

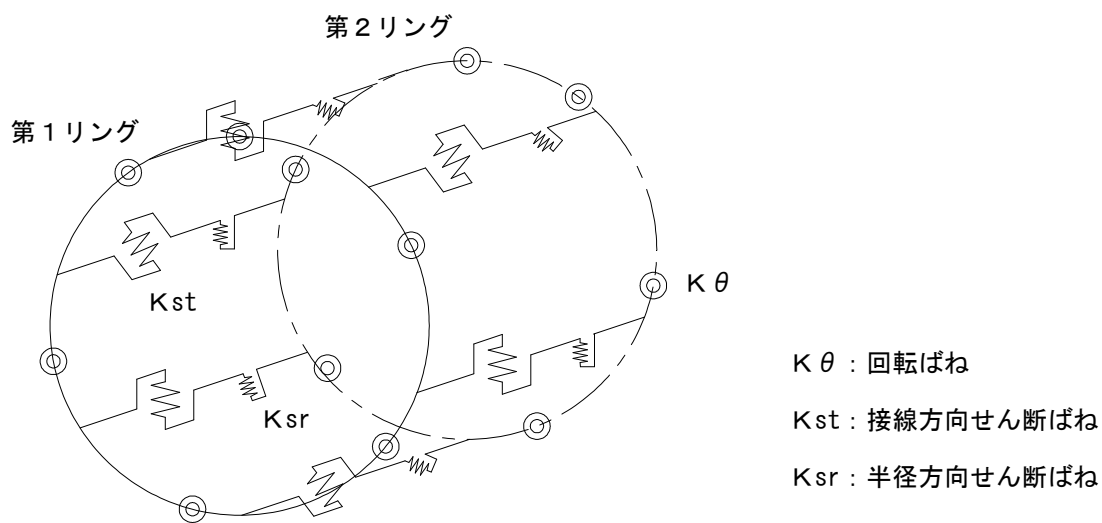


図 3.2.2-3 はりばねモデル概略図

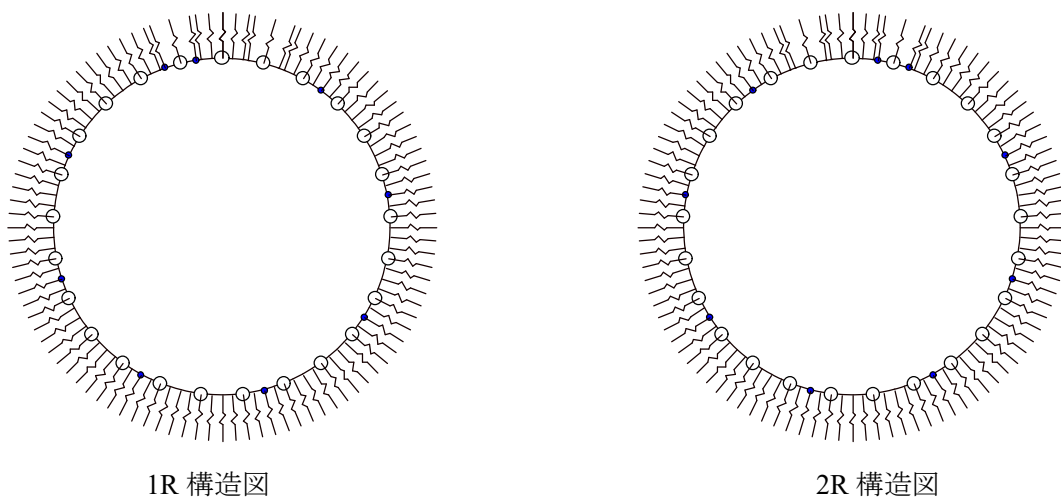
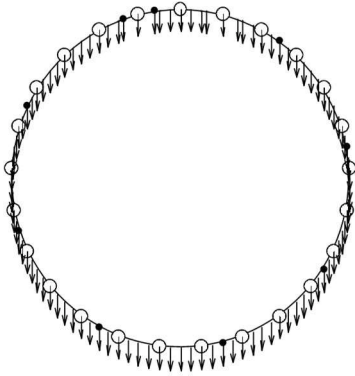
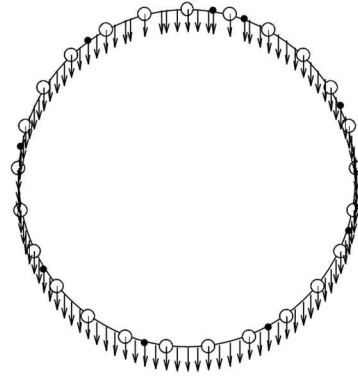


図 3.2.2-4 各リングの構造図

自重時



1R 荷重図 (自重時)

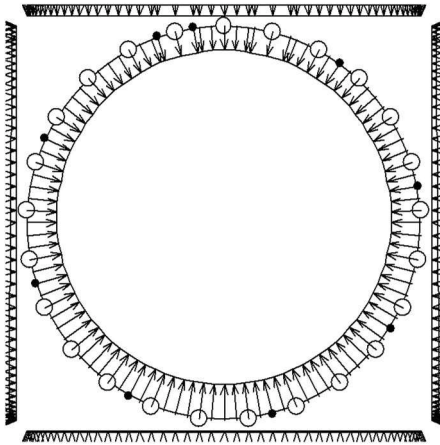


2R 荷重図 (自重時)

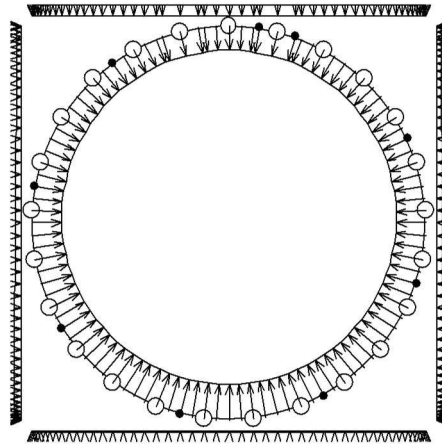
外荷重時

節点番号 : 51 最大荷重 : -735.8000  
スケール  $\rightarrow$  735.800 [kN/m]

節点番号 : 51 最大荷重 : -735.8000  
スケール  $\rightarrow$  735.800 [kN/m]



1R 荷重図 (外荷重時)



2R 荷重図 (外荷重時)

図 3.2.2-5 各リングの荷重図

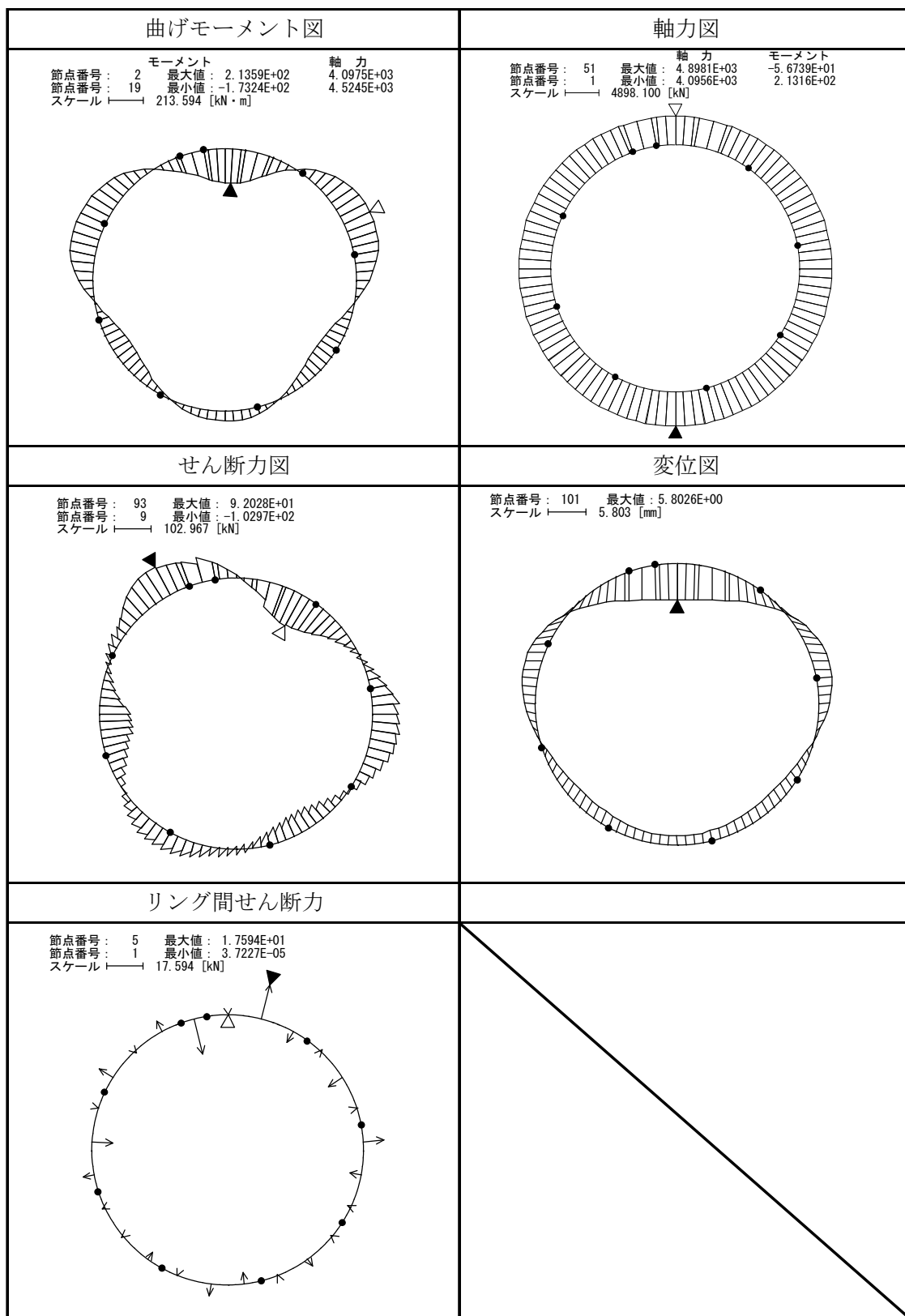


図 3.2.2-6 1R 常時 断面力・変位図



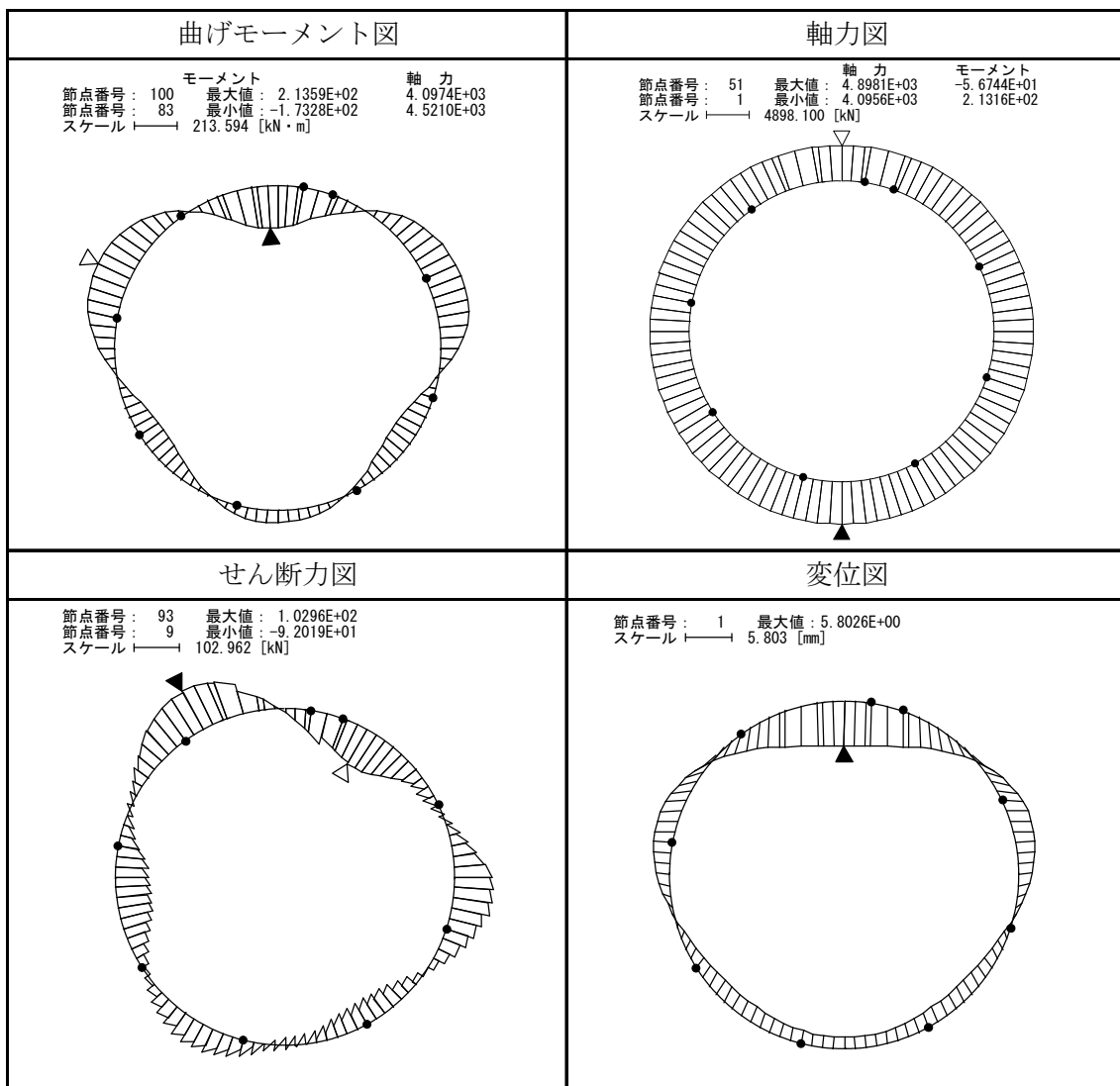


図 3.2.2-7 2R 常時 断面力・変位図

### 3.2.3 増分断面力の算定

増分断面力の算定は、B ランプシールド掘進時における、本線トンネルへの影響を二次元 FEM の線形弾性解析にて算出した。解析条件等を以下に示す。

#### (1) 検討モデル

検討モデルにおける地層は成層とみなし、モデル領域は深さ方向にトンネル下端より  $2D$  ( $D$  は本線トンネルの外径) とし、水平方向はトンネル側部より  $45^\circ + \alpha$  の範囲として設定した。検討モデルを図 3.2.3-1 に示す。モデルは、本線トンネルと B ランプシールドの位置関係を図 3.2.2-1 の検討断面と同様に設定した。

また、拘束条件はモデル側部で水平方向を固定し、鉛直方向を自由、モデル底部で水平方向および鉛直方向固定とした。

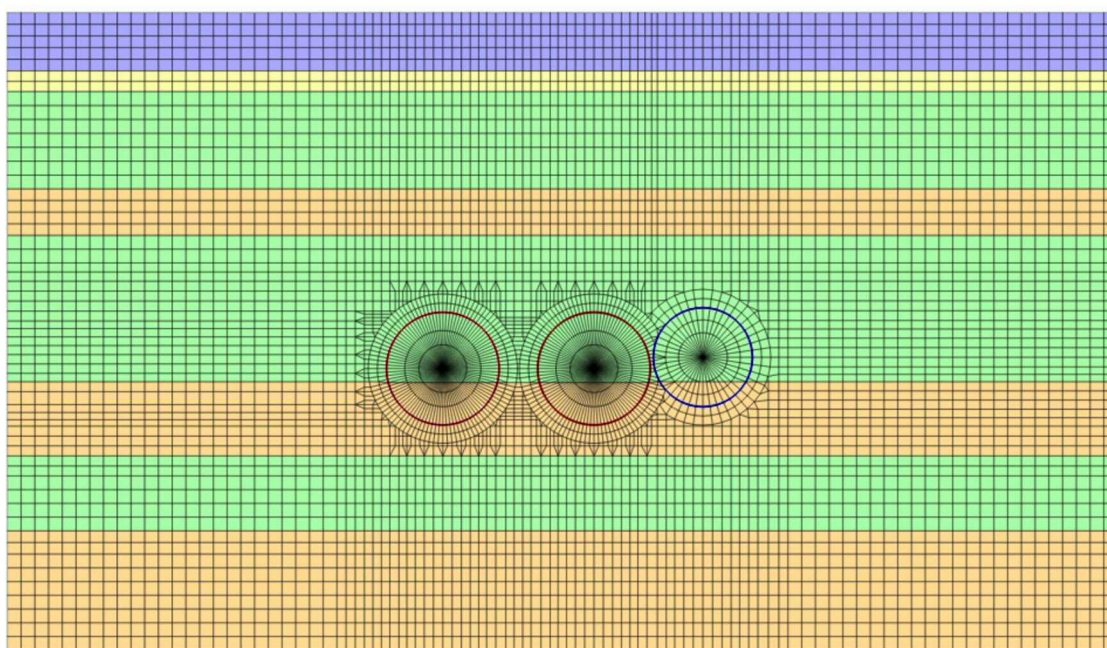


図 3.2.3-1 検討モデル図

#### (2) 物性値

解析に使用する地盤物性値を表 3.2.3-1、本線シールドトンネルおよび B ランプシールドのセグメントの物性値を表 3.2.3-2 にそれぞれ示す。地盤物性値は、土質調査結果から設定しているが、設定の詳細については、後述する本研究で実施した三次元解析と同様の値であることから、第 4 章にて詳細を述べる。

また、応力開放率は受注者のこれまでの施工実績による、FEM フィッティング解析によって設定した。類似として設定した工事は、調布駅付近連続立体交差工事（土木）第 4 工区そ

の3とし、現場計測結果を用いてセグメントの軸力および曲げモーメントと、応力開放率をパラメータとしたFEM解析の結果との比較により、応力開放率を算出した。応力開放率は、10%、20%、35%で試算した結果を図3.2.3-2、図3.2.3-3、図3.2.3-4にそれぞれ示す。

現場計測と比較した結果、図3.2.3-5および図3.2.3-6に示すように応力開放率10%における正曲げおよび負曲げの曲げモーメントの最大値が一致したが、施工性を考慮し、安全側の20%と設定した。

表 3.2.3-1 地盤物性値

地層	ヤング率 $E$ (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (°)
Dc	19,000	0.40	15.50	160.00	0.00
Ds	20,000	0.30	18.50	48.00	34.00
Km	450,000	0.30	18.50	2,000.00	7.00
Ks	78,000	0.30	19.50	75.00	42.00

表 3.2.3-2 セグメント物性値

名称	ヤング率 $E$ (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	断面積 $A$ (m <sup>2</sup> )	断面二次モーメント $I$ (m <sup>4</sup> )
B ランプ	39,000,000	0.20	26	0.4000	0.00533333
本線	33,000,000	0.20	26	0.4000	0.00533333

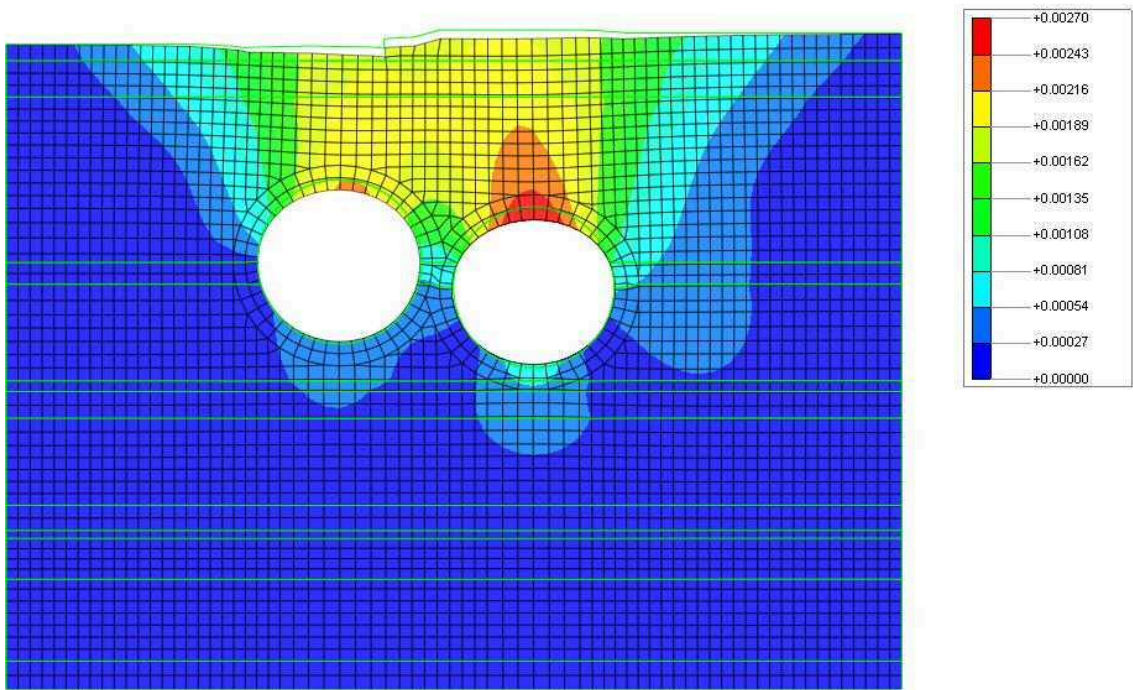


図 3.2.3-2 応力開放率 10%の変位図

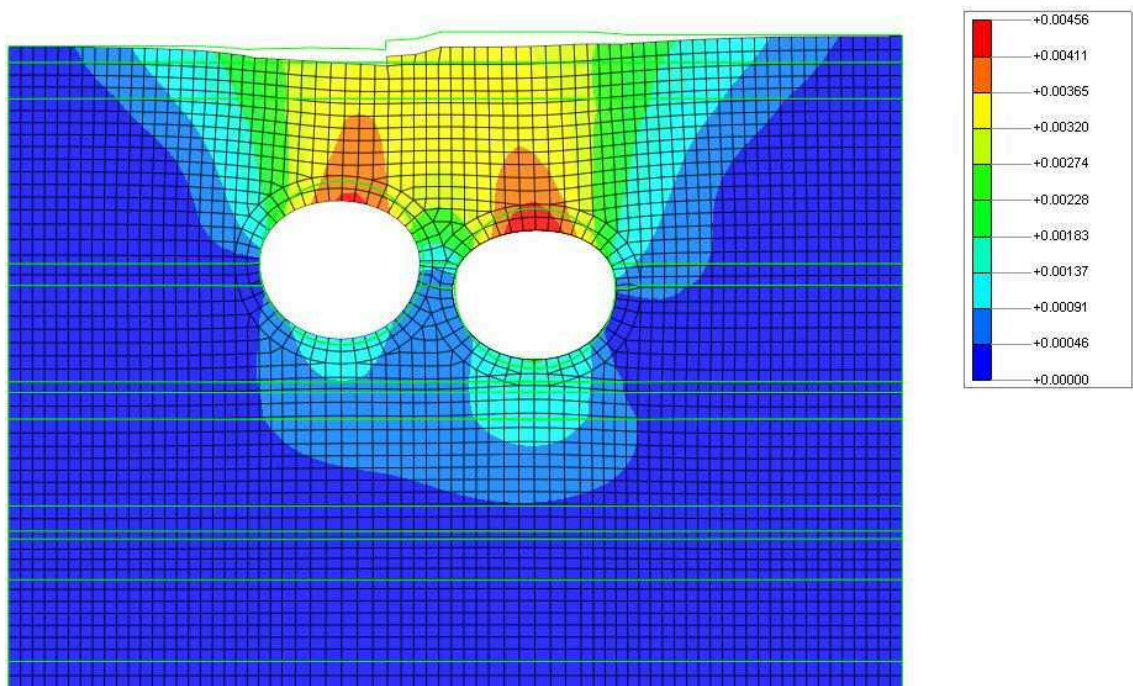


図 3.2.3-3 応力開放率 20%の変位図

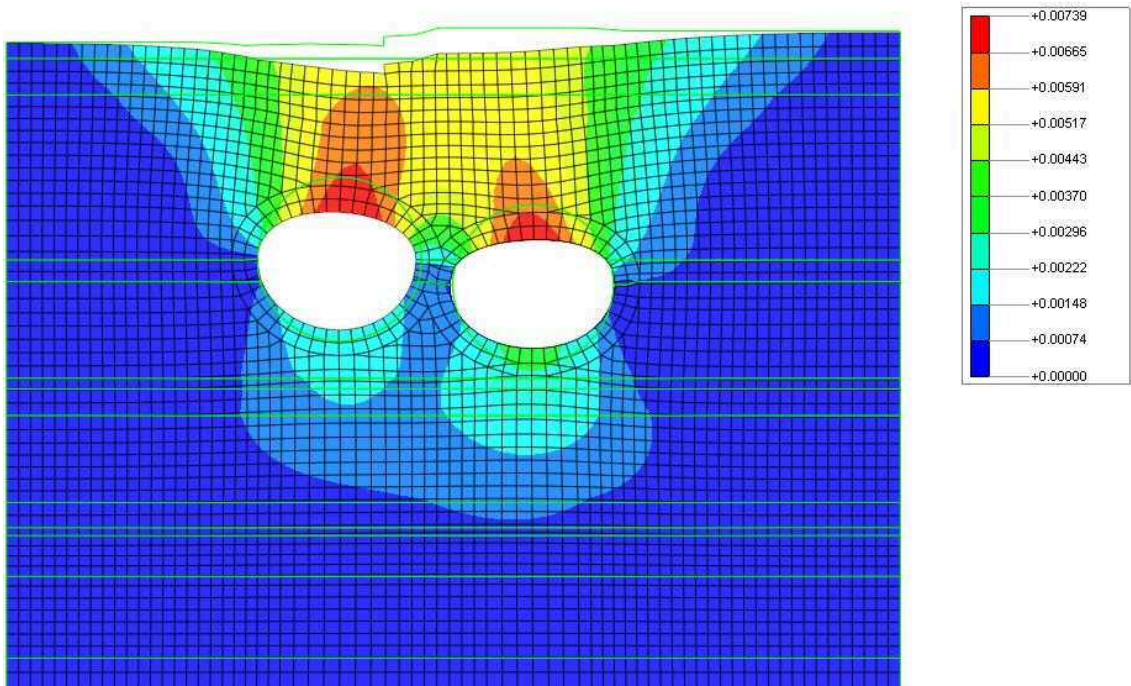


図 3.2.3-4 応力開放率 35%の変位図

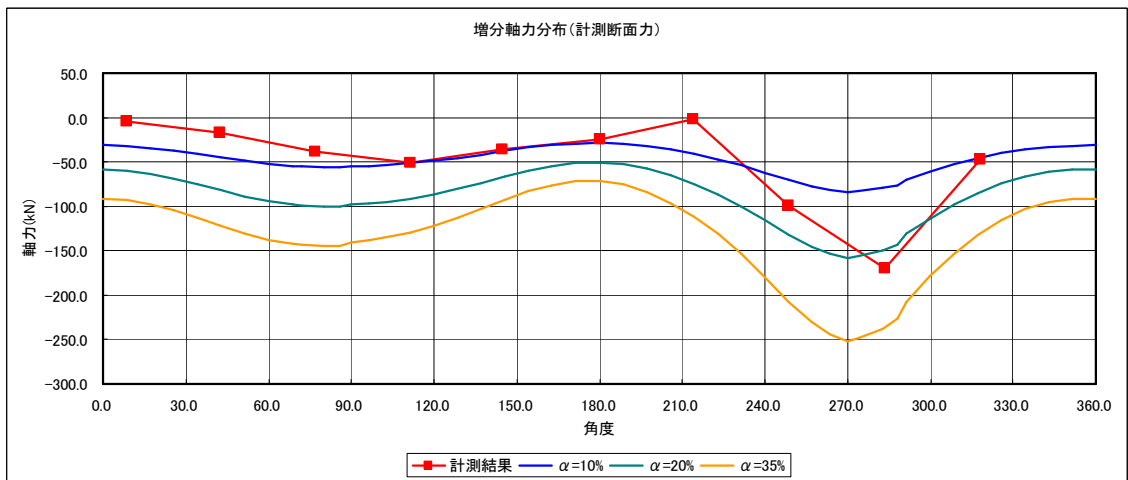


図 3.2.3-5 増分軸力分布図

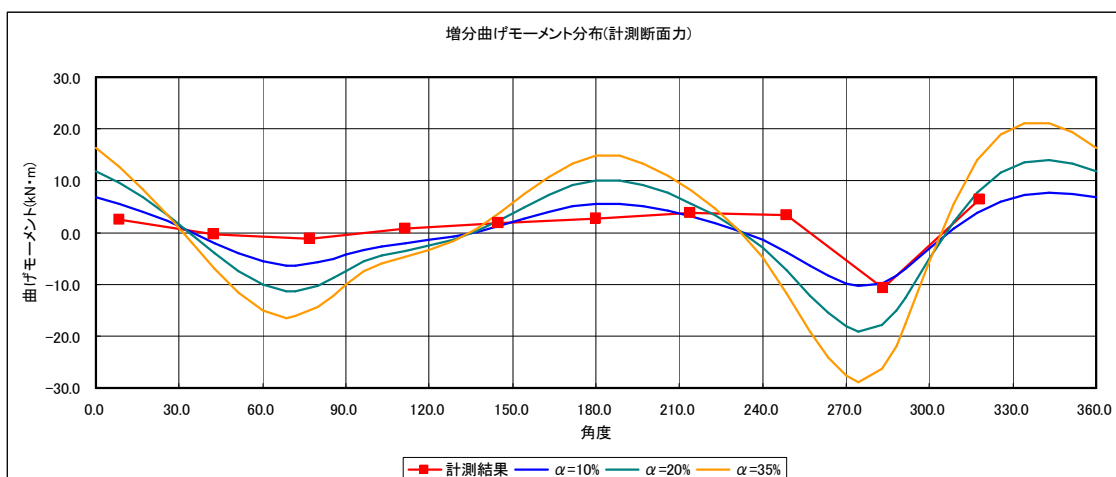


図 3.2.3-6 増分曲げモーメント分布図

### (3) 解析ステップ

解析ステップは、初期状態から B ランプシールド掘削までのステップを設けることとした。解析ステップを表 3.2.3-3 に示す。解析ステップは、初期応力状態から、本線トンネルの構築を再現し、最終ステップは最も本線トンネルへの影響が大きいと考えられる B ランプシールド掘削までとし、定めた応力開放率を反映させている。なお、 $(1-\alpha)$  の応力開放は、首都高の社内基準に準じて行わないこととした<sup>2)</sup>。

表 3.2.3-3 解析ステップ

解析ステップ	内容
ステップ 1	初期応力解析+上載荷重 20kN/m <sup>2</sup>
ステップ 2	本線掘削, 応力開放率 $\alpha$
ステップ 3	本線セグメント組立
ステップ 4	本線, 応力開放率 $(1-\alpha)$ 非考慮
ステップ 5	本線掘削, 応力開放率 $\alpha$
ステップ 6	本線セグメント組立
ステップ 7	本線, 応力開放率 $(1-\alpha)$ 非考慮
ステップ 8	B ランプ掘削, 応力開放率 $\alpha$

### 3.2.4 算定結果

表 3.2.3-3 の最終ステップにおける変位図を図 3.2.4-1、軸力図を図 3.2.4-2、曲げモーメント図を図 3.2.4-3、せん断力図を図 3.2.4-4 にそれぞれ示す。増分断面力は、解析ステップ 7 および 8 の差分とし、常時断面力と合成した。

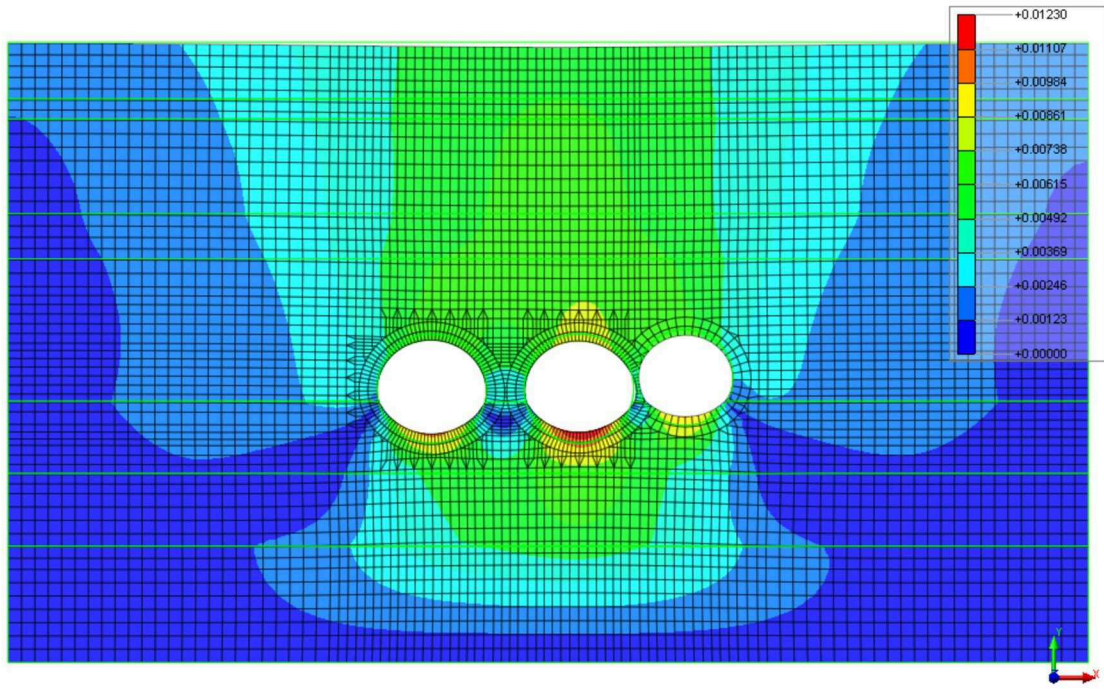
また、解析結果を踏まえた、本線トンネルの応力度照査結果を表 3.2.4-1、セグメント継手の照査を表 3.2.4-2、リング間継手の照査を表 3.2.4-3 にそれぞれ示す。なお、各表の中で軸力の符号は圧縮を正とし、応力度の符号は圧縮を正、引張を負として示している。

図 3.2.4-1 の変位図より、B ランプシールドトンネルに近接している本線シールドトンネルの下端が最も変位していることがわかる。また、図 3.2.4-2、図 3.2.4-3、図 3.2.4-4 では、それぞれ B ランプシールドトンネルに最も近い本線シールドトンネルのスプリングライン部に影響が発生している。これらは解析の最終ステップにおいて、B ランプシールドトンネルの応力開放が発生したことによる引き込まれの影響が顕著に発生していることを示している。

表 3.2.4-1 の主断面の応力度照査は、コンクリート圧縮応力度、外縁側鉄筋応力度、内縁側鉄筋応力度、平均せん断応力度において許容応力度を満足するか確認した。応力度の中で最も大きかったコンクリート圧縮応力度においても 70%であった。また、表 3.2.4-2 におけるセグメント継手部の応力度照査は、コンクリート圧縮応力度、鉄筋応力度、コッターのせん断応力度において許容応力度を満足するか確認した。照査結果ではコッターのせん断応力度が他と比較し、許容応力度に対して最も近い結果となったが、いずれの結果も超過することなく、安全性を確認した。

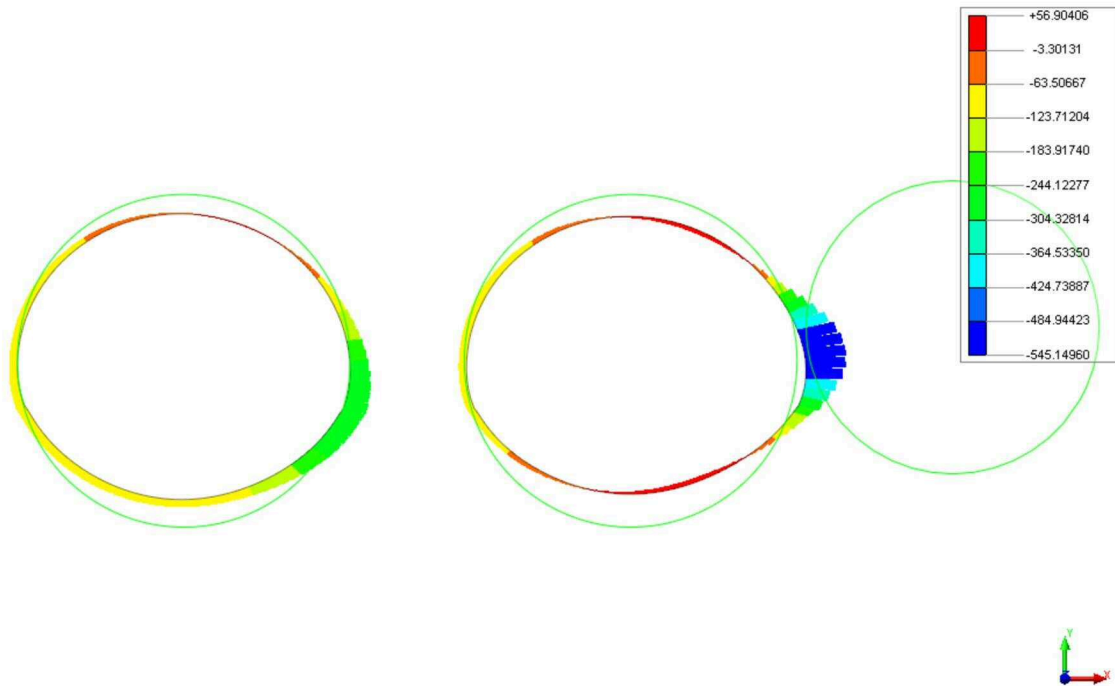
表 3.2.4-3 のリング間継手部の応力度照査は、許容せん断力に対して大きく下回り、余裕のある結果となった。なお、表中における許容せん断力  $S_a$  は、法線方向のリング間継手抵抗面積に法線方向の許容せん断応力度乗じることで算出している。

以上の結果により、最も本線シールドトンネルと近接する B ランプシールドの掘進における影響が許容値未満であったことから、4 本のランプシールドの掘進全てに対し、本線シールドトンネルの健全性が確保できると判断した。



[ UNIT ] kN , m  
 [ DATA ] 検討断面\_01c , DISP-DXYZ(V) , STAGE:10 STEP:1

図 3.2.4-1 B ランプシールド掘削時の変位図



[ UNIT ] kN , m  
 [ DATA ] 検討断面\_01c , Bar Force-Axial Force , STAGE:10 STEP:1

図 3.2.4-2 B ランプシールド掘削時の軸力図



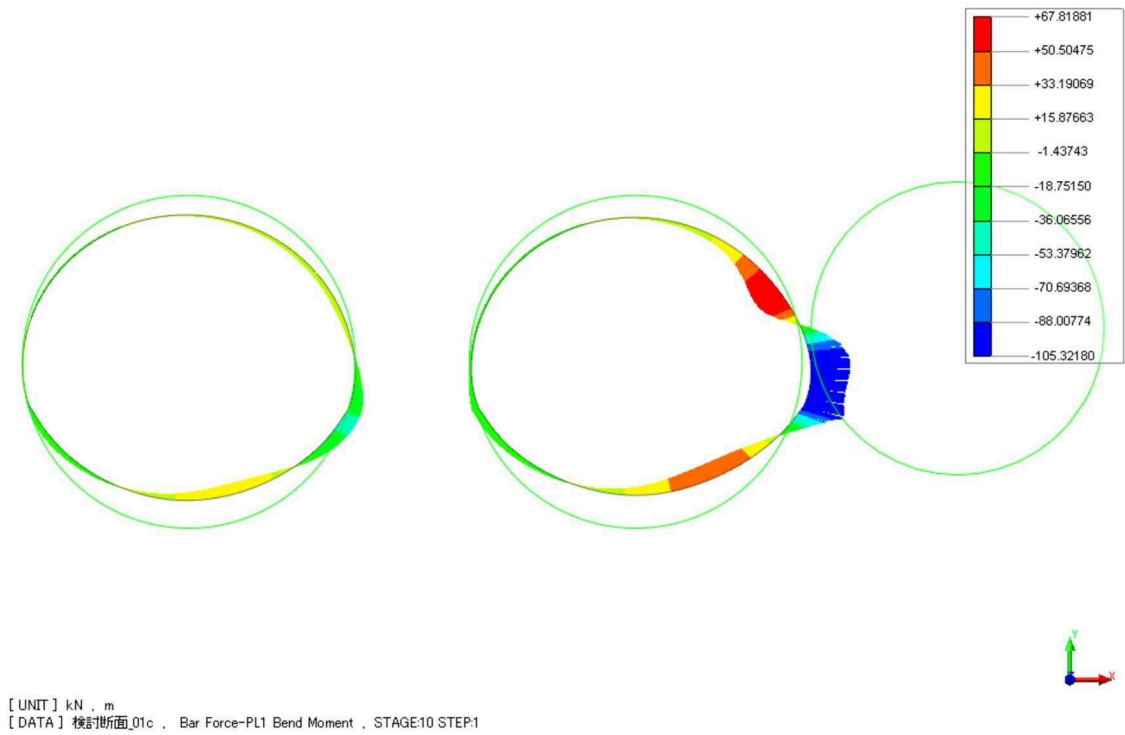


図 3.2.4-3 B ランプシールド掘削時の曲げモーメント図

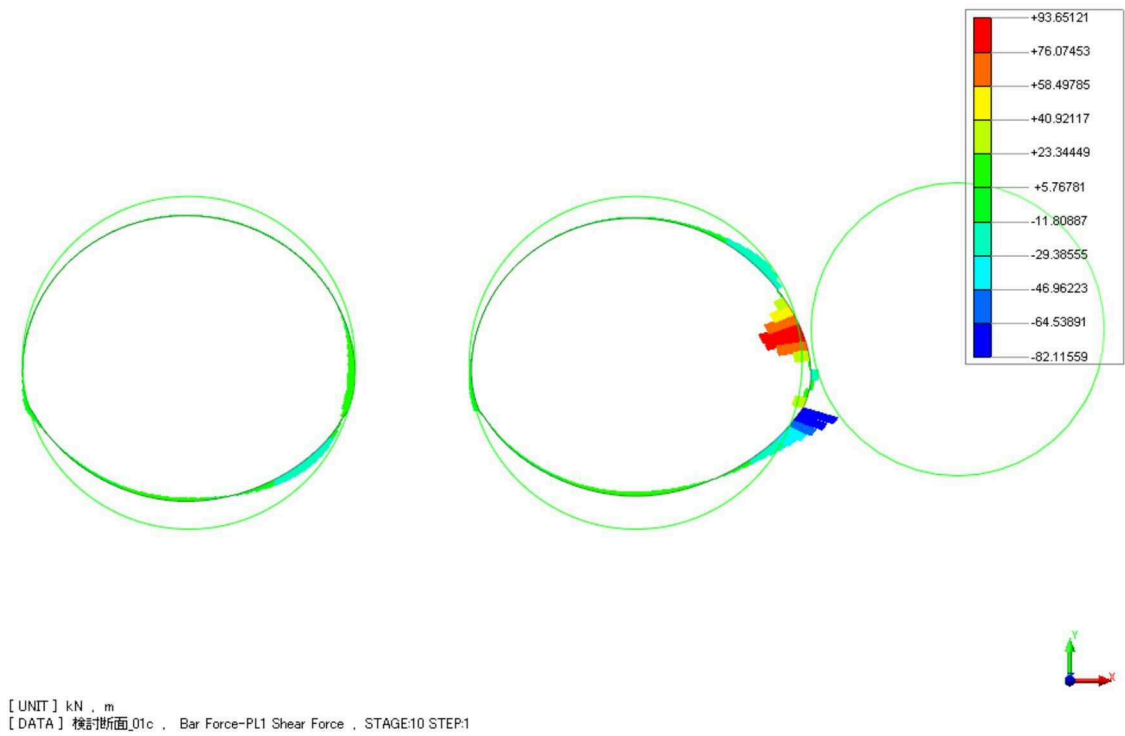


図 3.2.4-4 B ランプシールド掘削時のせん断力図

表 3.2.4-1 主断面の応力度照査結果

				曲げ最大・最小		軸力最大・最小	
				正曲げ 最大	負曲げ 最大	軸力 最大	軸力 最小
節 点 番 号				2	25	24	4
断面力	曲げモーメント	M	(kN・m/ring)	220.86	-301.10	-297.44	214.67
	軸力	N	(kN/ring)	4044.3	5538.5	5659.5	4025.2
	せん断力	S	(kN/ring)	205.77	205.77	—	—
断面 緒元	セグメント幅	B	(mm)	2000	2000	2000	2000
	セグメント高	H	(mm)	400	400	400	400
	圧縮側鉄筋被り	C	(mm)	60	75	75	60
	有効高さ	d	(mm)	325	340	340	325
	外縁側鉄筋量	A <sub>s1</sub>	(mm <sup>2</sup> )	3033.8	3033.8	3033.8	3033.8
			D16*14 +D13*2	D16*14 +D13*2	D16*14 +D13*2	D16*14 +D13*2	
	内縁側鉄筋量	A <sub>s2</sub>	(mm <sup>2</sup> )	3033.8	3033.8	3033.8	3033.8
D16*14 +D13*2			D16*14 +D13*2	D16*14 +D13*2	D16*14 +D13*2		
コンクリートの圧縮応力度	$\sigma_c$	(N/mm <sup>2</sup> )	8.1	11.2	11.3	8.0	
			OK	OK	OK	OK	
外縁側鉄筋応力度	$\sigma_{so}$	(N/mm <sup>2</sup> )	105.2	41.3	43.9	103.8	
			OK	OK	OK	OK	
内縁側鉄筋応力度	$\sigma_{si}$	(N/mm <sup>2</sup> )	34.6	140.2	141.7	35.2	
			OK	OK	OK	OK	
平均せん断応力度 (=S/(B・d))	$\tau_{max}$	(N/mm <sup>2</sup> )	0.32	0.30	—	—	
			OK	OK	—	—	
コンクリートの許容圧縮応力度	$\sigma_{ca}$	(N/mm <sup>2</sup> )	16				
鉄筋の許容引張応力度	$\sigma_{sa}$	(N/mm <sup>2</sup> )	200				
コンクリートの許容せん断応力度	$\tau_a$	(N/mm <sup>2</sup> )	1.03				

表 3.2.4-2 セグメント継ぎ手部の応力度照査結果

				曲げ最大・最小		軸力最大・最小	
				正曲げ 最大	負曲げ 最大	軸力 最大	軸力 最小
節 点 番 号				2R-4	1R-23	1R-23	2R-4
断面力	曲げモーメント	M	(kN・m/ring)	196.46	-264.42	-264.42	196.46
	軸力	N	(kN/ring)	4037.8	5636.2	5636.2	4037.8
	せん断力	S	(kN/ring)	182.89	182.89	—	—
断面 緒元	セグメント幅	B	(mm)	2000	2000	2000	2000
	セグメント高	H	(mm)	400	400	400	400
	有効高さ	d	(mm)	200	200	200	200
	鉄筋量	A <sub>bs</sub>	(mm <sup>2</sup> )	794.4	794.4	794.4	794.4
				D16*4	D16*4	D16*4	D16*4
コッター断面積	A <sub>s</sub>	(mm <sup>2</sup> )	1680.0	1680.0	—	—	
コンクリートの圧縮応力度	σ <sub>c</sub>	(N/mm <sup>2</sup> )	8.7	11.9	11.9	8.7	
			OK	OK	OK	OK	
鉄筋応力度	σ <sub>s</sub>	(N/mm <sup>2</sup> )	74.6	104.1	104.1	74.6	
			OK	OK	OK	OK	
コッターのせん断応力度	τ <sub>max</sub>	(N/mm <sup>2</sup> )	108.9	108.9	—	—	
			OK	OK	—	—	
コンクリートの許容圧縮応力度	σ <sub>ca</sub>	(N/mm <sup>2</sup> )	16				
鉄筋の許容引張応力度	σ <sub>sa</sub>	(N/mm <sup>2</sup> )	200				
コッターの許容せん断応力度	τ <sub>a</sub>	(N/mm <sup>2</sup> )	130				

表 3.2.4-3 セグメント継ぎ手部の応力度照査結果

リング間最大せん断力 S (kN)	許容せん断力 Sa (kN/箇所)	照査
8.797	153	OK

## 3.3 本線トンネルの変形量を考慮した検討

### 3.3.1 検討の概要

各出入口トンネルの施工前においては、到達部においてそれぞれ本線トンネルと異なる離隔距離で近接するため、全ての出入口トンネル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、セグメントの許容変形量として算出した。なお、増分断面力については、最も近接する 3.2 にて述べた、B ランプシールドの結果を使用した。

本研究においては、後述する新たに再現した三次元 FEM 解析が A ランプシールドであることから、本線トンネルの変形量を考慮した検討結果も A ランプシールドを対象として述べる。

施工前の検討は、出入口トンネルと近接する本線トンネルをはりばねによってモデル化し、ランプシールド掘進による泥土圧およびランプシールド通過後の土水圧の影響を与え、本線トンネルのセグメントリングの安全性を照査した。算出した結果は施工における管理値として活用し、ランプシールドの掘進計画に反映させた。なお、二次元はりばね解析は、本線トンネルに対する応力が変化すると考えられる、シールド掘進時およびシールド通過後の 2 ケースをモデル化した。モデル化した 2 ケースは、作用させる荷重や地盤ばねの範囲を変化させ、本線トンネルのセグメントに発生する応力度が長期許容応力度に達する際の変形量を算出した。

### 3.3.2 解析諸条件

解析の諸条件は、二次元はり一ばね解析のパラメータおよび検討条件を表 3.3.2-1 および表 3.3.2-2、図 3.3.2-1 および図 3.3.2-2 に示す。また、各状況における本線トンネルの変形状況を図 3.3.2-3 に示す。

設定したパラメータは、本線トンネルが Km 層および Ks 層に位置し、地質が N 値 50 以上であることを基準に設定した。地質の設定の詳細については、後述する本研究で実施した三次元解析と同様としていることから、第 4 章にて詳細を述べる。

まず、地盤ばねは裏込め注入および形状保持装置が採用されていることから、トンネル標準示方書に定められているとおり、地盤反力係数と同じ値を採用することとした<sup>3)</sup>。外荷重の地盤反力係数は、首都高速道路の設計において、トンネル標準示方書に準拠することとしており<sup>4)</sup>、トンネル標準示方書に記載のある地盤反力係数の中で、N 値 30 以上を目安とした非常によく締まった砂質土として、30 から 50 MN/m<sup>3</sup> で設定されていることから<sup>1)</sup>、本線トンネルの地質が N 値 50 以上の硬質な地盤であることを踏まえ、最大値である 50 MN/m<sup>3</sup> を採用した。一方、自重の地盤反力係数は、道路トンネルのように大断面となるトンネルにおいて、土水圧等による断面力に対し、自重によって生じる断面力が大きくなることが想定されることから、首都高速道路では設計に反映させることとしている<sup>5)</sup>。自重の地盤反力係数は、図 3.3.2-4 に示す解析ケースによる結果と中央環状新宿線の実績を踏まえ、5000 kN/m<sup>3</sup> に設定した。側方土圧係数においても、地盤反力係数と同様に首都高速道路の設計において、トンネル標準示方書に準拠することとしており<sup>4)</sup>、トンネル標準示方書に記載のある地盤反力係数の中で、N 値 30 以上を目安とした非常によく締まった砂質土として、0.35 から 0.45 で設定されていることから<sup>1)</sup>、本線トンネルの地質が N 値 50 以上の硬質な地盤であることを踏まえ、側方土圧が小さくなる 0.35 を採用した。

コンクリートの単位体積重量は、本線トンネルのセグメントの情報を他工事に提示ができなかったため、RC セグメントであったことを踏まえ、トンネル標準示方書に記載されている一次覆工における、鉄筋コンクリート製セグメントの値を採用することとした<sup>6)</sup>。

はり一ばね解析の検討は、ランプシールドの掘進時およびランプシールド通過後でそれぞれ荷重と地盤ばねについて異なる条件とした。A ランプシールドの掘進は、4 つのランプシールドにおいて、最後の掘進であったため、計画切羽圧はこれまでのランプシールドの掘進実績を参考とし、主働土圧に水圧を加えた値として設定した。一方、ランプシールド通過後においては、本線シールドの側方には既に入出口シールドが構築されていることから、荷重は土水圧のみとなり、A ランプに近接している本線トンネルの側方土圧を 0% から 50% 低減して荷重を変化させ、さらにランプシールドの通過側においては、90 度の範囲で地盤ばねを控除した。

また、変形状況については、シールド掘進時においては、掘進による切羽圧の影響が本線トンネルに対し、側方方向から荷重が作用することで、本線トンネルが横つぶれに変形する

ことを想定した。一方、シールド通過後は、本線トンネルがシールド側に引き込まれることによって、元の変形に戻る縦つぶれの変形が生じると考えた。

表 3.3.2-1 二次元はりばね解析のパラメーター一覧

パラメータ	採用値
地盤ばね（自重）	5MN/ m <sup>3</sup> （全周）
地盤ばね（切羽圧）	50MN/ m <sup>3</sup> （全周）
地盤ばね（土水圧）	50MN/ m <sup>3</sup> （全周）
側方土圧係数	0.35
地盤反力係数（外荷重）	50000 kN/ m <sup>3</sup>
地盤反力係数（自重）	5000 kN/ m <sup>3</sup>
水の単位体積重量	10 kN/ m <sup>3</sup>
コンクリート単位体積重量	26kN/ m <sup>3</sup>

表 3.3.2-2 二次元はりばね解析の検討概要

	シールド掘進時	シールド通過後
荷重	土水圧+掘進時の計画切羽圧の 30% ～100%が側方から作用 計画切羽圧は主働土圧+水圧	土水圧 (A ランプ近接側の側方土圧を 0% ～50%に低減)
地盤ばね	全周設定	A ランプ通過側 90 度を除いた範囲
許容応力度	長期許容応力度に対して評価	

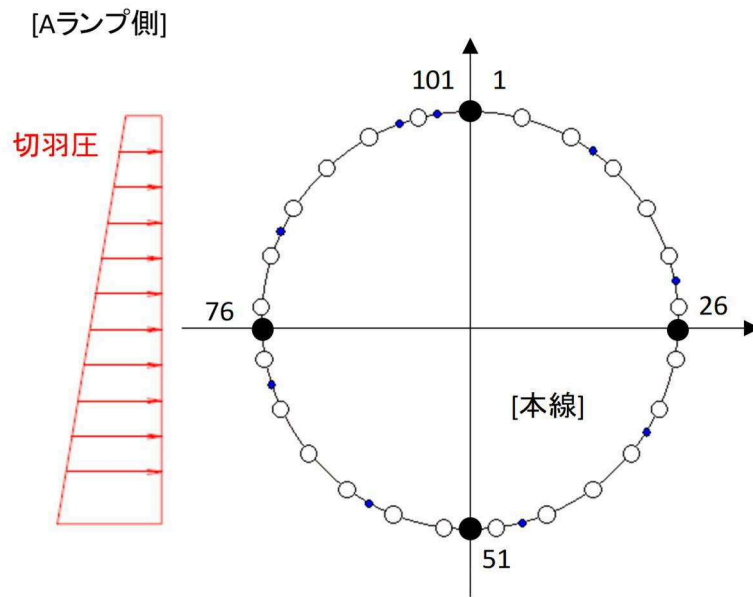


図 3.3.2-1 シールド掘進時の荷重状況（切羽圧相当荷重）

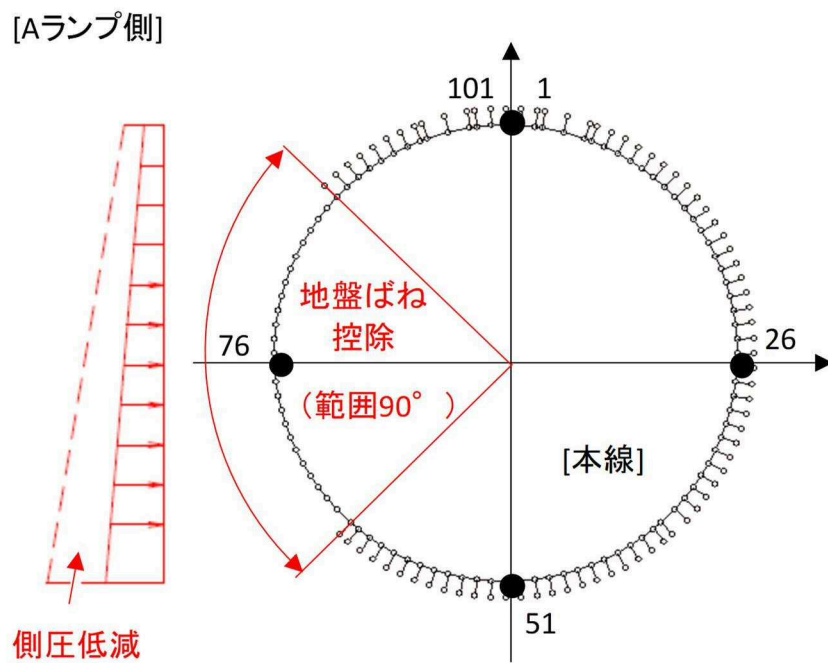


図 3.3.2-2 シールド通過時の荷重状況（地盤ばね控除，側圧低減）

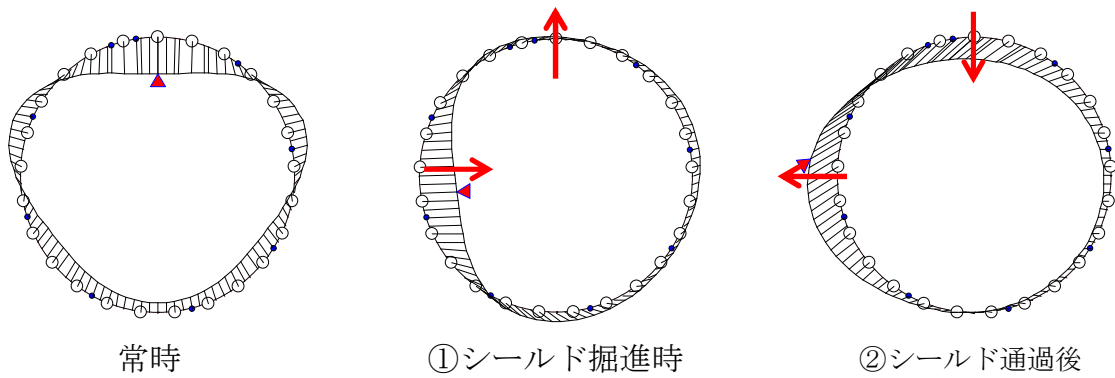


図 3.3.2-3 本線トンネルにおける各状況での変形状況

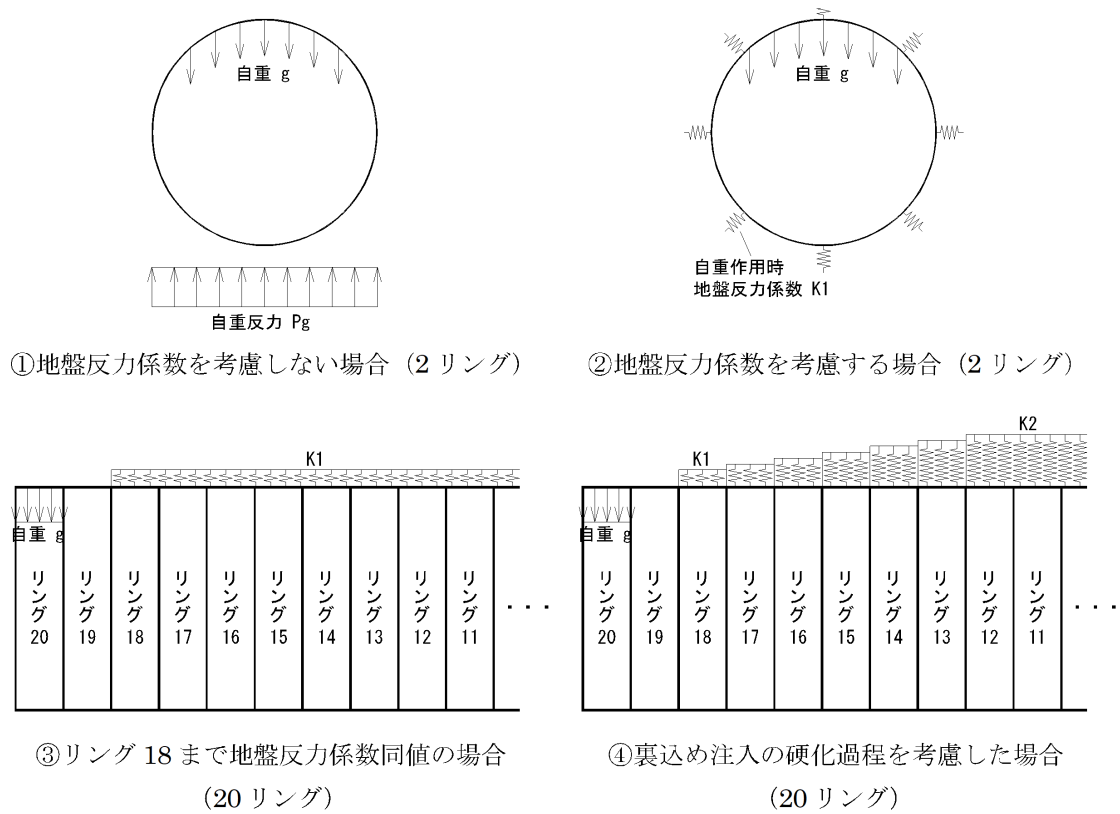


図 3.3.2-4 自重による地盤反力係数を考慮した解析方法



### 3.3.3 解析結果

A ランプシールド掘進によるはりばね解析の結果について、A ランプシールド掘進時を表 3.3.3-1 に、A ランプシールド通過後を表 3.3.3-2 にそれぞれ示す。

はりばね解析の結果は、それぞれ本線トンネルのセグメントにおける、コンクリート圧縮応力度、鉄筋応力度、平均せん断応力度を照査した。A ランプシールド掘進時は、計画切羽圧の 40%を作用させた場合、本線トンネルのコンクリートの圧縮応力度が許容圧縮応力度を超過する結果となった。また、A ランプシールド通過後は、出入口トンネル近接側の設計側方土圧が 0%の場合、本線トンネルのコンクリート圧縮応力度が許容応力度を超過する結果となった。解析の結果から、本線トンネルの変形量と許容圧縮応力度に対する比率（以下、応力度）を図 3.3.3-1 および図 3.3.3-2 に示す。

図 3.3.3-1 における変形量は、水平方向は本線トンネルの内空側をプラスで示し、鉛直方向は、外面側をプラスで示している。図 3.3.3-2 における変形量は、水平方向は本線トンネルの外面側をプラスで示し、鉛直方向は、内空側をプラスで示している。応力度は、コンクリートの許容圧縮応力度に対する、本線トンネルのセグメントコンクリートの圧縮応力度の比率を示している。A ランプシールドの掘進に対する本線トンネルの変形量の管理値は、本線トンネルの応力度が 1.0 を超えた場合、本線トンネルにランプシールドの掘進の影響により有害な変状が発生すると仮定し、応力度 1.0 の本線トンネルの変形量を管理値の目安とした。このため、図 3.3.3-1、図 3.3.3-2 の検討結果より A ランプシールドの施工は、シールド掘進時においては、本線トンネルのスプリングライン部の水平変形量が本線トンネルの内空側に 12mm、外面側に 18mm に至った際に掘進を停止する変形量を掘進による管理値として設定し、施工した。

表 3.3.3-1 A ランプシールド掘進時の解析結果

	土水圧+切羽圧 30%	土水圧+切羽圧 40%
コンクリートの圧縮応力度	15.6 N/mm <sup>2</sup>	17.8 N/mm <sup>2</sup>
	許容圧縮応力度 16.0	
鉄筋応力度	0 N/mm <sup>2</sup>	0 N/mm <sup>2</sup>
	許容引張応力度 200	
平均せん断応力度	0.37 N/mm <sup>2</sup>	0.45 N/mm <sup>2</sup>
	許容せん断応力度 1.03	
最大変形量（水平）	11.2 mm	15.5 mm
最大変形量（鉛直）	2.6 mm	3.5 mm

表 3.3.3-2 A ランプシールド通過後の解析結果

	土水圧+側方土圧 50%	土水圧+側方土圧 0%
コンクリートの圧縮応力度	14.0 N/mm <sup>2</sup>	18.2 N/mm <sup>2</sup>
	許容圧縮応力度 16.0	
鉄筋応力度	0 N/mm <sup>2</sup>	20.6 N/mm <sup>2</sup>
	許容引張応力度 200	
平均せん断応力度	0.34 N/mm <sup>2</sup>	0.52 N/mm <sup>2</sup>
	許容せん断応力度 1.03	
最大変形量 (水平)	13.3 mm	23.9 mm
最大変形量 (鉛直)	6.6 mm	10.1 mm

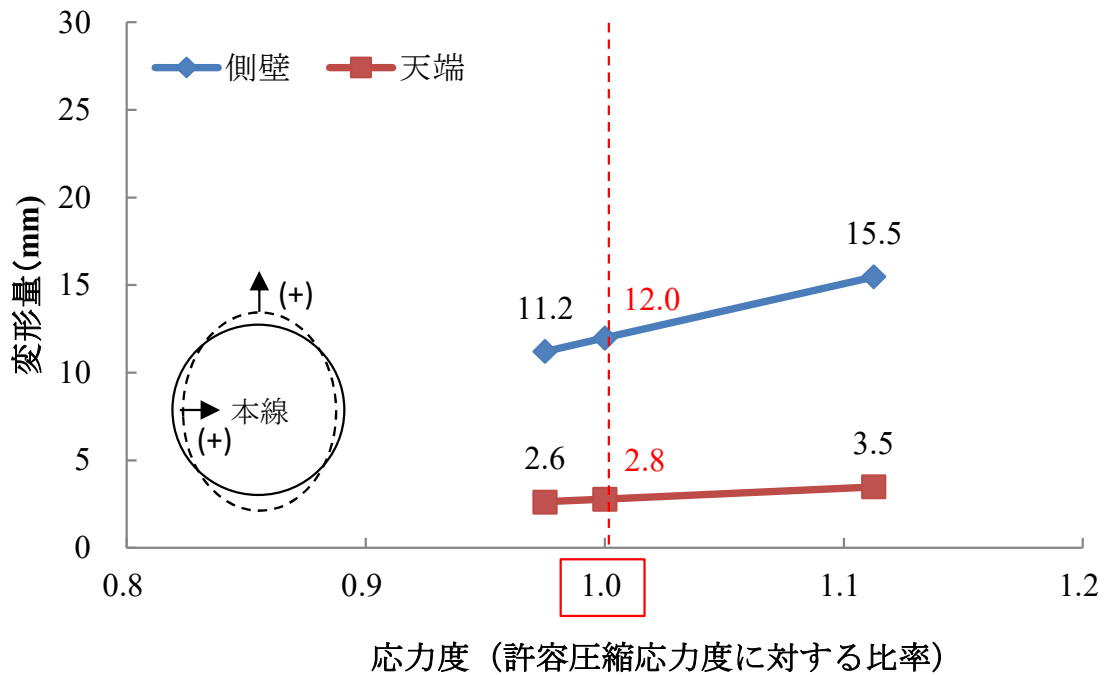


図 3.3.3-1 シールド掘進時の側部、天端の応力度と変形量の関係

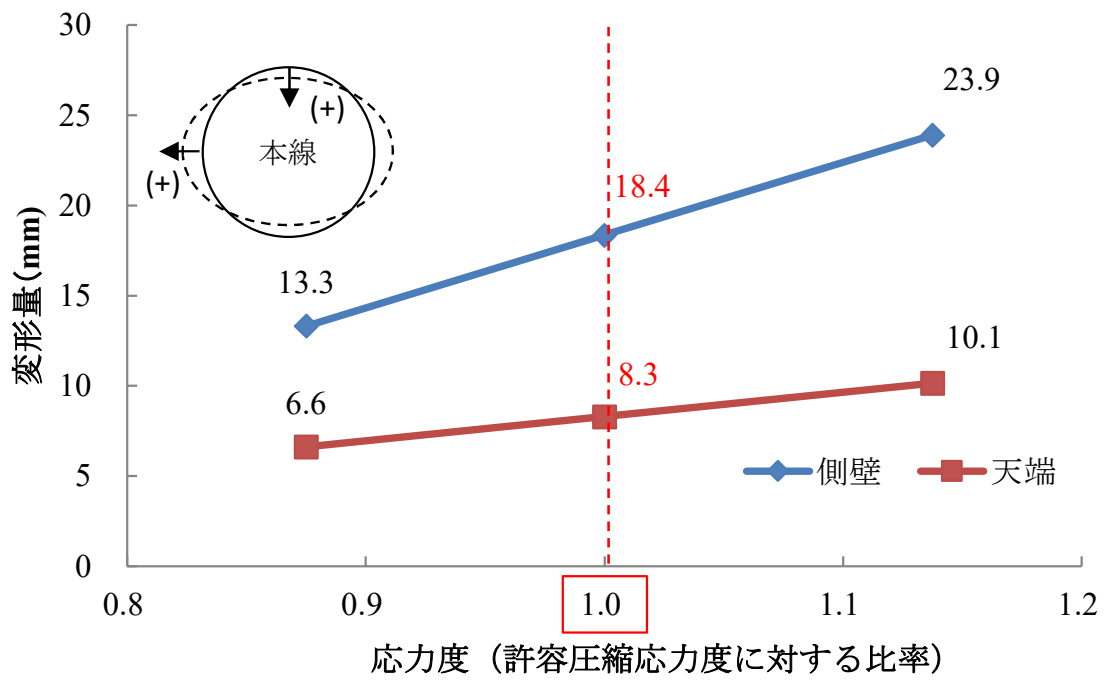


図 3.3.3-2 シールド通過時の側部，天端の応力度と変形量の関係

### 3.4 事前検討を踏まえた A ランプシールドトンネルの施工

#### 3.4.1 シールドマシンの仕様

A ランプシールド掘進時の影響は、前述のとおり、3.2 から 3.3 にかけて検討しており、シールドマシンは影響検討結果を踏まえた仕様としている。図 3.4.1-1 および図 3.4.1-2 は、掘進に使用した A ランプシールドマシンの側面および断面図を示し、表 3.4.1-1 では、シールドマシンの仕様をそれぞれ示す。

馬場出入口工事においては、狭い範囲で掘進距離が短い 4 本のトンネルをシールドマシンによって順番に掘進することから、施工費の削減を目的とし、シールドマシンを転用して施工している。なお、A ランプシールドにおいては、D ランプシールドで掘進完了したシールドマシンの駆動部等を転用して使用している。

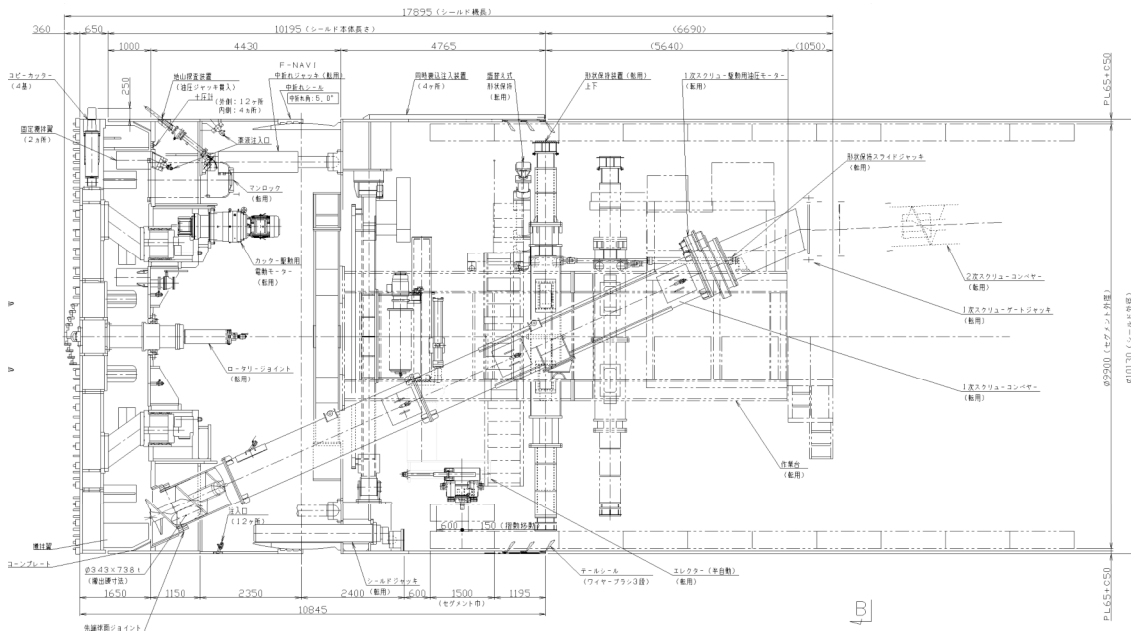


図 3.4.3-1 A ランプシールドマシン側面図 (S=1/50)

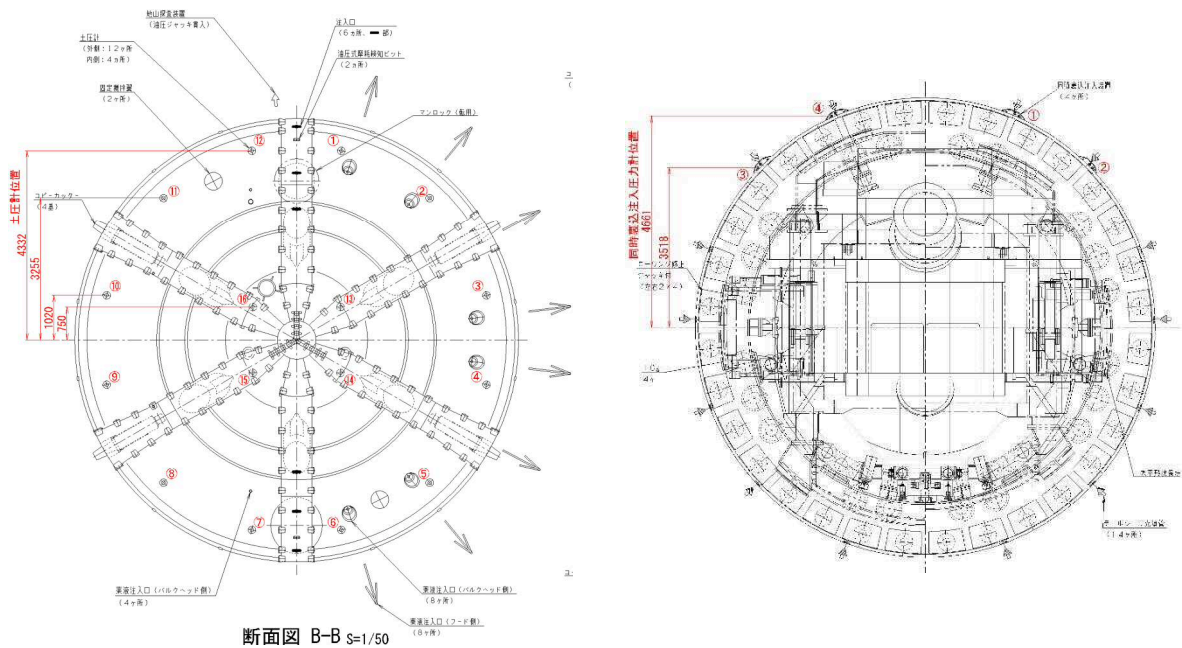


図 3.4.3-2 A ランプシールドマシン断面図 (S=1/50, 左: カッター部, 右: テール部)

表 3.4.3-1 A ランプシールドマシン仕様

装備	仕様	
シールド外径	10,130mm	
シールド機長	17,895mm	
シールドジャッキ伸長速度	40mm/min (全数作動時)	9mm/min (微速時)
シールドジャッキ	3,000kN×34.3MPa×2,250mm×32 本 (1,192kN/m <sup>2</sup> )	
中折れジャッキ	4,000kN×34.3MPa×1,300mm×20 本 (993kN/m <sup>2</sup> )	
カッタートルク (インバーター制御)	常用: 17,100kN-m ( $\alpha=16.5$ ) 瞬時最大: 20,520kN-m ( $\alpha=19.7$ )	
カッター回転数	0.5rpm (V=15.9m/min)	
カッター駆動用電動機	75kW×4P×400V×12 台	
コピーカッタージャッキ	195kN×20.6MPa×250mm×4 本	

### 3.4.2 A ランプシールドの掘進概要

A ランプシールドは、施工ヤード内に構築されている既設の C ランプおよび D ランプと同様の立坑から掘進を開始し、最終的に本線トンネルと近接しつつ掘進する。A ランプシールドのセグメント割付を含めた概要図を図 3.4.2-1 に示す。セグメントの多くは RC セグメントを採用しており、曲線部については、鋼製セグメントにコンクリートを中詰めした合成セグメントを採用している。

A ランプシールドの掘進における特徴は、まず発進直後に近接する鉄塔および既設の C ランプシールド、D ランプシールドと近接して掘進することである。また、到達部においては、各ランプシールドトンネルの共通事項となるが、最終的に本線とトンネルへ接続する出入口となるため、超近接して到達することになる。なお、A ランプシールドは本線トンネルの施工前での掘進が間に合わず、4 つの出入口シールドで唯一本線トンネルの供用中で到達することとなった。

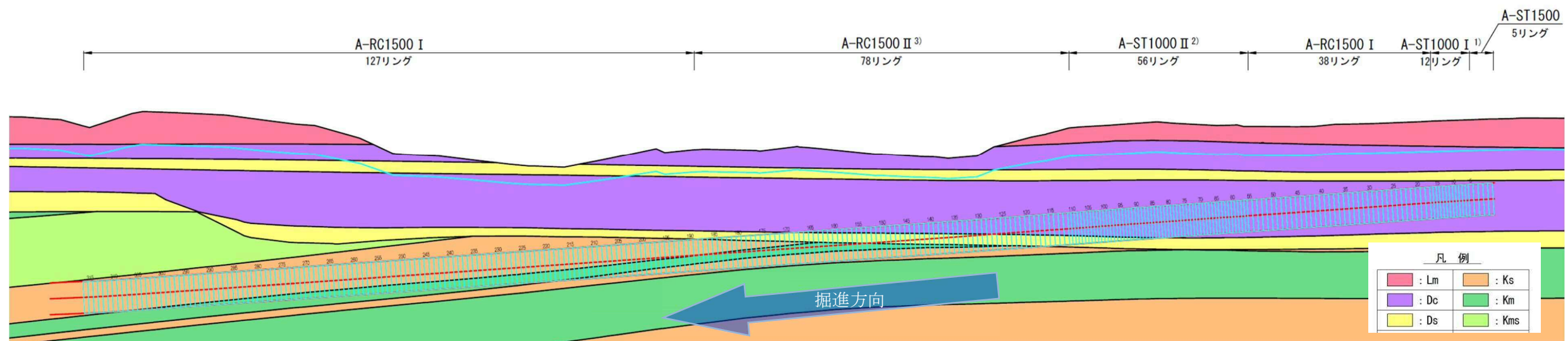
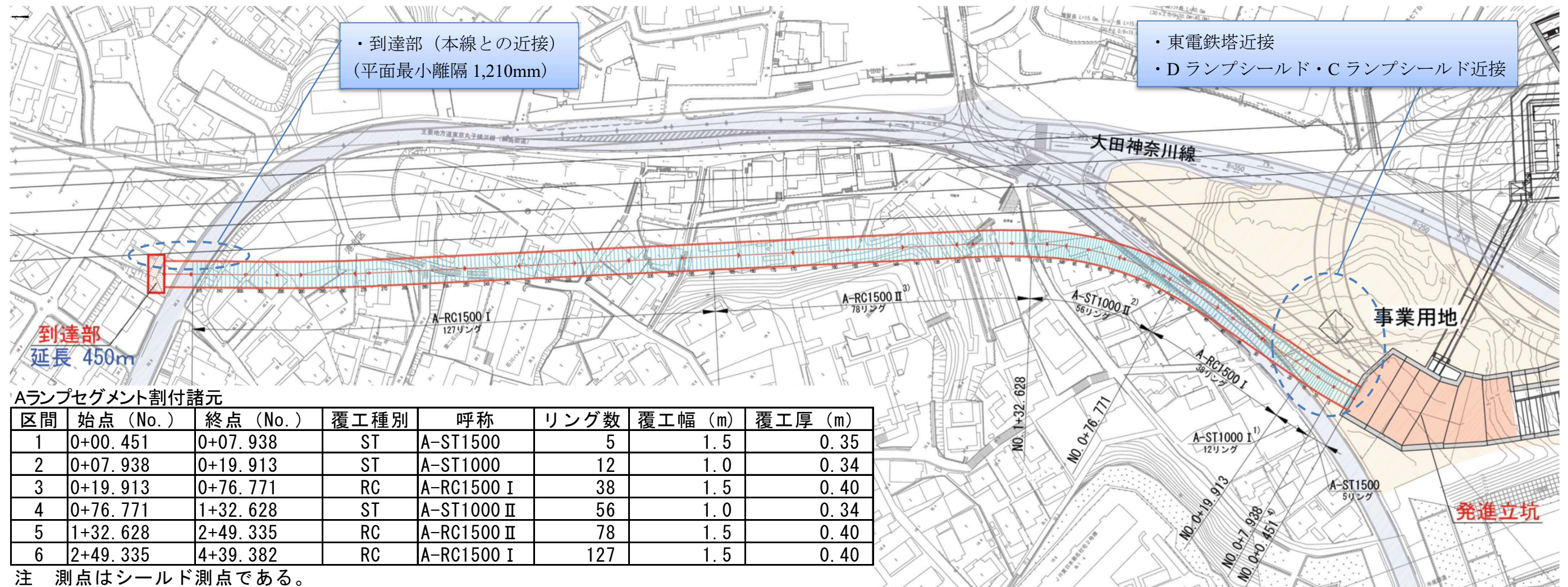


図 3.4.2-1 A ランプ平面図・縦断図

### 3.4.3 A ランプシールドの掘進管理

A ランプシールドは、4つの出入口シールドトンネルの中で最後の掘進であった。そのため、管理土圧はこれまでのB、C、D ランプシールドの掘進時の実績を踏まえ、主働土圧に水圧および予備圧を加えたものを基本とした。なお、管理土圧は地表面沈下測定結果によって適宜調整することとしている。また、シールドマシンに採用している泥土圧シールド切羽評価システムにより、シールド機チャンバー内に配置した16箇所の土圧計のデータを用いることによって、チャンバー内掘削土の土圧および塑性流動性を評価した。なお、システムでは、表 3.4.3-1 に示す2つの項目に着目し、5つの評価方法を組み合わせることで、管理を適正に実施した。

添加材には気泡を使用し、上記のシステムを用いてチャンバー内で掘削土の塑性流動化が図れるように注入量を調整した。また、スクリューコンベヤーからの噴発を防ぐため、スクリューコンベヤーに設けた注入孔から噴発防止材を注入している。噴発防止材の注入量は、排土口の土砂性状により調整し、一次スクリュー末端の1箇所、二次スクリュー末端の1箇所の合計2箇所のスクリューゲートを適切に使用するとともに、停電時等の非常時は、アキュムレータを使用してゲートを閉じることで噴発を防止する。

掘削土量の管理は、羽のベルトコンベヤに取り付けた排土計測システムにより、体積と重量で連続して計測している。掘削土量の管理値は、初期掘進時の路面沈下計測結果を考慮した上で適正值に決定し、掘進中の土量が管理幅に収まるように掘削土量を管理している。また、過去10リングの平均値に対する変化率も併用して管理することとした。

シールドトンネルの掘進中は、地表面沈下測定を行い、異常が発生した際には掘進を中断し、原因の究明と対策を行うとともに、必要に応じて道路管理者および埋設物管理者に報告した。定めている各掘進管理値を表 3.4.3-2 に示す。

表 3.4.3-1 A ランプシールド掘進における評価方法一覧

着目点	評価方法
チャンバー全体の土圧変動に着目	①土圧変化状態の相似性
	②側方土圧係数（土圧の傾き）
	③土圧計間の密度勾配と全体直線性
土圧計近傍の局所的な土圧変動に着目	④平均値からのずれ（偏差土圧）
	⑤フーリエ変換したパワースペクトル



表 3.4.3-2 A ランプシールド掘進管理値一覧

掘進管理項目	管理値	備考
切羽圧	主動土圧+水圧+予備圧	B, C, D ランプ実績より設定
推力	発進時：装備推力の 55%を上限 通常時：大きな変動がないこと，装備推力の 80%を上限	装備推力 (96,000kN)
カッタトルク	大きな変動がないこと 装備トルクの 80%を上限	装備トルク (常用 17,100kNm)
掘削土量	直近 10 リングの平均値±5%以内	統計処理
裏込め注入量	テールボイドの 110%以上	
裏込め注入圧	切羽圧+0.1MPa 以下	B, C, D ランプ実績より設定
方向制御	水平，鉛直偏差：±100mm	自主管理値は±50mm

### 3.4.4 曲線部の施工

A ランプシールドは、最小曲線半径が 80m であり、カッタースポークに装備された最大ストローク 250mm のコピーカッターを使用して余掘りを行った。また、中折れ装置でシールド機の中折れを行うことにより、シールドマシンの向きと曲線の向きを合わせて掘進した。本シールドトンネル工事においては、急曲線および急勾配をスムーズに掘進するために余掘り空間に高粘性塑性流動材を注入することとした。注入においては、スムーズな掘進の実現の他に、地山の崩壊を防止し、余掘り空間を維持することを目的としている。また、高粘性塑性流動材は、シールドマシンと地山との間における摩擦低減効果もあることから、シールド掘進に伴う地盤変状の低減効果も期待した。

余掘り充填材として使用した高粘性塑性流動材は、粘土・ベントナイト溶液と特殊水ガラスを混合したものを使用した。表 3.4.4-1 に使用材料および標準配合を示す。

なお、余掘り部については、地山を保護に加え、裏込め注入材の切羽への流入を防ぐことを目的として、シールド機内の注入孔より余掘り充填材を注入した。一方、裏込め注入は、余掘りの空隙を考慮して注入量を決定し、注入量と注入圧を併用して管理した。

表 3.4.4-1 余掘り充填材料の使用材料および標準配合 (1m<sup>3</sup>あたり)

A 液		B 液
粘土鉱物系材料	水	特殊水ガラス
80kg	868L	100L

### 3.4.5 裏込め注入工の施工

テールボイドは、シールドマシンの掘削外径セグメント外径の差によって算出されることから、A ランプシールドは、シールドマシン外径が 10.13m、セグメント外径が 9.90m であるため、一般部においては、0.23m のテールボイドが発生することとなる。発生するテールボイドによる、地表面の地盤沈下やトンネル内への漏水を防ぐために、裏込め注入を実施するが、A ランプシールドにおいては、掘削による影響を最小限とするために、同時裏込め注入装置を採用した。なお、同時裏込め注入装置は、シールドマシンの上半 4 箇所を設置している。また、注入材料として 2 液タイプの可塑状型の材料を選定することとした。これは、長距離圧送が可能であること、地山相当の初期強度が得られること、充填性が良く体積変化が少ないこと、地下水内で希釈されることが無く、テールおよび切羽への流出が少ないことを目的として設定している。

裏込め注入材料の配合強度は、地山強度相当とし、表 3.4.5-1 の強度を標準配合の目標として定めた。また、初期掘進区間や到達区間等は、早期にセグメントを安定させることを目的とし、表 3.4.5-2 に示すとおり、初期強度発現配合を使用することとした。

裏込め注入率は、110%を目安として設定し、注入量については、掘進初期時に注入完了時点で初期圧力より 0.05～0.1 MPa 程度の圧力の上昇が見られる量を把握し、以後この注入量を想定したポンプの吐出量を設定し、基本の注入量とした。

裏込め注入圧は、土圧、水圧、セグメントの強度、シールド形式、使用材料特性から総合的に判断した。注入圧力の基本的な考え方は、上限を+0.2MPa とし、注入材料のゲルタイムを極端に短くした場合、注入圧の上昇や注入管の閉塞の可能性があることから、掘進中も注入効果、周辺地山や他の構造物への影響などを確認しつつ、掘進することとした。また、裏込め注入圧が高すぎる場合、セグメント継手ボルトがせん断、あるいはシールド部からの漏水の懸念が考えられるため、注入作業中は注入圧力を監視し、上限値を超過した場合は注入を停止することで安全に配慮した。また所定の注入量を注入しても圧力の上昇が見られない場合は注入を続行することとした。なお、注入圧、注入流量、積算注入量は自動計測し、掘進管理システムに伝送し記録することで、掘進管理に反映させた。

表 3.4.5-1 裏込め注入材料の標準配合強度

	A 液				B 液
	固化材	助材	安定材	水	凝結剤
標準配合 (1m <sup>3</sup> 当り)	230kg	25kg	1 リットル	844kg	65 リットル
一軸圧縮強度 $\sigma_{1h}$	約 0.02N/mm <sup>2</sup>				
$\sigma_{28d}$	約 2.0 N/mm <sup>2</sup>				

表 3.4.5-2 裏込め注入材料の初期強度発現配合強度

	A 液				B 液
	固化材	助材	安定材	水	凝結剤
初期強度発現配合 (1m <sup>3</sup> 当り)	250kg	25kg	1 リットル	811kg	91 リットル
一軸圧縮強度 $\sigma_{1h}$	約 0.05 N /mm <sup>2</sup> 程度				
$\sigma_{28d}$	約 2.5 N /mm <sup>2</sup> 程度				

### 3.4.6 A ランプシールド掘進時の対応

本解析の目的である併設トンネルの三次元離隔変化における三次元解析による再現は、第4章にて詳細を述べるが、結果の整合性を確認するために、現地計測結果と比較することとしている。本解析での対象としたAランプシールドは、本線トンネルが平成29年3月に開業した後の掘進となったため、供用している本線トンネルに影響を与えずに掘進を完了させることが最大の課題であり、特に掘進管理には留意したシールドトンネル掘削工事である。

ここでは、課題に対し、これまで述べた施工前における本線トンネルへの影響算出による掘進計画に加え、その他にも営業路線と近接することを踏まえて実施した対策を以下に紹介する。

#### (1) 本線トンネルへのプロテクタの設置

Aランプシールドの到達部では、事前に影響検討をしているものの、予想できない影響が発生し、利用者に被害が発生することもゼロではないことから、安全面を配慮し、本線トンネルを防護する隔壁（以下、プロテクタ）を設置した。プロテクタの設置状況を写真3.4.6-1に示す。プロテクタは、到達部の反力受、本線トンネルの計測、監視作業および到達後のシールド解体作業を、供用中の本線トンネル内で行うことになることを想定し、これらの作業が本線を走行する一般車両の妨げにならないことを目的として設置した。なお、プロテクタは、本線の供用開始前に設置し、ランプトンネル到達関連作業は、基本的に設置したプロテクタ内で行っている。作業状況を写真3.4.6-2に示す。



写真 3.4.6-1 プロテクタ設置状況



写真 3.4.6-2 プロテクタ内作業状況

## (2) 本線トンネルの計測・監視

ランプシールドの到達部においては、近接施工による本線トンネルへの影響を把握するために、本線トンネル内の自動計測を実施した。

A ランプシールド到達部は、平面最小離隔が約 1.2m の近接掘進となり、本線トンネルは既に供用していることから、本線トンネルに変状および漏水が発生することによって、甚大な輸送障害に繋がる恐れがあるため、特に計測に留意した。

具体的には、これまでの 3 つのランプシールド掘削時と同様に、トータルステーションによる本線トンネル内面の変位計測を実施した。さらに、本線トンネルが供用中であることから、本線トンネルのインバート部に水レベル式沈下計測器によるトンネル下半の鉛直変位計測の 2 種類の計測を実施することで、掘進時の本線トンネルの変状をリアルタイムに把握できるようにした。本線内計測器のトータルステーションを写真 3.4.6-3、計測プリズムを写真 3.4.6-4、水レベル式沈下計測器を写真 3.4.6-5 にそれぞれ示す。

計測の他にも本線トンネル状況を把握するために、写真 3.4.6-6 に示すように本線内には監視カメラを設置し、監視員の配置と合わせて、掘進中の本線内状況を常時監視した。



写真 3.4.6-3 本線トンネル内におけるトータルステーションの設置状況



写真 3.4.6-4 本線トンネル内におけるプリズムの設置状況





写真 3.4.6-5 本線トンネルインパート内における水レベル式沈下計測器設置状況



写真 3.4.6-6 本線トンネル内における監視カメラの設置状況

### (3) 到達部の掘進管理

到達部の掘進において、本線トンネルに与える影響を少なくするためには、掘進時の周辺地盤の緩みを極力減少させることが重要である。そのためには、切羽土圧を安定させることに加え、裏込め注入材を確実にテールボイド内に充填させ早期に硬化させることが必要であると考えた。定めた基本方針に従い、A ランプシールド到達掘進では、図 3.4.6-1 に示す掘進管理を実施した。

掘進管理の分別は、到達部から 45m 手前から到達掘進とし、範囲を大きく 3 つに分別した。裏込め注入に関しては、注入圧、注入量、材料配合を全て同じにしているが、切羽土圧およびジャッキスピードの組合せをそれぞれの特徴に応じて設定した。設定根拠はこれまでの掘進によるものとし、特にジャッキスピードは、最も早く掘進した B ランプシールドでは、到達掘進開始から遅くしたが、通過時の変位が大きく発生しないことやジャッキスピードを必要以上に遅くした場合に、本線トンネルへ変位が大きく発生したことから設定した。

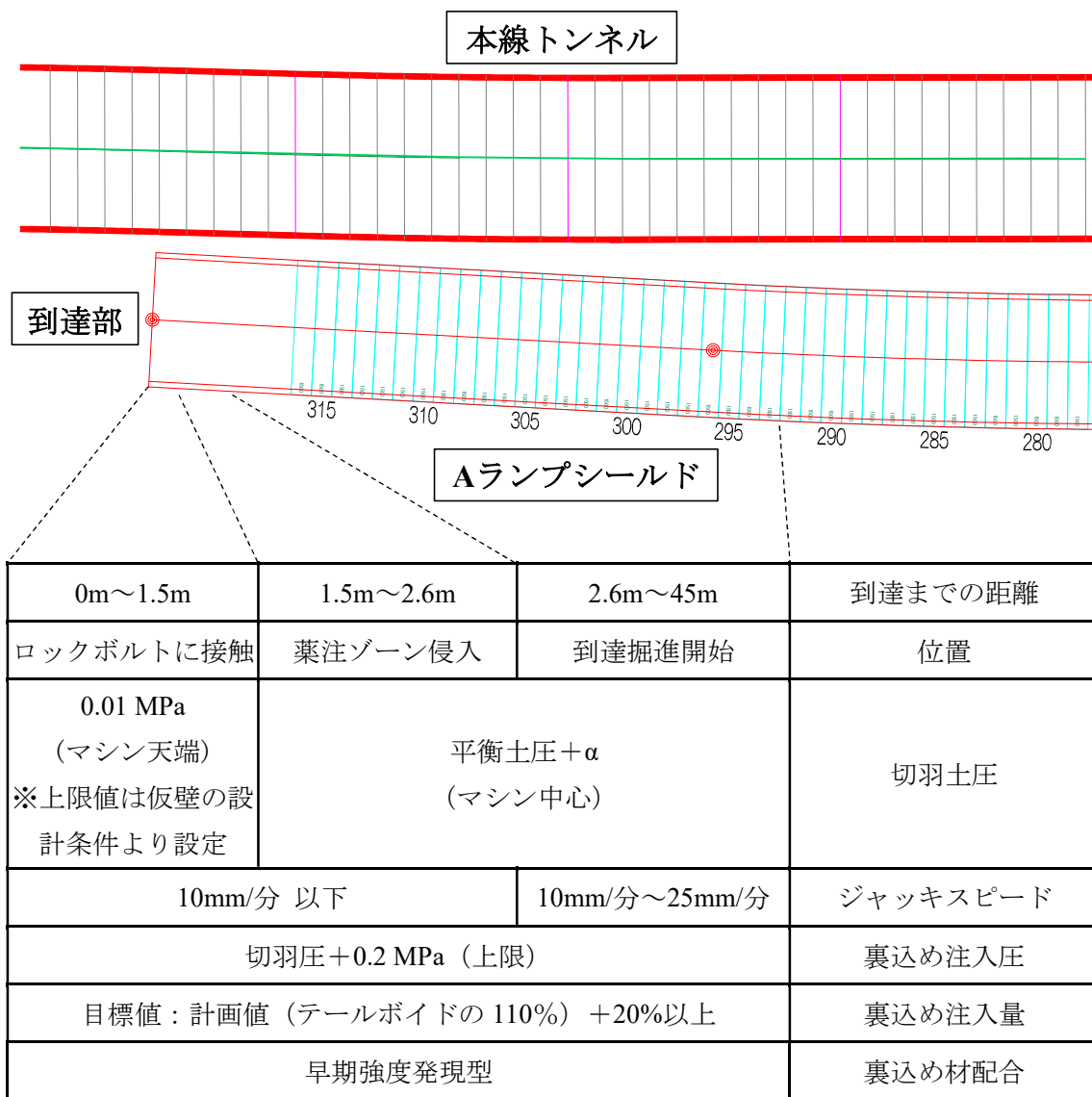


図 3.4.6-1 到達部における掘進管理

### 3.5 事前検討から施工までの評価

事前検討の結果より、A ランプシールド掘進時の影響は、シールド掘進時においては、本線トンネルのスプリングライン部の水平変形量が本線トンネルの内空側に 12mm、外面側に 18mm を最大変形量として定め、掘進における管理値の基本として定めた。

実際の施工における管理値の設定は、それぞれの最大変形量に達した時点で掘進停止とした。また、最大変形量の 60%の変形においては、掘進状況の再確認を行い、監視体制を強化するなどをしたうえで、掘進を進めることとし、最大変形量の 80%の変形においては、更に掘進管理項目見直しおよび計測頻度を増加することで安全に留意している。

A ランプシールドは、平成 29 年 5 月に立坑を発進し、同年 8 月末に到達した。本線トンネルの最大変形量は、スプリングライン部の外面側に 11.8mm であり、事前に算出した最大変形量の 7 割未満の結果となった。施工結果は、事前検討において 3.2 から 3.3 で述べた事前検討結果を踏まえ、3.4 で述べた事前対策および綿密な掘進管理によって、本線トンネルへの影響が最小限に留まったと考えられる。また、本線トンネルへの影響を最小限に留めることができた最大の要因は、A ランプシールドの掘進が 4 本目の掘進であり、これまでに施工した過去 3 回の掘進を踏まえて施工できたことである。そのため、オペレーターの技術によるものも大きく寄与していることも考えられる。

事前検討においては、二次元による FEM およびはり一ばね解析により算出した結果が、想定最大変形量が計測値に対し、大きな値として算出されている。影響は掘進時と通過後の 2 つの異なる状況を再現し、特に掘進時には影響が少なく、掘進後の影響が大きかった。これは、A ランプシールドを除いた 3 つのランプシールドにおいても同様の傾向であり、通過後の残留変位によって最大変位を示す結果となった。このように二次元解析によって複雑なシールドトンネルの掘進による正確な再現は困難であり、連続した掘進に対するそれぞれの時期における正確な影響量を求めるのであれば、三次元解析による検討が必要であると考えられる。一方で、二次元による事前検討結果は、安全側の設定となったため、これまで経験のない供用中のシールドトンネルに対し、大断面のランプシールドの掘進による安全対策は、監視の強化等、適切な対策であったといえる。

例えば、馬場出入口工事において、三次元解析を用いて正確な影響が算出された場合、実施した安全対策は、二次元と三次元の結果により変更はなかったと考えられる。しかし、既設構造物に大きな影響が想定される場合においては、補強を要する場合があり、過剰な補強は施工費に大きく影響を与えることになることから、施工による正確な影響を算出したうえで、適切かつ効果的な補強対策を立案する必要がある。その他にも、特殊な条件や施工による影響が大きくなった場合に甚大な被害が生じる場合等においては、同様に正確性が求められ、三次元解析等を用いて適切に影響量を算出すべきである。そのため、影響把握から評価を適切に行うためには、施工内容および条件の特色を踏まえた影響検討手法が特に重

要であるといえる。

### 【第3章 参考文献】

- 1) 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. 55, 2016.
- 2) 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. 2-62, 2018.
- 3) 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. 97, 2016.
- 4) 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. 2-19, 2018.
- 5) 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. 2-24, 2018.
- 6) 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. 56, 2016.

## 第4章 三次元解析の概要と結果

### 4.1 併設トンネルの特徴を踏まえた解析検討

#### 4.1.1 三次元解析実施の背景

併設トンネルの掘進による影響は、2.3.2にて述べたように、例えば首都高速道路において、はりばねモデルによる単設断面力にFEM解析から求められる併設時の増分断面力を加算して設計断面力を算出する手法もあるが、次元の選定については詳細に述べていない。正確に併設トンネルへの影響を把握するためには、実際のシールド掘進による地盤および併設するトンネルへの影響は三次元的な現象であることから、三次元モデルによる解析を実施することが望ましいと考えられ、更に施工段階における各要素を踏まえる必要がある。しかしながら、実務上は費用や工期を勘案したうえで、二次元を用いることが多く、例えばシールドトンネルの曲線部において構造物との関係により三次元的な考慮を必要とし、三次元解析を用いる場合もある<sup>1)</sup>。

本研究の対象工事は、1.3.2にて述べたように、複雑な線形を伴いつつ、本線シールドトンネルに近接するシールドトンネルの構築が主たる工事である。馬場出入口はランプシールドだが、10m以上の掘削外径となる大断面トンネルである。施工結果は、第3章にて示したとおり、シールドトンネル掘進による大きな影響を与えることなく完了しているが、これはシールドトンネルの施工実績によるものが大きいと考えられ、施工前においては、詳細な検討が必要であると考えられる。

そこで本研究においては、計測結果と解析結果を用いて比較することで、適切な影響検討手法の確立を検討することとした。まず、事前に把握可能である情報から、トンネル構造や地盤情報、線形等を踏まえて解析モデルを構築し、更に施工段階における掘削および推進等の各要素を踏まえつつ、掘進による適切な挙動を把握するために三次元FEM解析を実施することとした。算出した三次元FEM解析の結果は、施工前に実施した検討結果および計測結果を用いて比較することで、適切な次元の選定を評価することを試みた。

#### 4.1.2 三次元解析手法の選定

本研究における三次元 FEM 解析は、汎用性ソフトである、“Midas GTS NX”<sup>2)</sup> (以下、Midas) を使用した。Midas は、地盤および構造物の相互挙動に対する解析結果の算出が可能である汎用性ソフトであり、地盤特性に多様な設定ができる特徴がある。また、解析モデルを構築する過程で、土木工事においても広く用いられている AutoCAD とも連動していることから、実際に工事前に検討するうえでの利便性があり、適していると考えた。なお、ここで本研究における Midas の適用性を確認するために、支配方程式と構成則について述べる。

FEM 解析においては、三次元の場合、3 個の力のつり合い式、6 個のひずみと変位の関係式、6 個の応力とひずみの関係式が支配方程式となる。

力のつり合いを示す方程式は、一般的に 3 方向の応力成分によって式(1)のように示される<sup>3)</sup>。

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} - F_x = 0 & (x \text{ 方向}) \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} - F_y = 0 & (y \text{ 方向}) \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} - F_z = 0 & (z \text{ 方向}) \end{cases} \quad (1)$$

また、ひずみと変位の関係式は、独立している 6 個の成分を定式化すると式(2)のようになる<sup>3)</sup>。

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} & \gamma_{xy} = -\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} & \gamma_{yz} = -\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} & \gamma_{zx} = -\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \end{cases} \quad (2)$$

ここに  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  は垂直ひずみ、 $\gamma_{xy}, \gamma_{yx}, \gamma_{xy}$  はせん断ひずみである。また、 $u, v, w$  はそれぞれ  $x, y, z$  軸方向の変位である。

応力とひずみの関係式は、応力が増加した場合にひずみも増加する関係の代表例として線形弾性体をフックの法則で示すと式(3)で示される<sup>3)</sup>。



$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1+\nu} \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Midas においては、仮想仕事の原理、応力とひずみの関係式、ひずみと変位の関係式が支配方程式となり、仮想仕事の原理に応力とひずみの関係を変分形の拘束条件として適用することで、構成方程式(4)を用いている。

$$\delta G_{ext} = \int_{\Omega} (\nabla \delta \mathbf{u})^T \boldsymbol{\sigma} + \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T (\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\varepsilon}) - \boldsymbol{\sigma}) + \delta \boldsymbol{\sigma}^T (\nabla \mathbf{u} - \boldsymbol{\varepsilon}) d\Omega \quad (4)$$

ここに、 $\delta G_{ext}$  は外力による仮想仕事、 $\mathbf{u}$  は変位、 $\boldsymbol{\sigma}$  は応力、 $\boldsymbol{\varepsilon}$  はひずみ、 $\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\varepsilon})$  はひずみにより計算された応力、 $\nabla$  はひずみ—変位関係演算子である。式 (1) より、ひずみ  $\boldsymbol{\varepsilon}$  および応力  $\boldsymbol{\sigma}$  の関係が常に満足されると仮定し、式 (5) を算出する。

$$\delta G_{ext} = \int_{\Omega} (\nabla \delta \mathbf{u})^T \boldsymbol{\sigma} + \delta \boldsymbol{\sigma}^T (\nabla \mathbf{u} - \boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{\sigma})) d\Omega \quad (5)$$

ここに、 $\boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{\sigma})$  は応力により計算されたひずみである。また、 $\boldsymbol{\varepsilon}$  および  $\nabla \mathbf{u}$  の関係が満足されると仮定し、仮想仕事の原理を式(6)としている。

$$\delta G_{ext} = \int_{\Omega} (\nabla \delta \mathbf{u})^T \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}) d\Omega \quad (6)$$

式(6)を確認するために、式(1)のつり合い式から導く。仮想仕事の原理は、地盤工学会<sup>3)</sup>によると“ある物体に仮想変位 $\{\delta \mathbf{u}\}$ を考えた時物体力や表面力による外部仕事の合計と応力・ひずみの変化に伴う内部仕事の合計とが等しい”とされており、力のつり合い式を弱形式し、仮想変位  $\delta \mathbf{u}$ 、 $\delta v$ 、 $\delta w$  と置き換え、式(2)に従い仮想ひずみを導入することで、式(7)を算出している<sup>3)</sup>。

$$\int_V (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \sigma_y \delta \varepsilon_{yx} + \sigma_z \delta \varepsilon_z + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{yz} \delta \gamma_{yz} + \tau_{zx} \delta \gamma_{zx}) dV \quad (7)$$

$$= \int_{S_2} (f_x \delta u + f_y \delta v + f_z \delta w) dS - \int_V \gamma \delta w dV$$

式(6)は、 $\varepsilon$ および $\nabla \mathbf{u}$ の関係が満足されると仮定していることから、 $\nabla \delta \mathbf{u}$ を仮想変位の $x$ ,  $y$ ,  $z$ 方向の成分を $\delta u$ ,  $\delta v$ ,  $\delta w$ とし、ひずみ成分として置き換え、表面力と体積力で示すと式(8)のように示せる。

$$\delta G_{ext} = \int_V \delta \varepsilon^T \sigma dV \quad (8)$$

式(7)および式(8)は等しいことから、つり合い式とも等価であることがいえるため、有限要素法において、式(4)を構成方程式として適用可能であることが確認できる。

次に、Midasにおいては、仮想仕事の原理を有限要素法へ適用するために、積分領域を1つの要素に限定して考えることとし、1つの要素内で変位 $\mathbf{u}$ について形状関数を用いて次式を用いている。

$$\mathbf{u} = \mathbf{N} \mathbf{d}^e \quad (9)$$

ここに $\mathbf{N}$ は形状関数マトリックス、 $\mathbf{d}^e$ は要素節点自由度である。要素節点の自由度は要素節点における変位 $\mathbf{u}$ とし、式(9)を導く。

まず、1つの節点の変位は2つの成分を持つため、式(10)で示すことができる。

$$\mathbf{u}_i = \{u_i \ v_i\}^T \quad (10)$$

ここでの1つの節点は $i$ としている。この要素を6つの変位成分を1つのベクトルで示すと式(11)となる。

$$\mathbf{u}^e = \{u_i \ u_j \ u_k\}^T \quad (11)$$

式(10)で示した要素内の変位を6つの変位成分により、線形多項式により式(12)のように定める。

$$\begin{cases} u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \\ v = \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y \end{cases} \quad (12)$$

変位が対応する節点変位と等しいことから、 $x$ 方向の変位においては、式(13)で示され、 $\alpha_1, \alpha_1, \alpha_1$ の解は式(14)になる。

$$\begin{cases} u_i = \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i \\ u_j = \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j \\ u_k = \alpha_1 + \alpha_2 x_k + \alpha_3 y_k \end{cases} \quad (13)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2\Delta} \det \begin{bmatrix} u_i & x_i & y_i \\ u_j & x_j & y_j \\ u_k & x_k & y_k \end{bmatrix}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{2\Delta} \det \begin{bmatrix} 1 & u_i & y_i \\ 1 & u_j & y_j \\ 1 & u_k & y_k \end{bmatrix}, \quad \alpha_3 = \frac{1}{2\Delta} \det \begin{bmatrix} 1 & x_i & u_i \\ 1 & x_j & u_j \\ 1 & x_k & u_k \end{bmatrix} \quad (14)$$

ここに $\Delta$ は、 $ijk$ の面積であり、式(12)および式(14)から式(15)が求められ、式(9)を導くために、座標関数で示すと式(16)となる。

$$u = \frac{1}{2\Delta} \{ (\alpha_i + b_i x + c_i y) u_i + (\alpha_j + b_j x + c_j y) u_j + (\alpha_k + b_k x + c_k y) u_k \} \quad (15)$$

$$v = \frac{1}{2\Delta} \{ (\alpha_i + b_i x + c_i y) v_i + (\alpha_j + b_j x + c_j y) v_j + (\alpha_k + b_k x + c_k y) v_k \}$$

$$\begin{cases} u = N_i u_i + N_j u_j + N_k u_k \\ v = N_i v_i + N_j v_j + N_k v_k \end{cases} \quad (16)$$

式(16)をマトリックスおよびベクトルで示した式(17)は、式(9)となる。

$$\mathbf{u} = [N_i I \quad N_j I \quad N_k I] \mathbf{u}^e = \mathbf{N} \mathbf{u}^e \quad (17)$$

FEM 解析において、構造物に生じる変位を算出するためには、一般的に節点荷重と節点変位の関係である、剛性マトリックスを算出する必要がある。Midas においては、剛性マトリックスを式(18)にて算出している。

$$\mathbf{K}^e = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega \quad (18)$$

式(18)は、式(9)に対し、式(6)の仮想仕事の原理、ひずみと変位の関係式を係数マトリックス $\mathbf{B}$ 、仮想ひずみ、仮想節点変位の関係を示した $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{d}^e$ を用いることによって、式(19)のよう  
に示すことができる。

$$\delta G_{ext} = \delta d^T F = \delta d^T \left[ \sum \int_{\Omega_e} B^T D B d \Omega \right] d = \delta d^T K d \quad (19)$$

ここにDは応力-ひずみ関係のマトリックスである。全体剛性マトリックスKは全体節点自由度dに独立しているため、個別要素の剛性マトリックスK<sup>e</sup>は式(18)となり、有限要素の離散化を行った剛性マトリックス<sup>3)</sup>と等しいことがわかる。

研究における解析においては、既に構築されている本線シールドトンネルに対し、新たに構築する馬場出入口シールドトンネルの掘削の影響値を求める必要があるため、本線シールドトンネルはRCセグメントで構築され、コンクリートの躯体であり、リング毎の円形の変形に着目することから、線形等方弾性モデルとすることで適切であると考えた。Midasにおける線形等方弾性モデルは、フックの法則を使用しており、式(3)に示した構成則と同様であり、改めて式(3)を以下に示す。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1+\nu} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ 1-2\nu & 1-2\nu & 1-2\nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 1-2\nu & 1-2\nu & 1-2\nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 1-2\nu & 1-2\nu & 1-2\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここにEはヤング率、νはポアソン比であり、本解析においてもヤング率およびポアソン比を入力することで算出している。

また、地盤においては、対象となる構造物と構造物の離隔が三次元的に変化しながら超近接することにより、構造物間の地盤が塑性化の影響を考慮するために、モール・クーロン型の弾塑性モデルを採用することが望ましいと考えた。Midasにおける地盤に用いるモール・クーロン型の弾塑性モデルは、次式(20)で求める破壊基準を設定し、降伏関数を式(21)としている。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (20)$$

$$f = -\cos \phi - \frac{1}{3} I_1 \sin \phi + \sqrt{J_2} \left( \cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi \right) = 0 \quad (21)$$

ここに $c$ は粘着力， $\sigma$ はせん断面に作用する垂直応力， $\phi$ は内部摩擦角である。なお，解析においては，粘着力と内部摩擦角を入力することで算出することとしており，降伏後は，完全塑性挙動となる。

本研究は，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，既設シールドトンネルに対する影響を算出することを目的としている。Midas は上述したように，モデル化に必要な構成要素を含み，既設構造物および地盤におけるそれぞれの構成則が適用可能であることから，本解析に使用することは妥当であると判断した。

## 4.2 三次元解析モデルの構築

### 4.2.1 解析に使用した条件

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表 1.3.2-1 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。また、A ランプは本線トンネルが供用後の掘進であるため、3.4.6 にて述べたように A から D の4つランプトンネルの中で唯一、インバート部での計測を実施していたことから、解析との比較項目が他のランプトンネルより多いため、解析結果の妥当性をより詳細に示すことが可能である。本線トンネルと A ランプトンネルは図 4.2.1-1 に示すように発進部から本線トンネルの橋軸直角方向へ交差するように進み、同時に本線トンネルの深さ位置に向けて勾配を有して構築される。その後、併設しながら離隔距離が縮まりつつ、最終的に本線トンネル合流部へ到達する。

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地質調査結果等から算出した地盤物性値を用いた。以下に算出した地盤物性の詳細を示す。

#### (1) 設定値の整理

馬場出入口トンネル工事を含む横浜北線の建設においては、発注前に地質調査を実施しており、工事発注時に工事の条件となる、基本条件図書として示している。また、工事発注

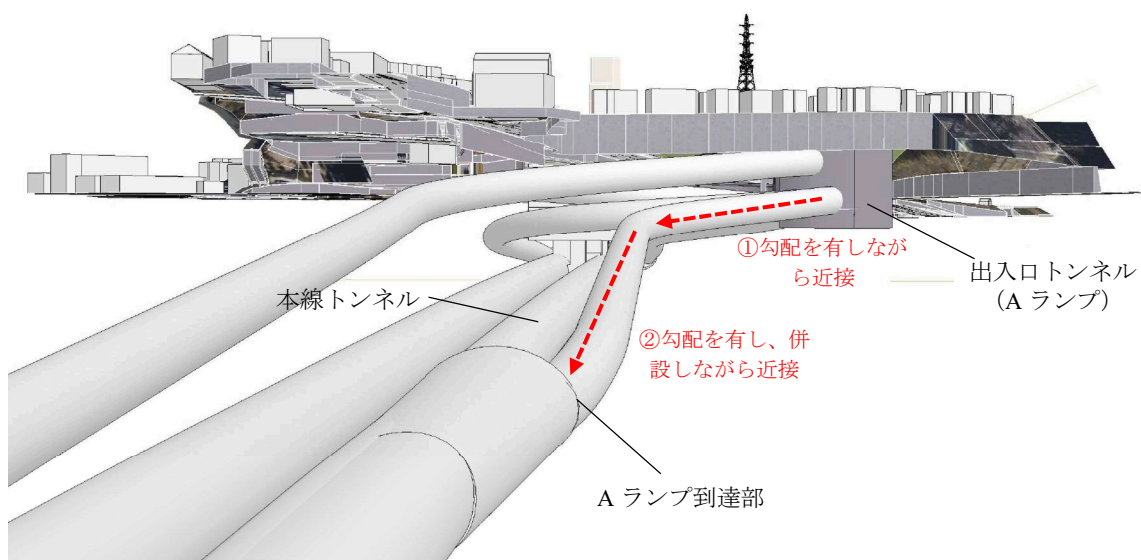


図 4.2.1-1 本線トンネルと A ランプトンネルの位置関係

前においては、馬場出入口の分合流部の非開削拡幅工法を検討しており、検討の中で設計土圧を設定している<sup>4)</sup>。第3章にて示したように、馬場出入口工事では施工前に近接影響検討を実施しているが、地盤物性値は表4.2.1-1に示す設計土圧および土質調査結果を用いて検討している。三次元FEM解析においては、最終的に馬場出入口工事の施工前に検討した近接影響検討結果と比較することから、地盤物性値を同様の値で採用することとした。各地質における地盤物性値の算出方法を以下に示す。

## (2) 各地層に対する地盤物性値の設定

解析の対象としているAランプにおける地層は、ローム層、相模層、上総層で構成されている。採用する地盤物性値は、表4.2.1-1における設計土圧および地盤物性値の調査結果が存在する対象の地質を抽出して設定することとした。調査結果は、特定の位置を抽出する方法ではなく、横浜北線全体の地盤状況を踏まえて設定するために、全ての地質調査結果を対象とした。

資料-2から資料-5における地質調査位置を図4.2.1-2から図4.2.1-6に示す。図4.2.1-2は、横浜北線全体の中で港北側を示したものであり、図4.2.1-6の生麦側にかけて、計画路線近くで実施可能な箇所調査位置を設定している。また各層の地質調査結果を表4.2.1-2から表4.2.1-7に示す。表における平均値の項目は、各資料番号の平均値を記載しており、最下段に設計値を示している。なお、抽出している資料番号は、調査位置において検出されたものである。また、調査位置における深さによって複数の地層が検出された場合は、それぞれ試料を確認している。なお、建設前の時間および費用が限られていたことから、採取した全ての試料に対して試験を実施することができなかったため、調査箇所によって算出項目が異なっている。

まず、ローム層の結果を表4.2.1-2に示す。N値は地質調査結果が少ないことから、資料

表4.2.1-1 地盤物性値の設定に用いた資料

資料番号	資料名	備考
資料-1	シールドトンネルランプ接続部の非開削拡幅工法の開発と設計土圧(2004年11月)	トンネル工学報告集における論文
資料-2	高速横浜環状北線地質調査(その2)報告書(平成14年3月)	横浜北線本線トンネル工事発注前地質調査結果
資料-3	高速横浜環状北線地質調査(その3)報告書(平成14年11月)	横浜北線本線トンネル工事発注前地質調査結果
資料-4	高速横浜環状北線地質調査(その4)報告書(平成14年11月)	横浜北線本線トンネル工事発注前地質調査結果
資料-5	高速横浜環状北線地質調査(その5)報告書(平成14年11月)	横浜北線本線トンネル工事発注前地質調査結果

-1 の数値を採用した。なお、資料-1 と平均値の差異は生じていない。湿潤密度および粘着力並びに変形係数は、平均値を採用した。なお、粘着力は資料番号 3-7 を特異値として除いた平均値とした。ただし、粘着力は粘性土であることから、三軸圧縮試験の中で非圧密非排水条件の結果を採用した。内部摩擦角は安全側の設定とし、0 度と設定した。ポアソン比は地質結果がないことから、資料-1 の数値を採用した。

相模層における各資料の結果は表 4.2.1-3 および表 4.2.1-4 である。粘性土は、N 値の地質調査結果が少ないことから、資料-1 の数値を採用した。なお、資料-1 と平均値と差異は生じていない。湿潤密度および粘着力並びに変形係数は、平均値を採用した。変形係数の平均値算出においては、資料番号 5-7 を特異値をととして除いた。ただし、粘着力は粘性土を三軸圧縮試験が非圧密非排水条件の結果を採用している。内部摩擦角は粘性土を安全側の設定とし、0 度と設定した。ポアソン比は地質結果がないことから、資料-1 の数値を採用した。砂質土については、N 値は同様に地質調査結果が少ないことから、資料-1 の数値を採用した。なお、平均値との差は微小である。湿潤密度、粘着力、内部摩擦角、変形係数はそれぞれ平均値を採用した。なお、変形係数の結果は 1 箇所のみであったが、資料-1 と比較し、安全側として試験結果を採用した。ポアソン比は地質結果がないことから、資料-1 の数値を採用した。

上総層における各資料の結果は表 4.2.1-5 から表 4.2.1-7 である。泥岩は、N 値の地質調査結果が少ないことから、資料-1 の数値を採用し、50 以上としているが、各試験結果においては、全て 50 以上となっている。なお、湿潤密度および粘着力並びに内部摩擦角は、平均値を採用した。ただし、粘着力および内部摩擦角は三軸圧縮試験が非圧密非排水条件の結果を採用した。変形係数は、調査箇所によって 2 つ算出しているが、データのばらつきの影響を考慮し、「(平均値) - 1/2・(標準偏差値)」の式で算出する標準偏差を用いた補正値を採用した。ポアソン比は地質結果がないことから、資料-1 の数値を採用した。

細砂は、N 値を同様に地質調査結果の少なさから、資料-1 の数値を採用した。なお、調査結果の平均値は N 値 50 を大きく上回っている。湿潤密度、粘着力、内部摩擦角、変形係数は、平均値を採用した。ポアソン比は地質結果がないことから、資料-1 の数値を採用した。

砂泥互層は、同様に N 値は資料-1 の数値を採用した。なお、調査結果の N 値は、全て 50 を上回る結果である。湿潤密度および粘着力並びに内部摩擦角も同様に平均値を採用した。ただし、粘着力および内部摩擦角は三軸圧縮試験が非圧密非排水条件の結果を採用した。変形係数は、泥岩と同様にデータのばらつきがあったことから、同様の標準偏差を用いた補正値を採用した。

使用した地盤物性値の一覧を表 4.2.1-8 に示す。また、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 4.2.1-2 に示す。図 4.2.1-2 に示す発進部（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。



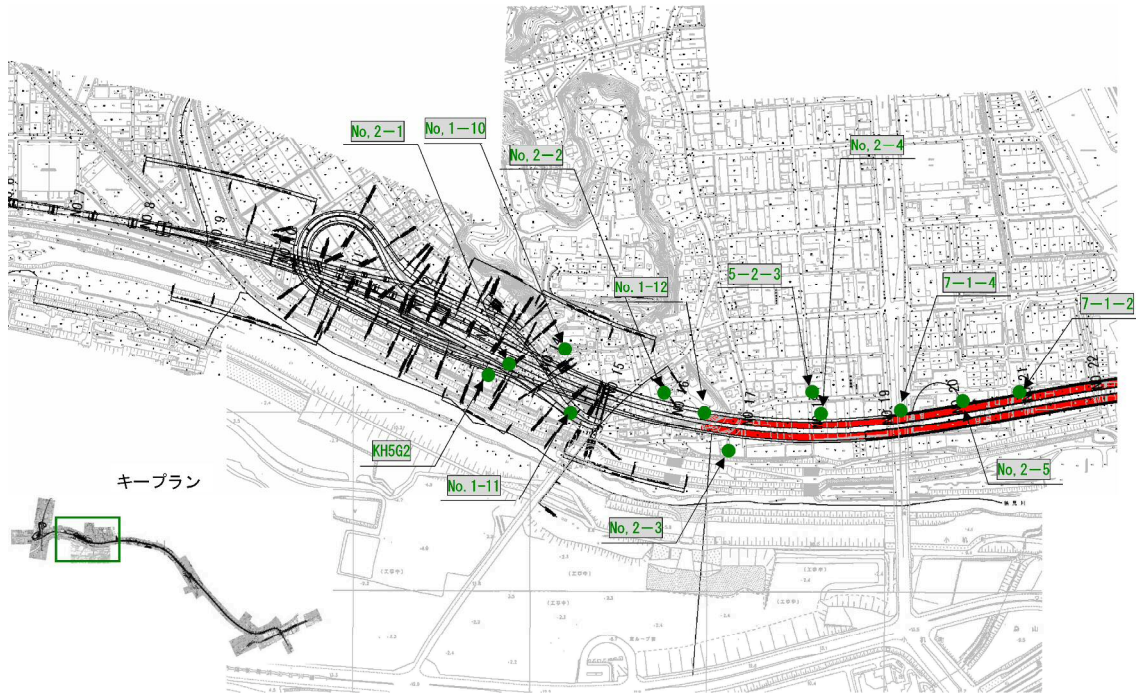


図 4.2.1-2 地質調査位置図【1】

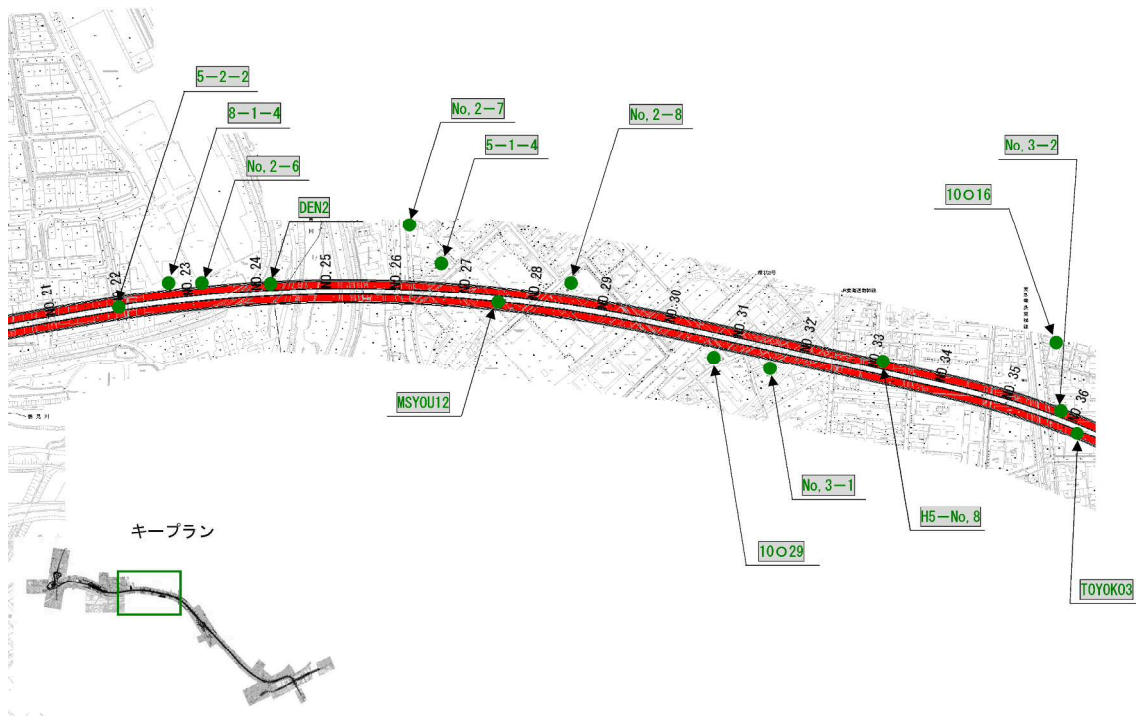


図 4.2.1-3 地質調査位置図【2】

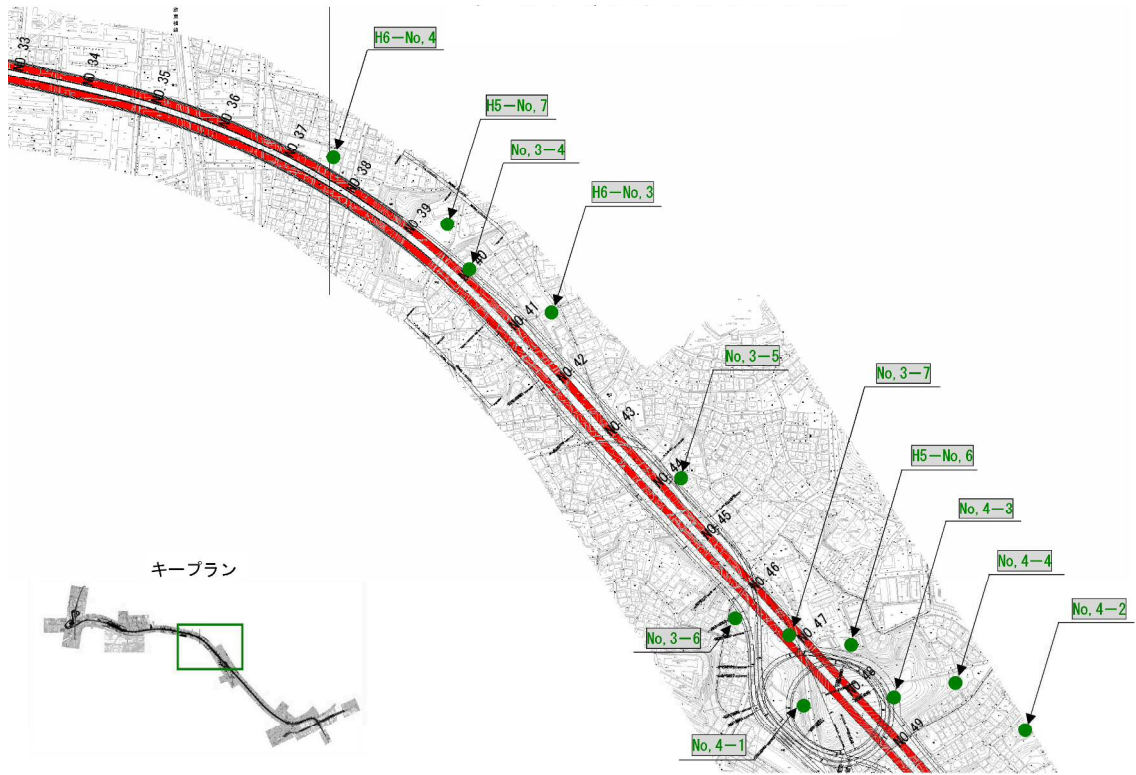


図 4.2.1-4 地質調査位置図【3】

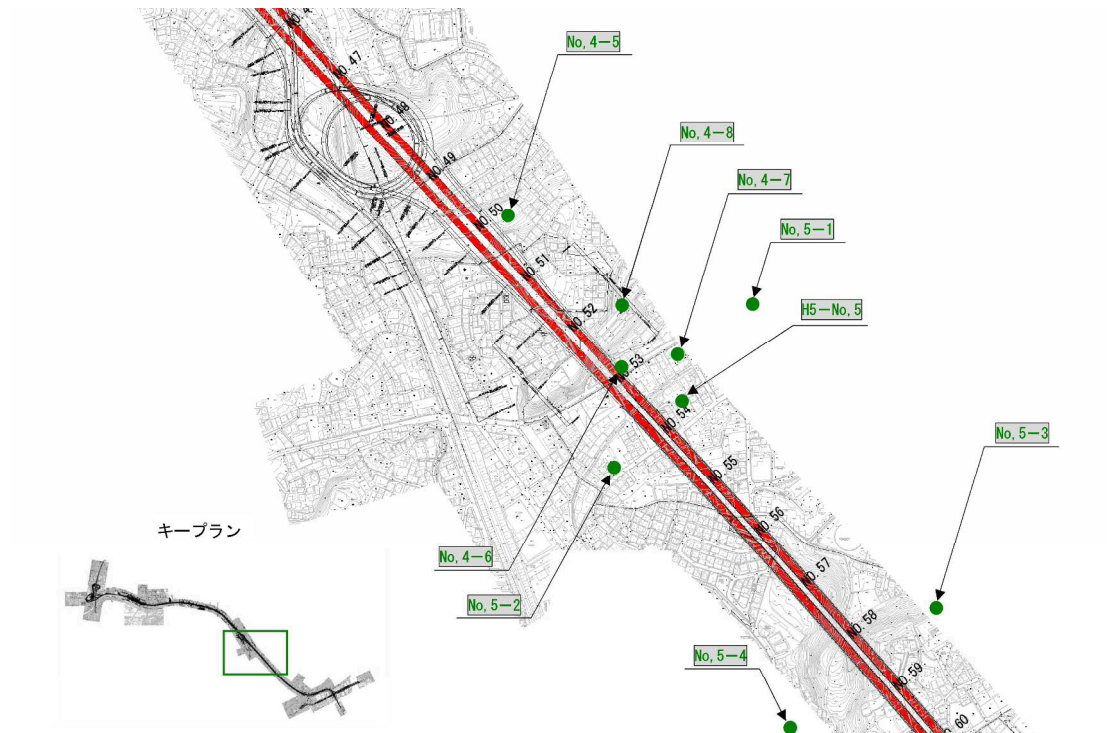


図 4.2.1-5 地質調査位置図【4】

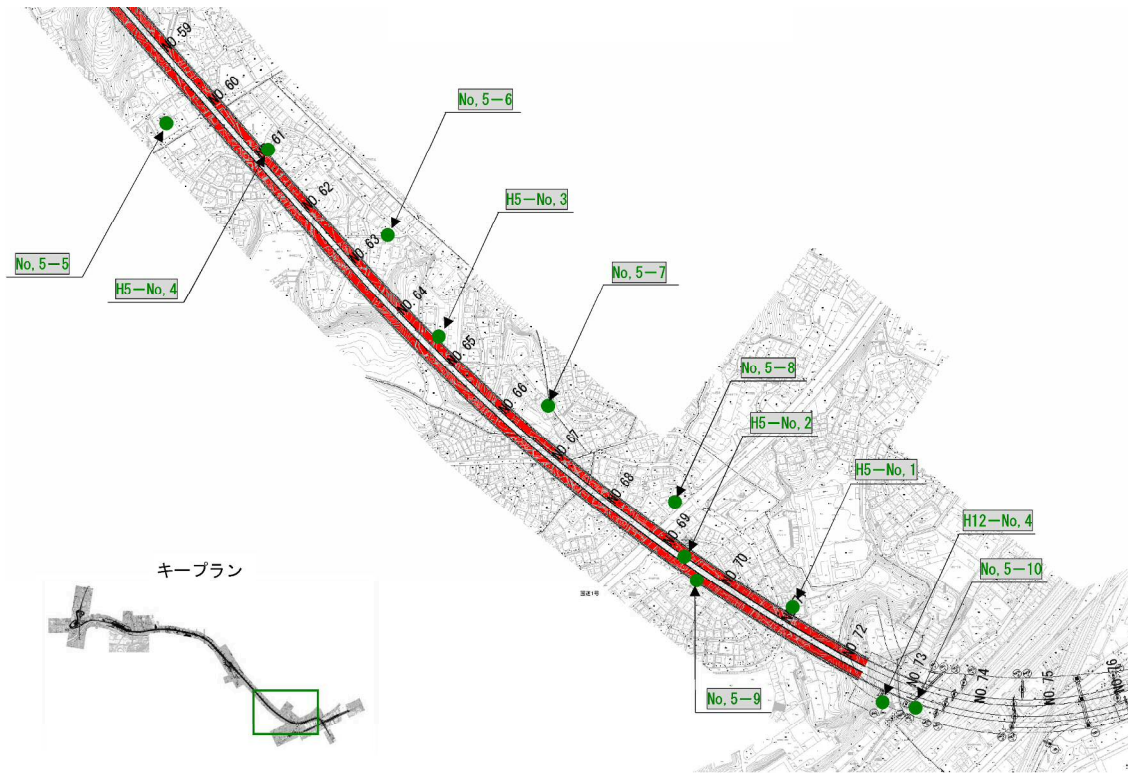


図 4.2.1-6 地質調査位置図【5】

表 4.2.1-2 ローム層における土質定数一覧表

地層名	地質名	資料 番号	N 値	湿潤 密度	粘着力	内部 摩擦角	変形 係数	ポアソ ン比	備考
				kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>2</sup>	度	MN/m <sup>3</sup>		
ローム 層	ローム	資料-1	5	13.5	56	0	6.4	0.45	
		平均値	5	13.73	46.6	13.6	7.83		
		UU 平 均値	3	13.75	53.7	9.4	12.00		
		3-5		14.72	30.6	7.77	-		UU
		3-5		14.72	40.7	16.89	-		
		3-7		14.03	200	5.7	-		UU
		4-1		13.56	24.9	10.1	-		UU
		4-1		13.56	14.5	12.5	-		
		4-1		14.16	49.8	7.0	-		UU
		4-1		14.16	30.3	17.0	-		
		4-3		13.26	37.8	29	-		UU
		4-3		13.26	76.8	15.7	-		
		4-3		13.63	34.2	7.7	-		UU
		4-3		13.63	22.1	8.8	-		
		4-6		13.49	84.6	7.7	-		UU
		4-6		13.49	78.3	9.1	-		
		5-3		12.98	43.6	27.0	5.13		
		5-3	7	14.07	46.8	31.4	6.59		
		5-3	7		-	-	7.585		
		5-7	3	13.17	114.0	0.0	12.00		UU
H5-6	2	13.56	17.0	17.2	-				
設計値			5	14.00	54.0	0.0	7.80	0.45	

表 4.2.1-3 相模層の粘性土における土質定数一覧表

地層名	地質名	資料 番号	N 値	湿潤 密度	粘着力	内部 摩擦角	変形 係数	ポアソ ン比	備考
				kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>2</sup>	度	MN/m <sup>2</sup>		
相模層	粘性土	資料-1	8	15.5	120	0	12.2	0.4	
		平均値	8	15.39	134.7	12.2	18.94		
		UU 平均値	10	15.21	160.5	5.5	33.70		
		3-2		1.579	-	-	-		-
		3-5		1.468	146	10.4	-		
		3-5		1.579	150	16.83	-		
		3-7		1.46	104.7	0.3	-		UU
		3-7		1.443	212.6	4.1	-		UU
		4-1		1.481	167.2	10.6	-		UU
		4-1		1.481	116.2	11.9	-		
		4-1		1.576	143.3	9	-		UU
		4-1		1.576	80.2	19.2	-		
		4-3		1.477	145.5	10.6	-		UU
		4-3		1.477	140.6	11.9	-		
		4-3		1.509	219.5	11	-		UU
		4-3		1.509	102.2	16.6	-		
		4-5		1.514	44.4	0	-		UU
		4-5		1.514	29.9	13	-		
		4-5		1.626	123	1.62	-		UU
		4-5		1.626	153	11.7	-		
		4-6		1.568	59.8	5.1	-		UU
		4-6		1.568	48.7	14.0	-		
		5-3	4	1.552	2.4	32.5	12.30		
		5-3	3	1.39	53.7	28.5	9.63		
		5-3	5	-	110.0	22.9	-		
		5-3	-	-	-	-	15.00		
		5-3	8	-	-	-	9.30		
		5-6	3	-	-	-	-		-
		5-6	16	-	-	-	-		-
		5-7	4	1.439	128.0	0.0	33.70		UU
		5-7	15	1.617	538.0	0.0	157.00		UU
		5-8		1.535	27.1	32.1	33.70		-
		5-9	14	-	-	-	-		-
		5-10		1.547	39.9	13.2	-		UU
		H5-1		1.713	324	6.42	-		
		H5-2		1.518	237.0	11.9	-		
H5-3		1.379	54.0	12.2	-				
H5-3		1.715	304.0	8.7	-				
H5-6		1.763	123.0	16.4	-				
H5-7		1.571	18.0	17.7	-				
設計値			8	15.50	160.0	0.0	19.00	0.4	

表 4.2.1-4 相模層の砂質土における土質定数一覧表

地層名	地質名	資料 番号	N 値	湿潤 密度	粘着力	内部 摩擦角	変形 係数	ポアソン 比
				kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>2</sup>	度	MN/m <sup>2</sup>	
相模層	砂質土	資料-1	34	18.5	42.0	33.0	30.30	0.3
		平均値	37	18.55	48.1	34.1	20.00	
		4-1		1.878	47.8	32.7		
		4-3		1.927	4.1	40.8		
		4-5			44.8	33.7		
		4-6		1.880	24.3	33.2		
		5-3	20		24.3	33.2		
		5-6	16		33.2	32.1		
		5-7	21	1.823	65.5	30.5		
		5-7	30	1.671				
		5-7	60					
		5-7						20.00
		5-8	25					
		5-8	83					
		5-9	37		44.1	37.2		
		5-10		1.885				
		H5-2		1.938	121.0	33.35		
		H5-3		1.935	27.0	36.02		
		H5-3		1.757	93.0	31.87		
設計値			34	18.50	48.0	34.0	20.00	0.3

表 4.2.1-5 上総層の泥岩における土質定数一覧表

地層名	地質名	資料番号	N 値	湿潤密度	粘着力	内部摩擦角	変形係数①	変形係数②	ポアソン比	備考
				kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>2</sup>	度	MN/m <sup>3</sup>			
上総層	泥岩	資料-1	>50	18.5	2190	6	703.8	183.9	0.3	
		平均値	170	18.48	1616.8	13.7	604.46			
		UU 平均値	—	18.51	1989.6	7.1	513.41			
		1-11		1.837	1550	15.6	60.56			UU
		1-11		1.887	1690	22.6	137.39			UU
		1-11		1.846	1550	14.2	147.98			UU
		2-1		1.788	2650	5.94	394	370		UU
		2-2		1.824						
		2-2		1.936	1671	0				UU
		2-2		1.855	706	43.22				
		2-2		1.844	2475	0				UU
		2-2		1.844	1881					
		2-2		1.799	2388	0				UU
		2-2		1.799	1163	29.62				
		2-3		1.749	2930	6.59	420	434		UU
		2-4		1.721	1814.5	10.8	643.0	634.0		
		2-4		1.767						
		2-4		1.925	714.6	13.9	652.0	569.0		UU
		2-4		1.932						
		2-4		1.909	1735.8	7.35	510.0	495.0		
		2-4		1.854						
		2-4		1.899	1999.8	9.09	511.0	675.0		
		2-5		1.719			915	810		
		2-5		1.783	1989.4	8.37	860	720		
		2-5		1.903						
		2-5		1.913						
		2-5		1.973	2112.4	11.6	1200	1190		
		2-5		1.910						
		2-5		1.749						
		2-5		1.925	1966.4	11.1	961	989		
		2-5		1.796	2161	10.6	568	788		
		2-7		1.905	1370	17.4	798	810		UU
		2-7		1.903	2080	15	588	816		UU
		2-7		1.889	1800	15.5	290	233		UU
		2-7		1.777	2120	14.1	452	404		UU
		2-8		1.931	2280	6.46	543.0	237.0		UU
		3-1		1.967	2733	0				UU
		3-1		1.721	2361	0				UU
		3-2		1.974	1946	0				UU
		3-2		1.776	2374	0				UU
		3-4		1.902	2505	0				UU
		3-4		1.811	2357	0				UU
		3-5		1.940	2034	0				UU
		3-5		1.940	1316	24.21				
		3-5		1.995	1465	0	-	-		UU
		3-5		1.995	1551	16.27				
		3-7		1.759	2190	11.6	1410.0			UU
		3-7		1.759	611	26.7	1410.0			
		4-1		1.740	2150	11.8	660.0			UU
		4-1		1.740	1009	20.9	660.0			
4-3		1.708	2850	9.2	869			UU		
4-3		1.708	1155	23.7	869					
4-5		1.915	1522	6.6				UU		
4-5		1.915	650	20.1						
4-5		1.892	1391	3.4				UU		
4-5		1.892	890	16.8						
4-5		1.858	1712	11.9						
4-6		1.920								
4-6		1.741	510	12.6				UU		
4-6		1.741	452	20						
4-6		1.828	2042	2.1				UU		
4-6		1.828	1176	17.6						
5-1		100	1.890	229.0	37.8	17.6				
5-2			1.768	961.0	30.7	614				
5-3		150	1.815	182	33.1	652				
5-3			1.868			357				
5-3		300				200				
5-5		300								
5-6		125	1.850			407.00				
5-6		136	1.833			261.00				
5-6		100	1.828			407				
5-8		150		762	35.3					
H5-1			1.787							
H5-1			1.824	743	24.65					
H5-1			1.861							
H5-3			1.723	315	39.65					
H5-5			1.912	629.0	18.4					
H5-8			1.887	2584.0	1.0					
設計値			50	18.50	2000.0	7.0	450.0		0.3	

表 4.2.1-6 上総層の細砂における土質定数一覧表

地層名	地質名	資料番号	N 値	湿潤密度	粘着力	内部摩擦角	変形係数	ポアソン比
				kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>2</sup>	度	MN/m <sup>2</sup>	
上総層	細砂	資料-1	>50	19.5	63.0	42.0	107.3	0.3
		平均値	90	19.30	75.0	41.7	77.5	
		1-11		2.008	70.2	42.9		
		1-11		1.895	60.6	40.1	90.98	
		2-2		1.980	76.4	40.76		
		2-2		1.959	132	40.54		
		2-3		1.888	169.1	42.7		
		2-3		2.014	47.7	40.5		
		2-3		1.991	56.7	40.3		
		2-4		1.903	59	42.8		
		2-4		1.88	2	39.1		
		2-5		1.527	117.1	48		
		2-5		1.893				
		2-5						
		2-6		1.993	28.0	45.8		
		2-7		1.992	2	44.9		
		2-8		1.922	25	46.6		
		3-1		1.995	41.6	47.73		
		3-2		1.917	0	42.57		
		3-4		1.97	134	38.42		
		3-7		1.925	66.5	39.3		
		4-3		1.940	51.4	42.8		
		4-5		2.020	76.8	42.8		
		4-6		2.056	39.6	42.8		
		4-6		1.971	62.5	42		
		4-6		1.994	121	42.4		
		5-1		1.796	139	32.8		
		5-1	75					
		5-1	94					
		5-1	115				56	
		5-2	115	2.026	165.0	38.6		
		5-2	125	2.050	6.0	47.2		
		5-2	107	2.050				
		5-3	115	1.967	11.0	39.4		
		5-3		1.827	356.0	46.4		
		5-3	94	1.978	50.3	43.2		
		5-3	52				73	
		5-3	94				90	
		5-4	75					
		5-4	150					
5-4	75							
5-4	107							
5-5	22							
5-5	75							
5-6	83							
5-6	100							
5-7	41	1.748	48.1	36.1				
5-7		1.749	132.0	40.5				
5-8	68		40.0	44.8				
5-8	68							
5-9	136							
	H5-3	2.049	53	40.52				
	H5-8	1.75	9.8	35.1				
	H12-4	1.91	101	36				
	設計値	>50	19.50	75.0	42.0	78.0	0.3	



表 4.2.1-7 上総層の砂泥互層における土質定数一覧表

地層名	地質名	資料番号	N 値	湿潤密度	粘着力	内部摩擦角	変形係数①	変形係数②	ポアソン比	備考
				kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>2</sup>	度	MN/m <sup>2</sup>			
上総層	砂泥互層	資料-1	>50	19.00	1930.0	11.0	284.3		0.3	
		平均値	102	19.09	1518.3	14.6	643.95			
		UU 平均値	—	19.43	1839.9	11.0	563.48			
		2-2		1.835	2620	0	-	-		UU
		2-2			1739	21.28				
		2-3		1.795	2340	4.37	261.0	350.0		UU
		2-3		1.834						
		2-3		1.792	2880	2.95	464.0	465.0		UU
		2-3		1.948	1851.9	13.6	536.0	654.0		UU
		2-4		1.928	1851.9	13.6	1020.0	894.0		
		2-4		1.770						
		2-5		1.796	1177.6	15.5	864.0	687.0		
		2-5		1.905	1867.9	8.7	684.0	748.0		
		2-5		2.010	2028	10.5	292.0	1130.0		
		2-5		1.994						
		2-6		2.066	2470	15.8	749.0	786.0		UU
		2-6		2.071	3000	8.1	1100.0	417.0		UU
		2-7		1.946	2560	9.88	1030.0	942.0		UU
		2-8		2.032	2110	20.8	254.0	151.0		UU
		2-8		2.033	973	26.3	787.0	69.6		UU
		3-2		2.064	2216	0				UU
		4-6		1.956	306	20.2				UU
		4-6		1.956	751	18.6				
		4-6		2.006	748	21.6				UU
		4-6			1644	12.7				
		5-2		136	1.890	851.0	32.9	417	-	
		5-3		75	1.879	95.4	31.7	282		
		5-3		150	1.819	232	33.7	605		
		5-3		83	1.793					
		5-7			1.771					
5-7		100								
5-7		68				980				
5-7		100				700				
5-7						1000				
5-10			1.849	214	3.3			UU		
5-10				380	9.8					
5-10			1.815	1469	7.5			UU		
5-10				1099	15.9					
設計値			>50	19.00	1800.0	11.0	500.00		0.3	

表 4.2.1-8 解析に使用した地盤物性値

地層		N 値	単位体積重量	粘着力	内部摩擦角	ヤング率	ポアソン比
			$\gamma$	$c$	$\phi$	$E$	
			kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>2</sup>	度	MN/m <sup>2</sup>	$\nu$
ローム層	ローム	5	14.00	54.0	0.0	7.80	0.45
相模層	粘性土	8	15.50	160.0	0.0	19.00	0.4
	砂質土	34	18.50	48.0	34.0	20.00	0.3
上総層	泥岩	>50	18.50	2000.0	7.0	450.00	0.3
	細砂	>50	19.50	75.0	42.0	78.00	0.3
	砂泥互層	>50	19.00	1800.0	11.0	500.00	0.3
	砂質泥岩	>50	19.00	1800.0	11.0	500.00	0.3

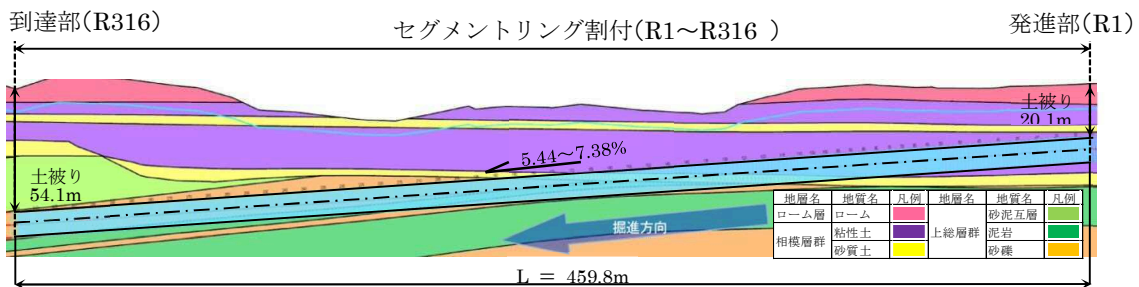


図 4.2.1-1 A ランプ出入口トンネルにおける縦断方向地層構成図

### (3) 構造物のモデル化

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。表 4.2.1-9 に各トンネルの躯体物性値を示す。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 4.2.1-9 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。なお、物性値はトンネル標準示方書に準拠しているが、スキンプレーットのヤング率は、馬場出入口工事前の検討結果と比較することから、同様の値とするために 2006 年制定<sup>5)</sup>の値を採用した。

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 4.2.1-2 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 4.2.1-3 に示す。

図 4.2.1-2 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>6)</sup>。この結果、地盤モデルは図 4.2.1-2 に示すような形状、寸法となった。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。また、作成したモデルの初期応力状態を決定するために適用した各荷重を表 4.2.1-10 に示す。

図 4.2.1-3 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。図 4.2.1-4 に拘束境界条件を加えた三次元モデル図を示す。

表 4.2.1-9 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

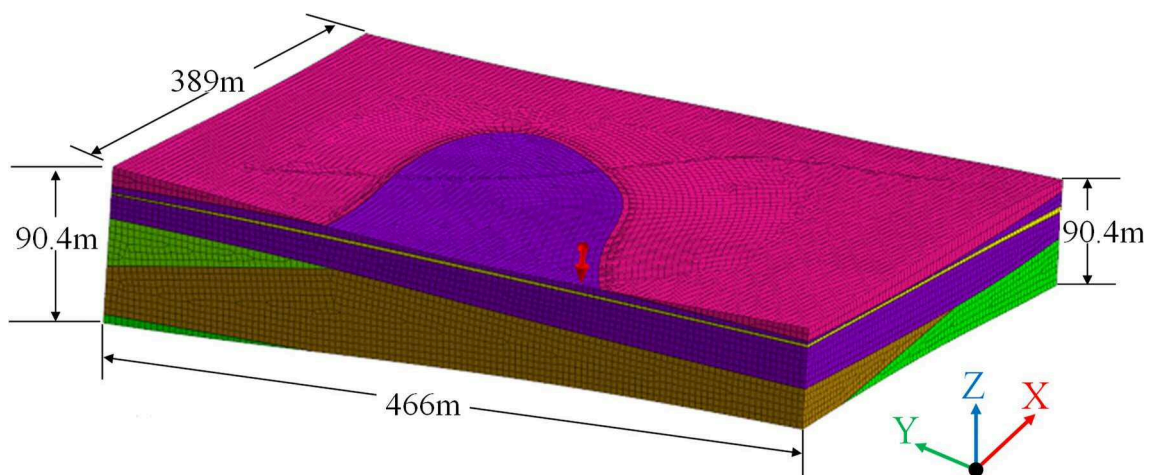
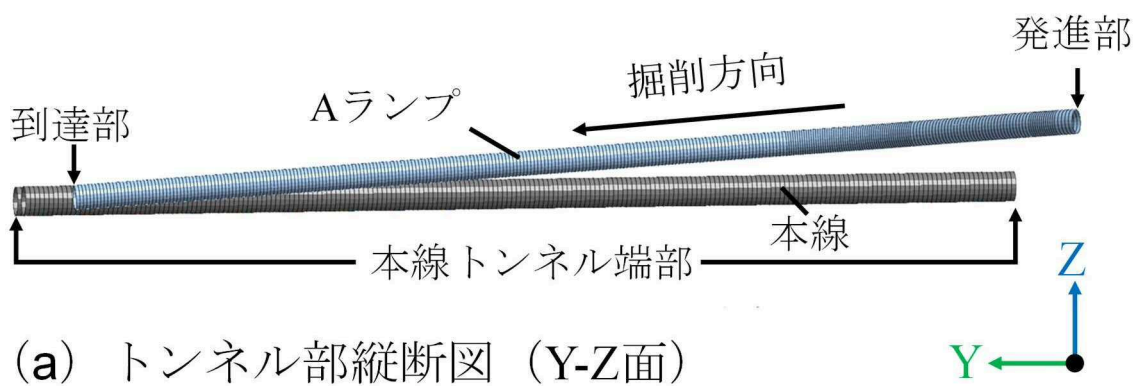
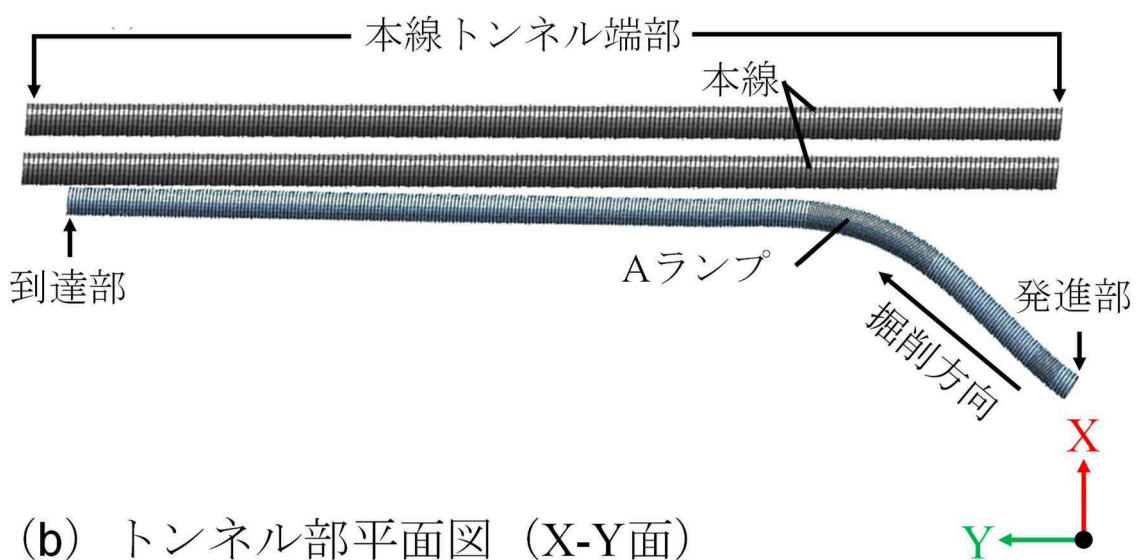


図 4.2.1-2 地盤モデル（地層構成凡例は、図 4.2.1-1 と同様）



(a) トンネル部縦断面図 (Y-Z面)



(b) トンネル部平面図 (X-Y面)

図 4.2.1-3 本線トンネルおよびAランプ出入口トンネルのモデル

表 4.2.1-10 解析モデルにおける適用荷重

モデル	適用荷重
本線トンネル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・全土被り圧</li> <li>・トンネル覆工の自重（供用後の荷重も含む）</li> </ul>
出入口トンネル発進立坑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・全土被り圧</li> <li>・立坑躯体の自重</li> </ul>

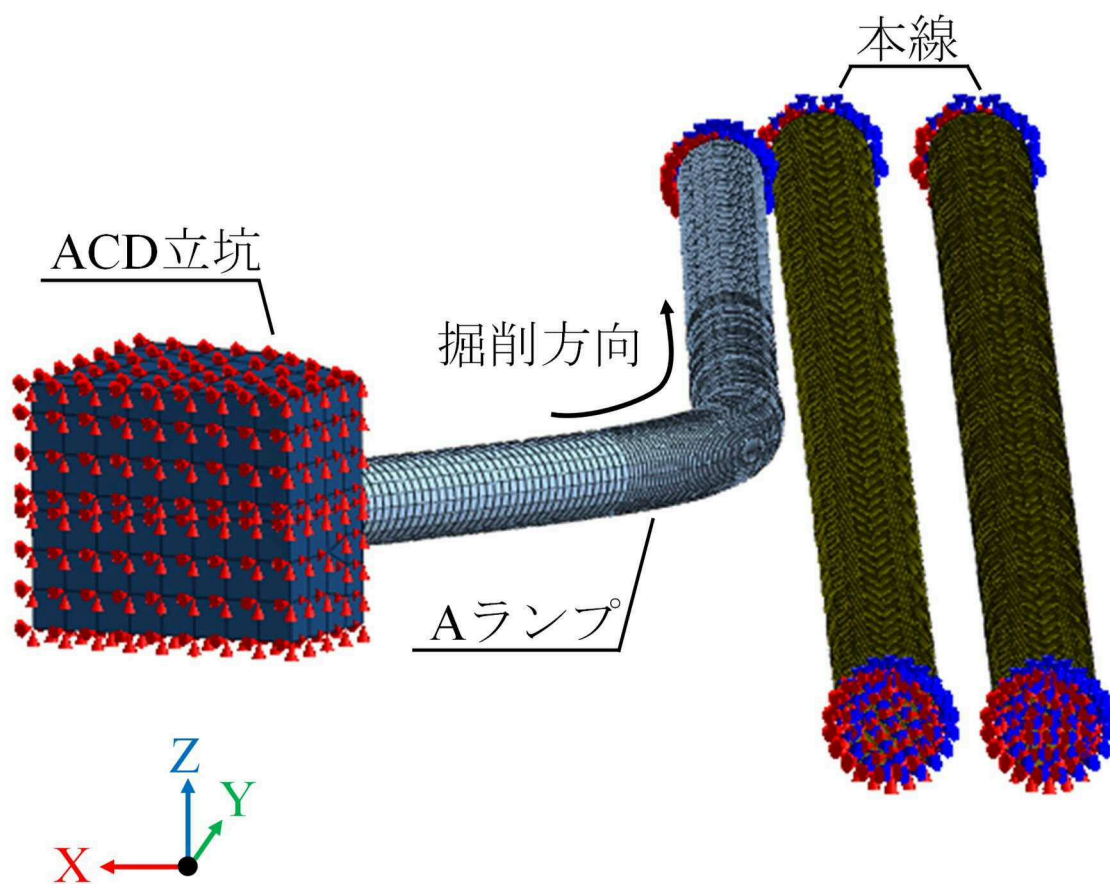


図 4.2.1-4 拘束境界条件を加えた三次元モデル

## 4.2.2 解析ステップ

### (1) 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 4.2.1-4** 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。

### (2) 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 4.2.2-1** に示すようにACD発進立坑部をモデル化した。

### (3) 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同時に、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。

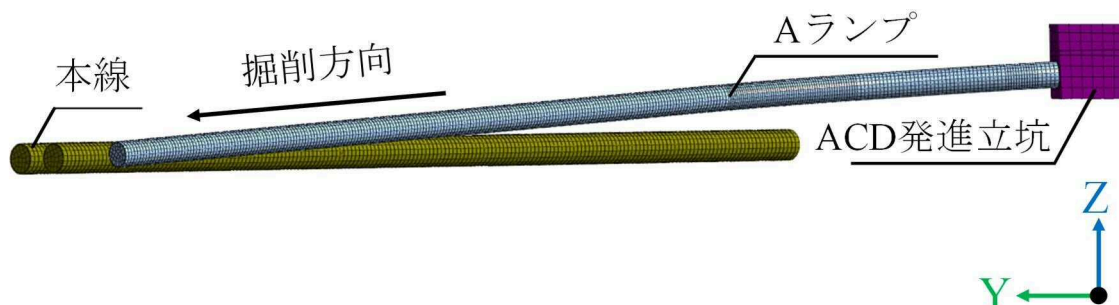


図 4.2.2-1 ACD 発進立坑を含んだモデル

### 4.2.3 解析の試算結果

解析に使用する馬場出入口トンネルは、線形が特殊であることから、通常と同様の解析方法では、現場状況の再現に至らないことが想定された。そのため、4.2.1 から 4.2.2 の解析条件により、試算を行い、実測値と比較して改善することとした。試算の結果を図 4.2.3-1 から図 4.2.3-7 に示す。

計測結果と解析結果を比較する位置は、既設の本線トンネルに最も影響があると考えられる、両トンネルが近接する到達部に設定した。なお、計測位置の詳細については、最終的に算出した解析結果と比較した 4.3 において述べる。

図 4.2.3-1 は、本線トンネルの床版下の避難用通路部（以下、インバート部と呼ぶ）に設置した計測器による計測結果と比較したものである。計測位置は、A ランプシールドが本線トンネルと近接した箇所であり、ほぼ同様の位置で最大変形となる等、傾向は似ている部分もあることが見受けられる。そのため、解析の条件を改善することで、計測結果との整合性が図れると考えた。

一方、図 4.2.3-2 から図 4.2.3-7 は、本線トンネルの床版上の走行空間に設置した計測器による計測結果と比較したものであり、いずれも本線トンネルと近接した箇所である。全ての計測結果と解析結果の比較は、変形する位置は概ね整合しているが、変形方向が整合しない結果となった。また、計測結果における最大変形量となる位置は、計測点通過後であることから、A ランプシールドの掘進における、引き込まれの現象によって変位が発生しており、解析で再現できていないことがわかる。近接部は特に本線トンネルに影響を及ぼすことから、現場計測結果を正確に再現するためには、より多くの施工過程の要素を更に取り入れ、解析モデルおよびステップについて改良をする必要があると考えた。

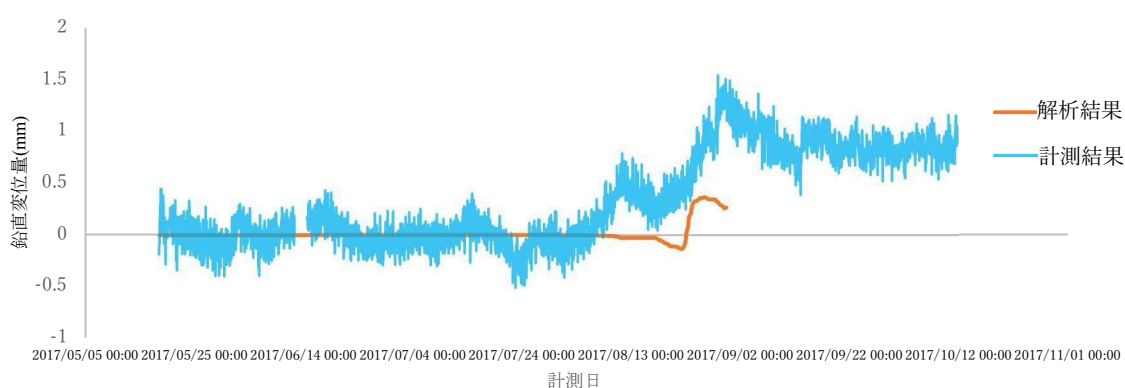


図 4.2.3-1 インバート部における計測結果と解析の試算結果

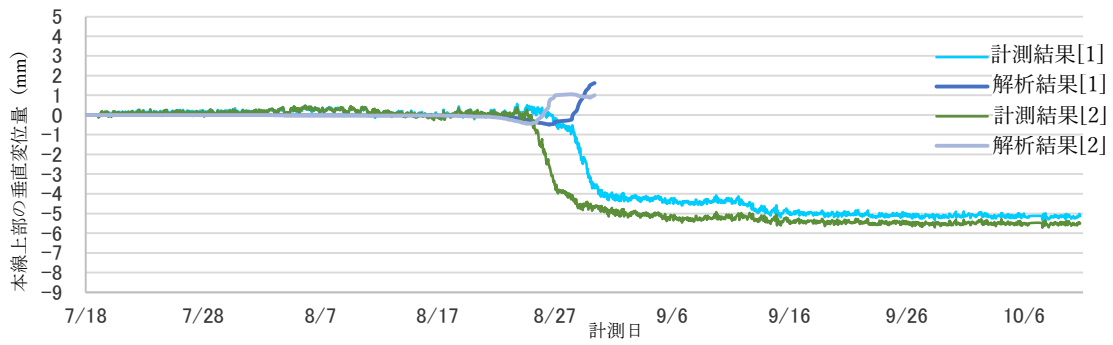


図 4.2.3-2 本線トンネルのクラウン部における鉛直変位の計測結果と解析の試算結果

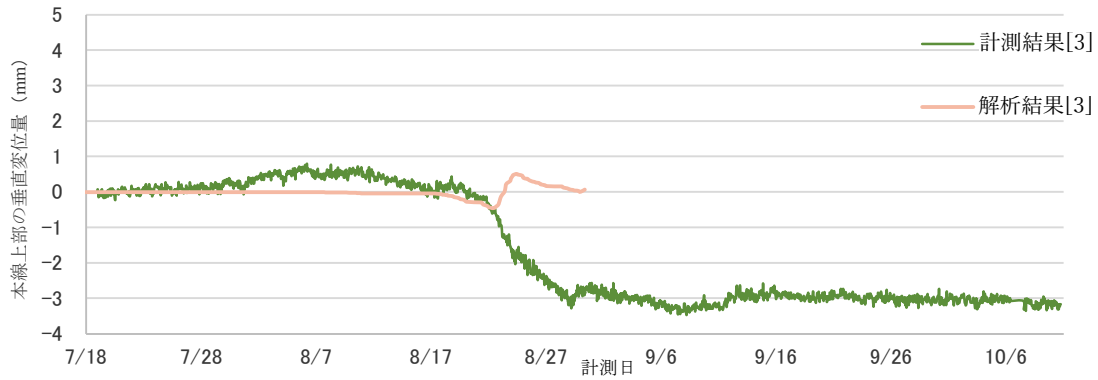


図 4.2.3-3 最到達部の本線トンネルのクラウン部における鉛直変位の計測結果と解析の試算結果

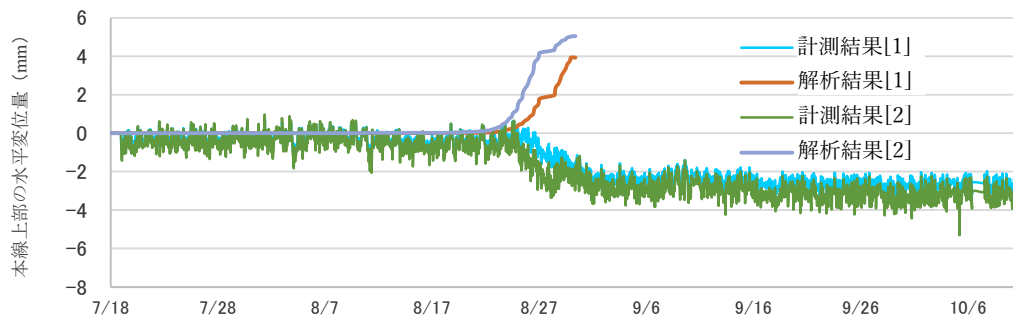


図 4.2.3-4 本線トンネルのクラウン部における水平変位の計測結果と解析の試算結果



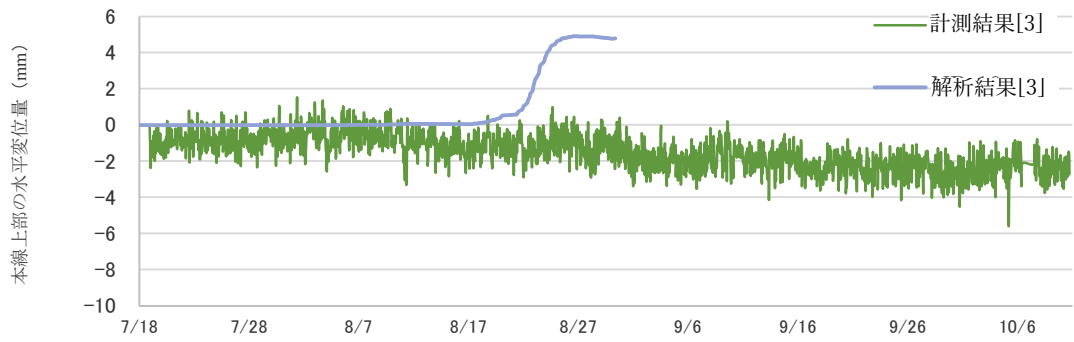


図 4.2.3-5 最到達部の本線トンネルのクラウン部における水平変位の計測結果と解析の試算結果

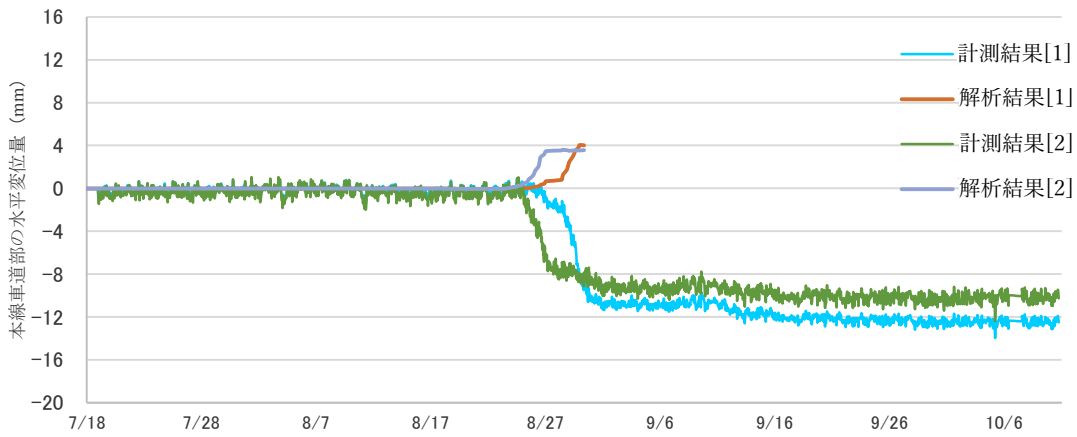


図 4.2.3-6 本線トンネルのスプリングライン部における水平変位の計測結果と解析の試算結果

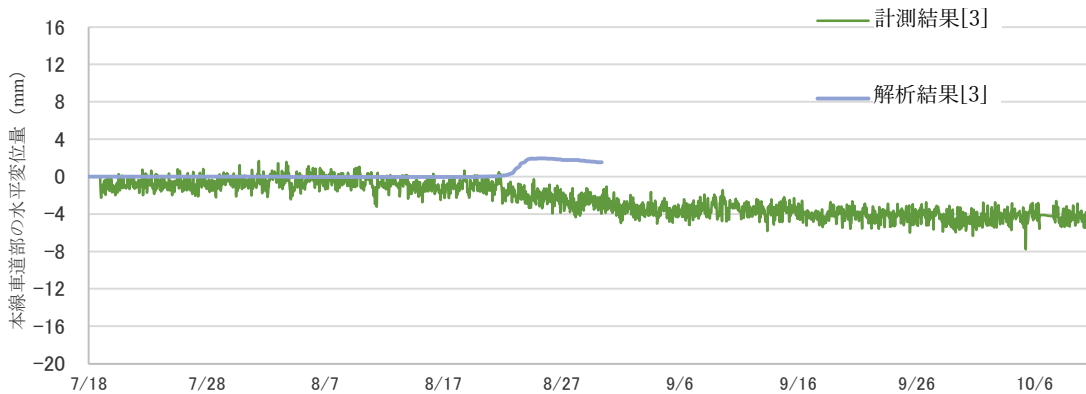


図 4.2.3-7 最到達部の本線トンネルのスプリングライン部における水平変位の計測結果と解析の試算結果

#### 4.2.4 出入口トンネルの掘削解析におけるギャップ要素の導入

試算した解析結果を踏まえ、本研究の対象とした A ランプ出入口トンネルは、本線トンネルの合流部で著しく近接することから、トンネル周辺部への影響が通常の事例と比較し、大きいことが想定された。また、馬場出入口トンネルのようにシールドトンネルにおける急曲線および急勾配となる線形の場合、実際の施工においてはシールド機後方においてテールボイドが発生することによって周辺地盤に影響が生じ、影響を最小限とするために、裏込め注入によって抑制する。そこで、本解析においては、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。

テールボイドが発生することを解析的に再現するために、本解析では、Rowe and Kack (1983)<sup>7)</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ギャップ要素を設定することで、トンネル構築による地盤掘削の影響を算出することとした。ギャップ要素は FEM 解析において、モデル内の 2 つの節点間からなる要素であり、地盤要素とセグメント要素の節点間の設定を可能とする特性がある。ギャップ要素は、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ため、本研究の事例においては、特に大きいと考えられる要因を再現できることから、ギャップ要素を設定することが望ましいと考えた。なお、ギャップ要素は、テールボイド部のゆるみを示すために用いられた事例や<sup>8)</sup>、近年では、海外のシールドトンネルの施工事例を用いて、余掘り部に対する裏込め注入を再現して沈下量を再現する等<sup>9)</sup>、FEM 解析において用いられている。

ここで、Lee ら<sup>10)</sup>によって定義された、ギャップの定義およびギャップの考え方を示した図を図 4.2.4-1 および図 4.2.4-2 に示す。図 4.2.4-1 は、Lee ら<sup>10)</sup>による定義図を編集したものである。シールドトンネル後方のテールボイドは、図 4.2.4-1 の右図に示すように、セグメント径、シールドマシンのスキンプレート、テールクリアランスから算出できるとしているが、実際にはオーバーカットの余掘りがあり、テールボイド内にはギャップ (GAP) が存在することを示している。図 4.2.4-1 では、ギャップの範囲をより詳細に示したものであり、本研究においては、テールボイドおよびオーバーカットを“ギャップ (GAP)”と称している。

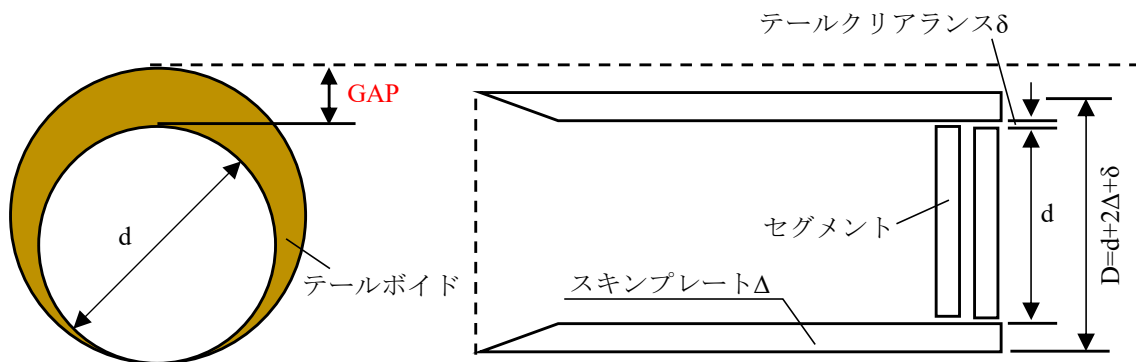


図 4.2.4-1 Lee ら<sup>10)</sup>によるギャップの定義図

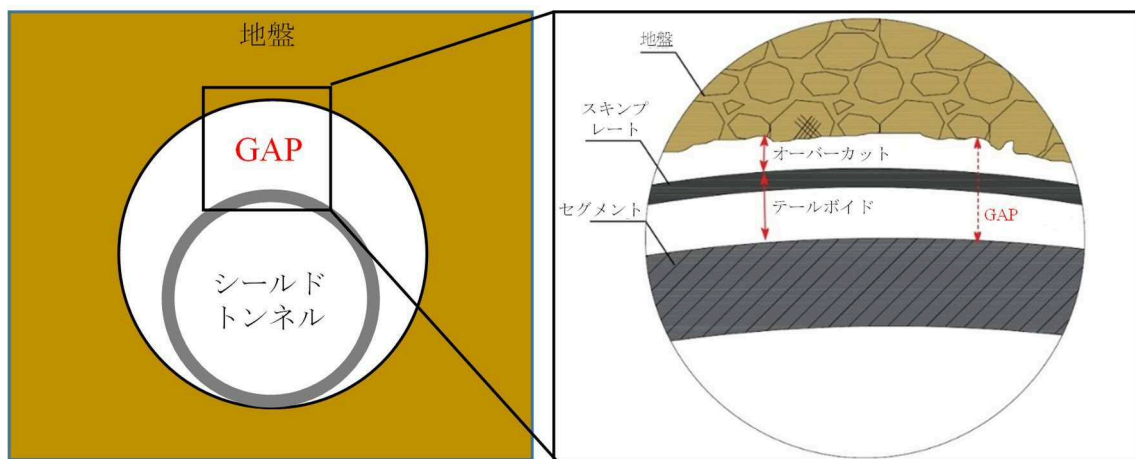


図 4.2.4-2 GAP と掘削における関係図

本解析におけるギャップ要素は、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(22)で表されると仮定した。

$$u = GAP \times (\alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3) \quad (22)$$

ここに、 $u$ はギャップ要素外周節点に与える強制変位量、 $GAP$ 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、 $u \geq GAP$ 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働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 $u < GAP$ 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 $GAP$ 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>10)</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 $GAP$ は次式(23)で与えられている。

$$GAP = G_p + U_{3D}^* + \omega \quad (23)$$

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>10)</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(23)は下記のようなになる。

$$GAP = G_p + 0.6G_p = 1.6G_p \quad (24)$$

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(23)で定めている $\omega$ は、Lee ら<sup>10)</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 4.2.4-3 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(25)で与えられる。

$$G_{p0} = \Delta + \delta \quad (25)$$

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 $GAP$ を求めると次式(26)で与えられることになる。

$$GAP = 1.6 \times G_{p0} \quad (26)$$

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(11)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(22)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。

#### 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>11)</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、中折れ装置の有無によって異なるが、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。

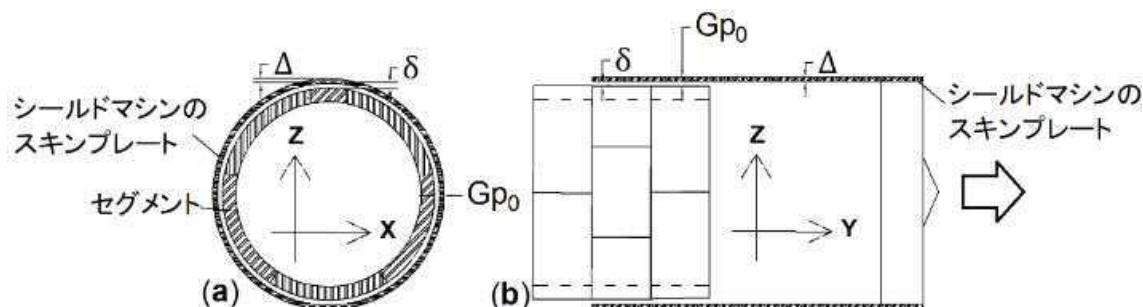


図 4.2.4-3 直線部のテールボイド厚さ $G_{p0}$

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 4.2.4-4** 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>11)</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(24)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。

$$G_p)_{xy} = \left( R - \frac{D_0}{2} \right) (1 - \cos \beta) \approx \frac{l^2}{2(R - D_0/2)} \quad (27)$$

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。

式(21)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(28)で求めることができる。

$$\alpha_1)_{xy} = 1 + \frac{G_p)_{xy}}{G_{p0}} = 1 + \frac{l^2}{2(R - D_0/2)G_{p0}} \quad (28)$$

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(29)で求めることとした。なお、 $yz$ は、鉛

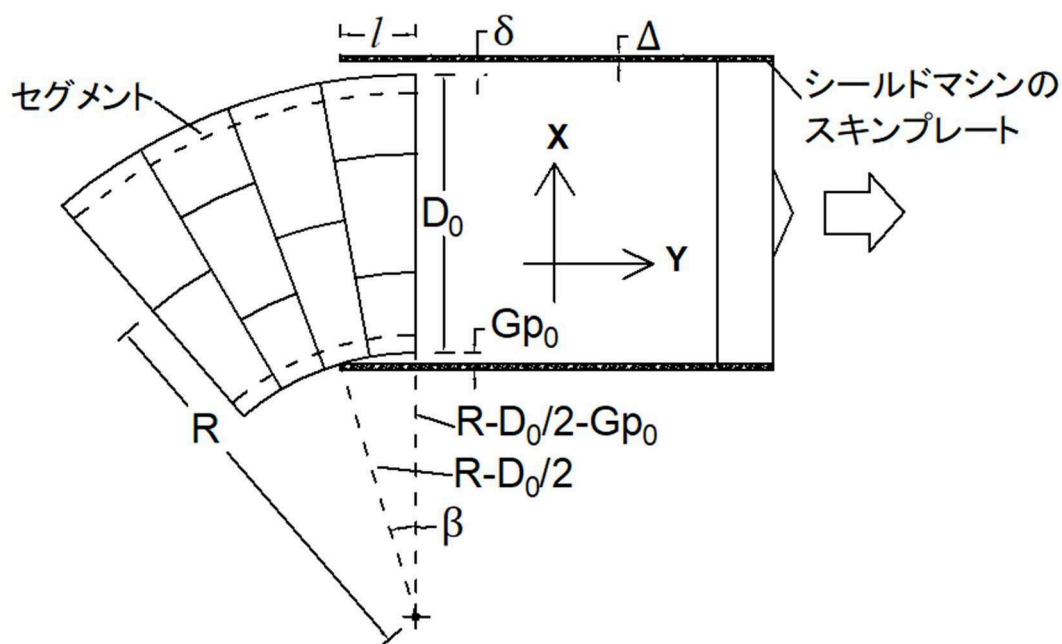


図 4.2.4-4 シールド曲線部におけるシールドマシンとセグメントの幾何学的な位置関係

直面を表す記号である。

$$\alpha_1)_{yz} = 1 + \frac{|i_{curve} - i_{straight}|}{i_{straight}} \quad (29)$$

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(30)で求めた。

$$\alpha_1 = \alpha_1)_{xy} \times \alpha_1)_{yz} \quad (30)$$

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 4.2.4-5**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し、5.44~7.38%の急勾配に対しては、1,000mm のコピーカッ

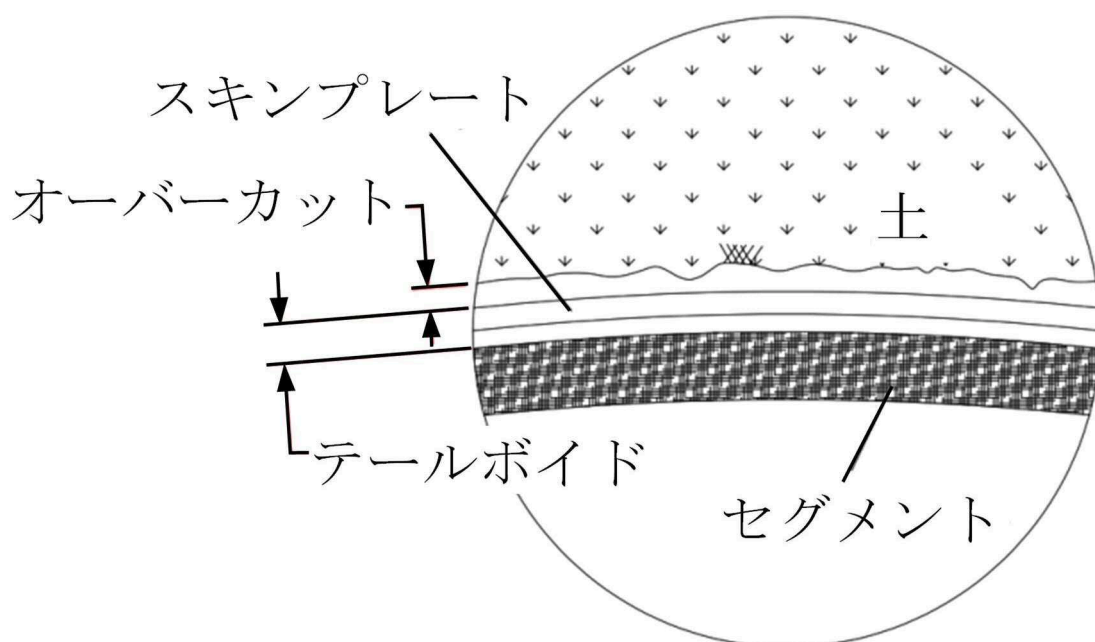


図 4.2.4-5 テールボイドと余掘り厚さ

ター伸限值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(30)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>12)</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>12)</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>13)</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(31)で求めることができる。

$$\alpha_2 = \frac{\text{設計注入率(100\%)} \times \text{裏込め材収縮率(8.5\%)}}{\text{計画注入率(\%)}} \quad (31)$$

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>~100 N/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>14)</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(32)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。

$$\alpha_3 = \frac{\text{拘束圧}}{\text{設計裏込め注入圧}} \quad (32)$$

#### d) 裏込め注入の硬化時間

b) にて示した裏込め注入量の考慮により、覆工と地山に発生する空隙を考慮しているが、実際の掘進では、裏込め材が注入後に硬化し、地山と同様の強度が発生するまでに時間を要する。また、裏込め材が硬化するまでに掘進によるトンネルの構築は続くため、トンネルの掘進量も加えて考慮する必要があると考えた。しかし、裏込め注入材の硬化時間は、材料実験により算出されているが、掘進速度については、実際に施工前の段階において、精度の高い掘進量の算出が困難であり、また現場状況によって想定した掘進量を掘進できない事例も多い。そこで、シールドの掘進量と裏込め注入の硬化時間を考慮する必要があるか検証した。裏込め注入材の硬化時間に対する比較モデルを図 4.2.4-6 に示す。

図 4.2.4-6 に示すように 1 日で掘進できる量を断面シールドかつ急曲線・急勾配であることから 2 リング、通常の大断面シールドの 1 日当たりの掘進量を 5 リングとして掘進量を仮定し、掘進後、裏込め注入材が地山と同等に硬化するまでにそれぞれ 1 日と想定し、それぞれ影響を比較した。比較した結果を図 4.2.4-7 に示す。

比較の結果、双方ともほぼ変わらない同様の地盤沈下量を示していることから、裏込め注入材の硬化時間による地盤の影響は、ほぼないことがわかる。よって、裏込め注入材の硬化時間は、本解析において適用しないこととした。

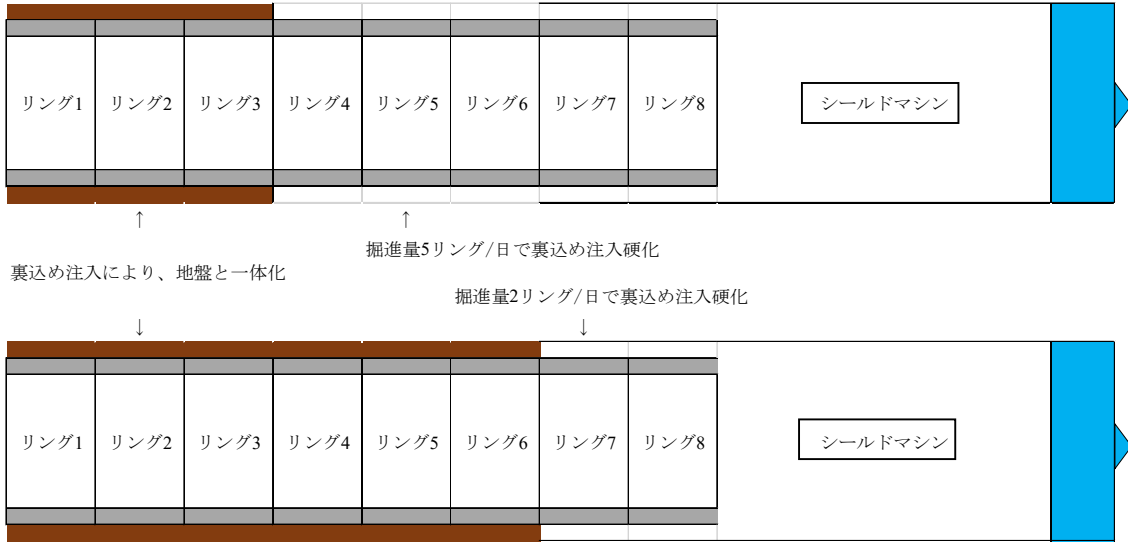


図 4.2.4-6 裏込め注入材の硬化時間の比較モデル

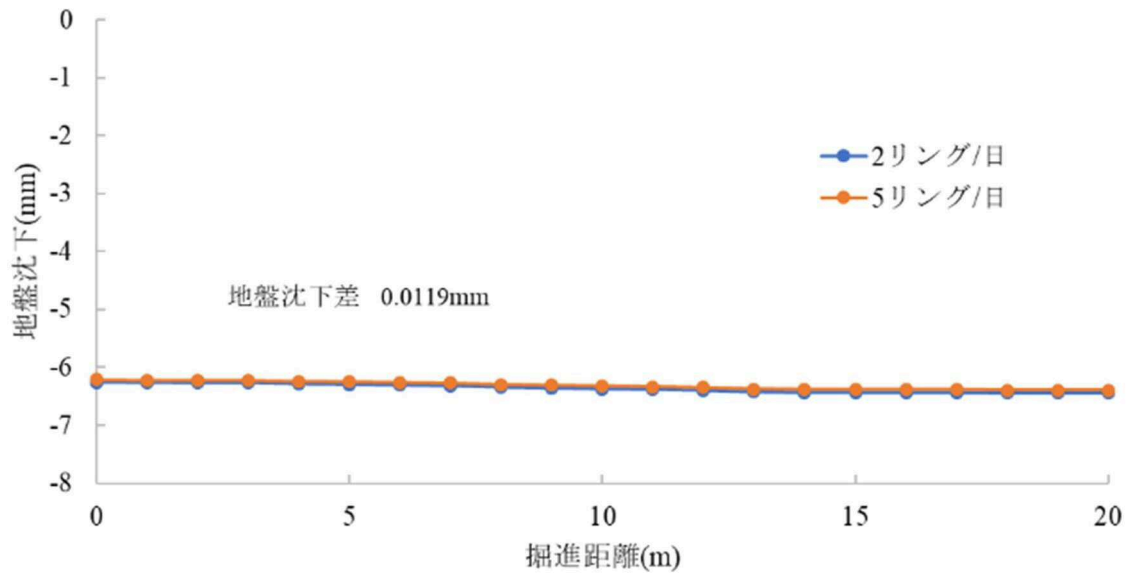


図 4.2.4-7 掘進距離と地盤沈下の関係

#### 4.2.5 出入口トンネルの掘削解析におけるギャップ要素諸係数の決定

表 4.2.5-1 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  $GAP = 1.6(\Delta + \delta) = 184\text{mm}$  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 4.2.5-1 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 4.2.5-1 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 $D_o(\text{mm})$	10,130	9,900	-
内径 $D_i(\text{mm})$	10,000	9,200	-
長さ $L(\text{mm})$	10,500	1,500 or 1,000	-
厚さ(mm)	65	350	115
要素物性	表 4.2.1-9 参照	表 4.2.1-9 参照	$E = 1(\text{MPa})$ , $\nu = 0.48$

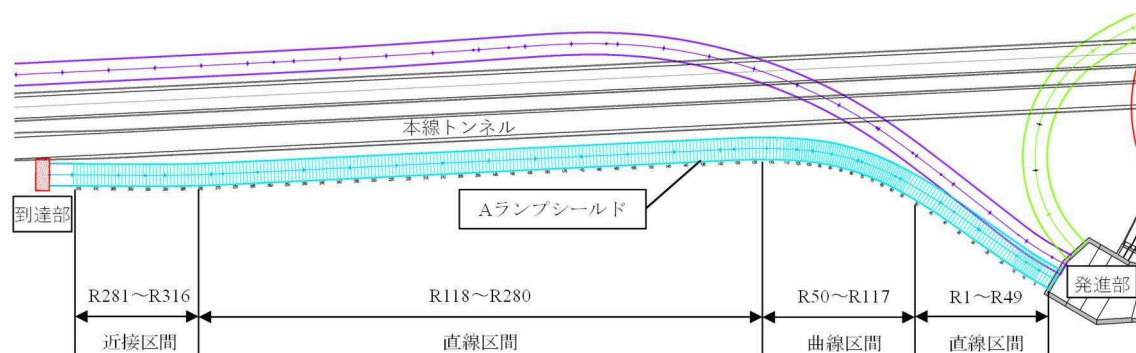


図 4.2.5-1 A ランプシールドの区間分け

表 4.2.5-2 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(28)、(29)、(30)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(28)におけるテール長は、 $l = 3\text{m}$ であり、式(29)における縦断勾配の基準となる  $i_{\text{straight}}$  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 4.2.5-2 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、実施工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(31)を用いると各区間で表 4.2.5-3 に示す値となる。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 4.2.5-4 に示すように全区間で一定とした。

表 4.2.5-2 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

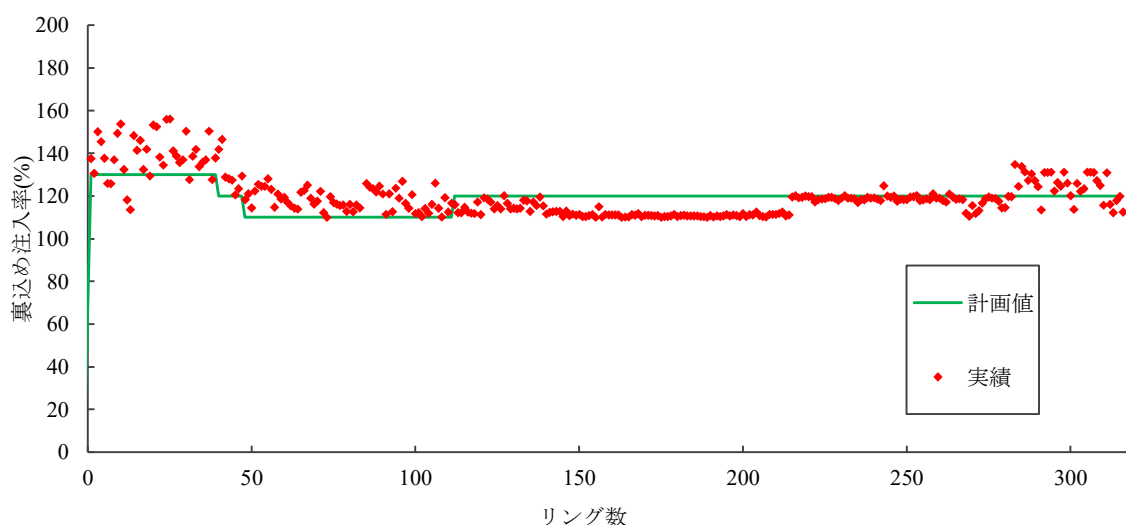


図 4.2.5-2 計画裏込め注入量と注入量実績の比較

表 4.2.5-3 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

表 4.2.5-4 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

以上のギャップ要素に関係する諸係数の算定結果をもとに、式(22)により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 4.2.5-5 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 4.2.5-3 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 4.2.5-5 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。

表 4.2.5-5 区間毎に算出した諸係数と強制変位 $u$

リング範囲	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	GAP (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

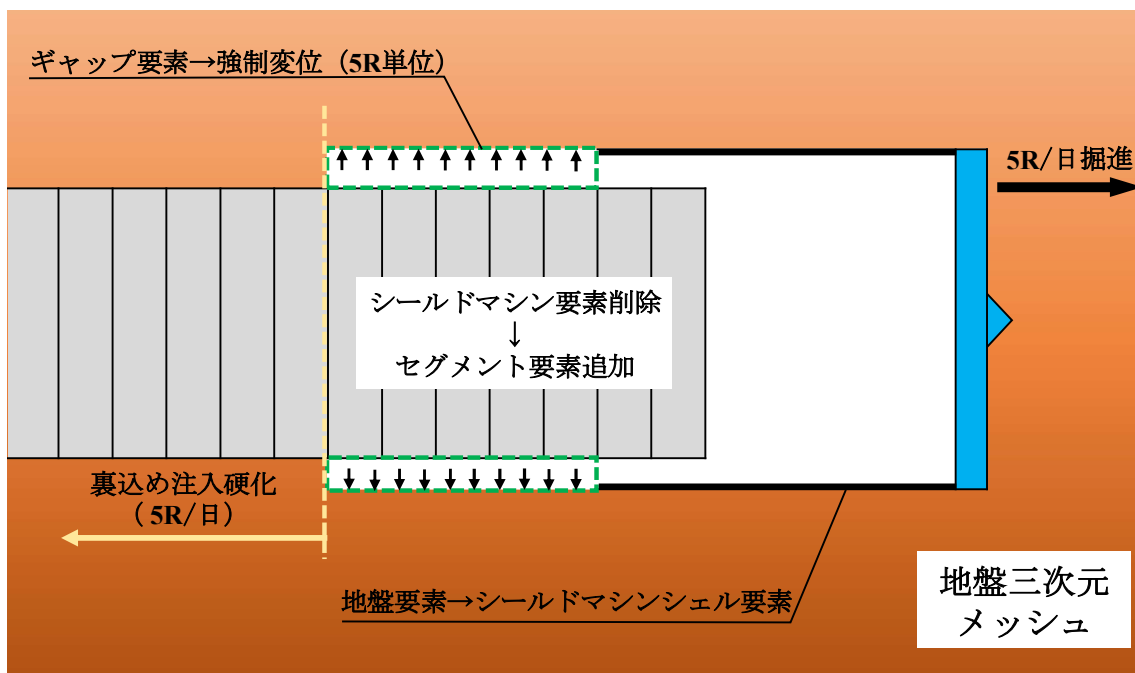


図 4.2.5-3 解析における出入口トンネルの構築プロセスイメージ

## 4.3 出入口トンネルの掘進が本線トンネルに及ぼす影響の 評価

### 4.3.1 解析結果の比較に使用した現地計測箇所の概要

図 4.3.1-1 は、3.4.6 にて述べた計測および監視における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 4.3.1-2 は、A ランプシールドが本線トンネルに最接近するリング範囲 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 4.3.1-3 は、図 4.3.1-1 および図 4.3.1-2 の変位計の計測点断面図を示したものである。図 4.3.1-1 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 4.3.1-2 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 箇所を設置したターゲットの変位を計測した。

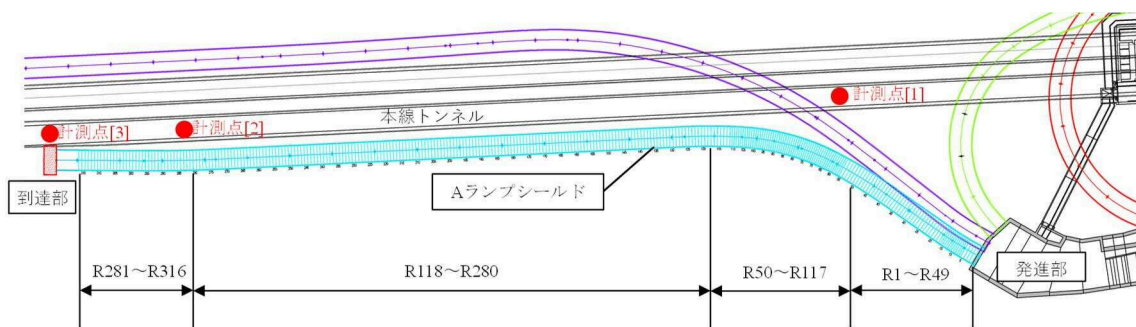


図 4.3.1-1 変位計測点設置位置 (インバート部・平面)

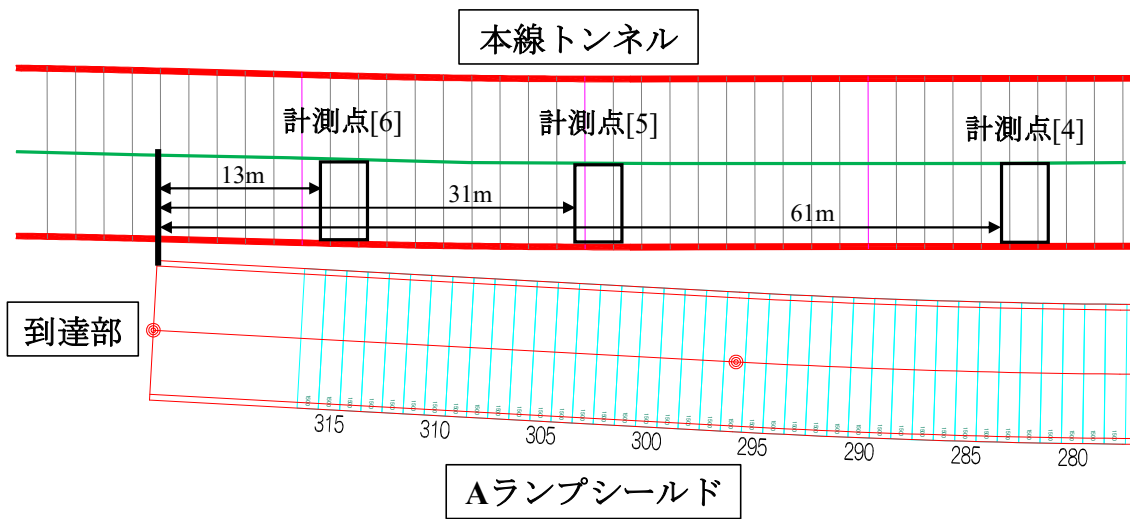


図 4.3.1-2 変位計測点設置位置 (本線上・平面)

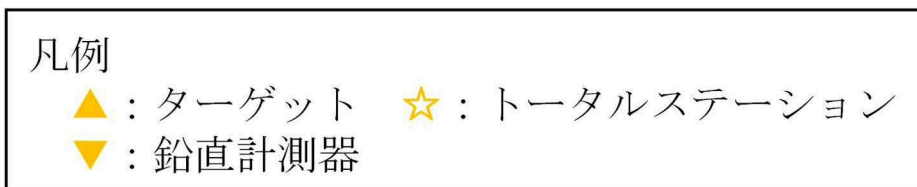
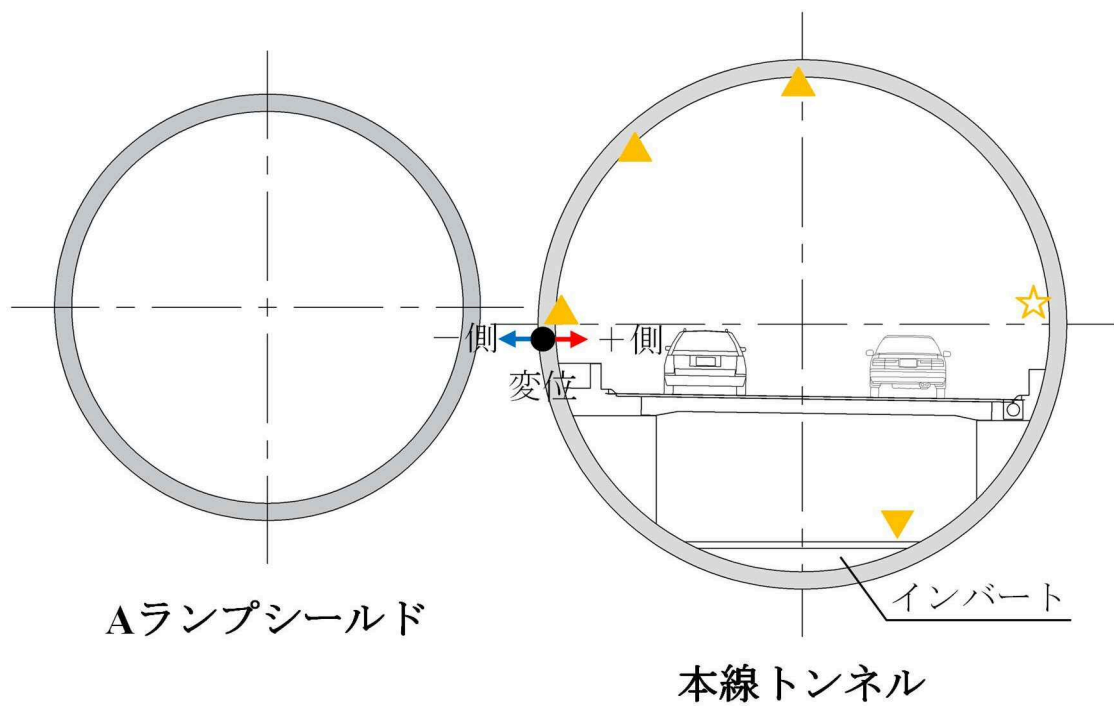


図 4.3.1-3 変位計測点設置位置 (断面)



#### 4.3.2 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との比較

図 4.3.2-1 および図 4.3.2-2 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。グラフにおける縦軸の垂直変位量の上限および下限値の設定については、最終的に施工前の検討と比較することを踏まえ、第 3 章にて算出した鉛直方向の変形量から 5mm 単位で切り上げた値を採用した。

図 4.3.1-1 の計測点[1]は、表 4.2.5-5 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 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 4.3.2-3 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 4.3.2-2 の計測点[2]は、図 4.3.2-4 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 4.2.5-5 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。

水盛式沈下計にて計測した現場のインバート部は、トンネル内であることに加え、車両が走行していない床版下に設置されていることから、温度変化による計測値への影響は生じていないと考えられる。また、現場においては、データを自動計測しているため、読み取り誤差もない。現場にて使用した水盛式沈下計の機種は、差動トランス式水盛沈下計 JS-50 を

使用しており、計測精度は公表されていないが、他の水盛沈下計と同等程度と考えた場合、0.5mm程度と推定される。

計測精度を踏まえ、計測点[1]および計測点[2]の計測結果と解析結果を改めて比較すると、計測点[1]においては、計測結果の最大変位量が0.4mmであり、解析結果との差も最大0.3mmであることから、計測精度を下回る結果となっており、計測結果と解析結果はほぼ一致した結果を得られていることが改めてわかる。また、計測点[2]においては、最大変位量が計測結果で1.5mm、解析結果で約1.8mmであり、差が約0.3mmである。また、最も差が生じている解析結果の最大値の計測日においても、差は約0.7mmである。したがって、計測精度を踏まえると計測点[2]も同様に、計測結果と解析結果はほぼ同等の結果であるといえる。

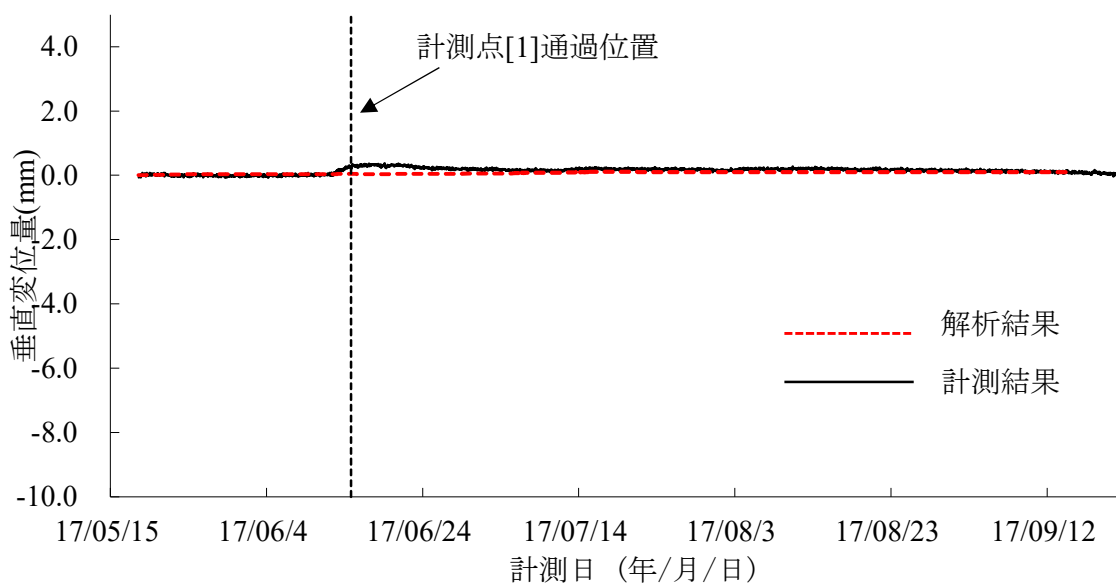


図 4.3.2-1 計測点[1]における鉛直変位量の比較

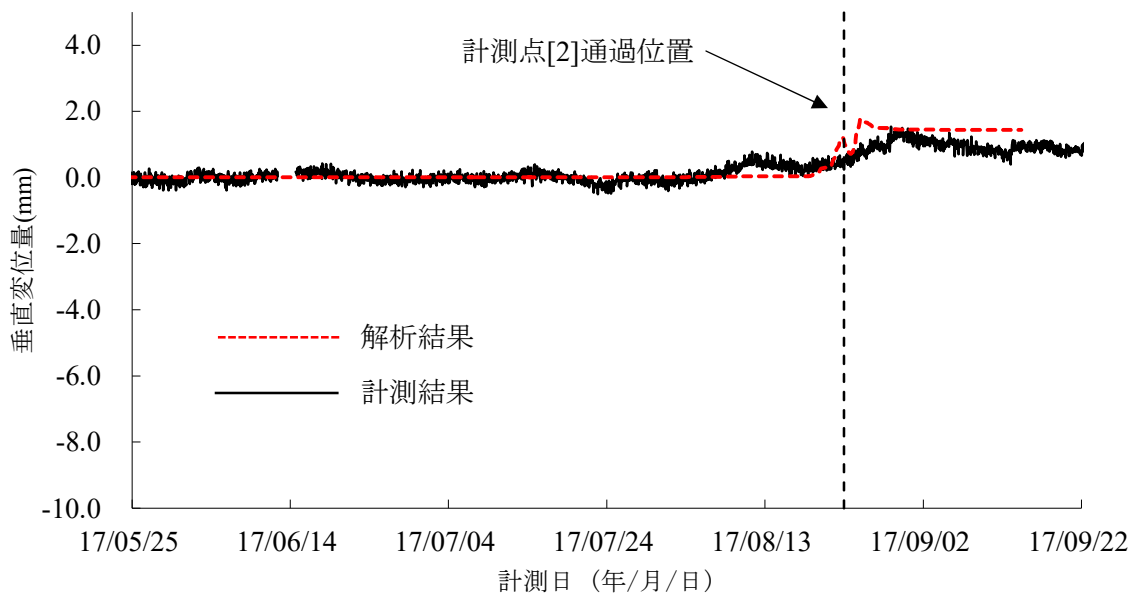


図 4.3.2-2 計測点[2]における鉛直変位量の比較

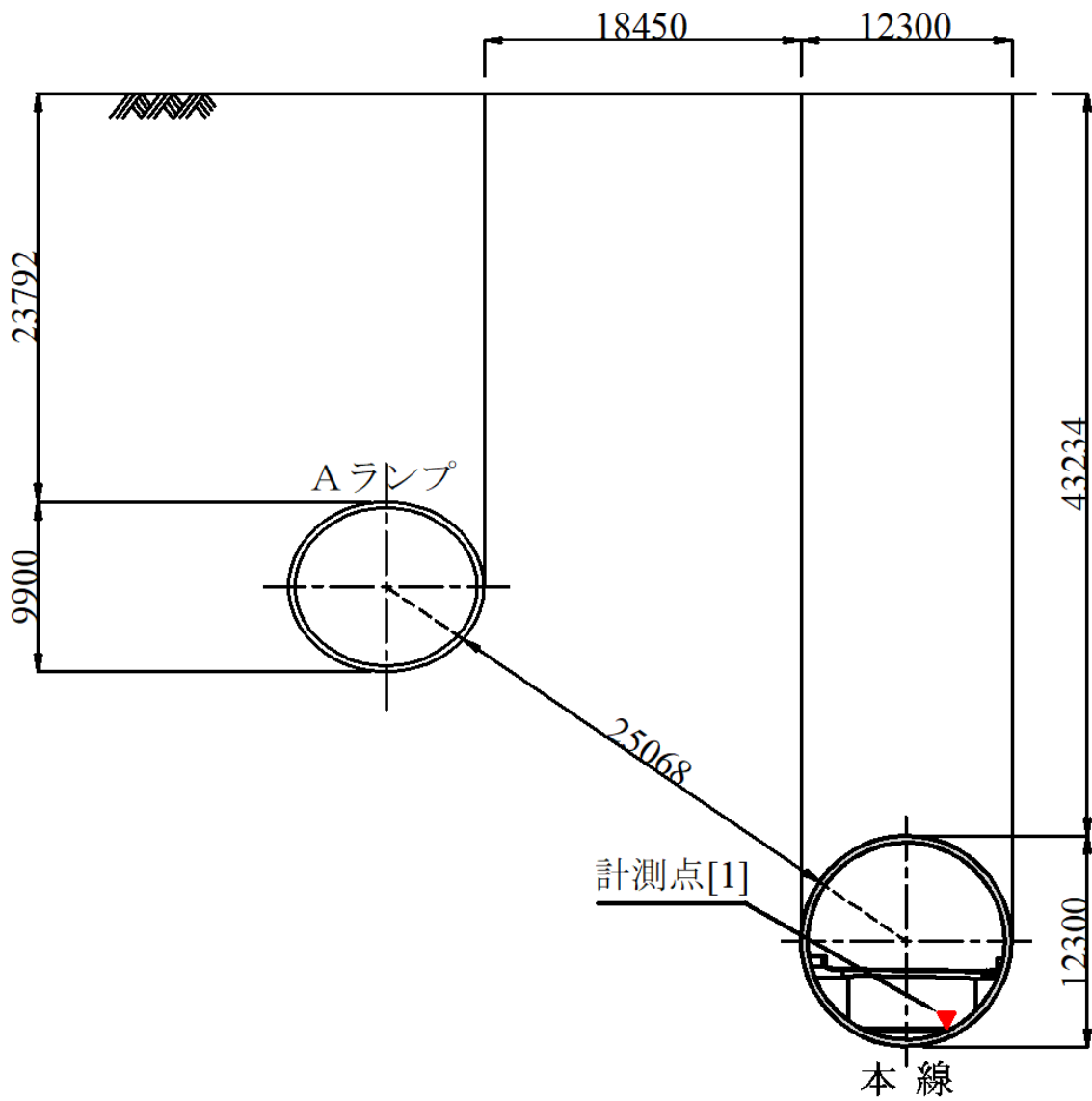


図 4.3.2-3 計測点[1]を含む横断面における A ランプシールドと本線トンネルの相対位置

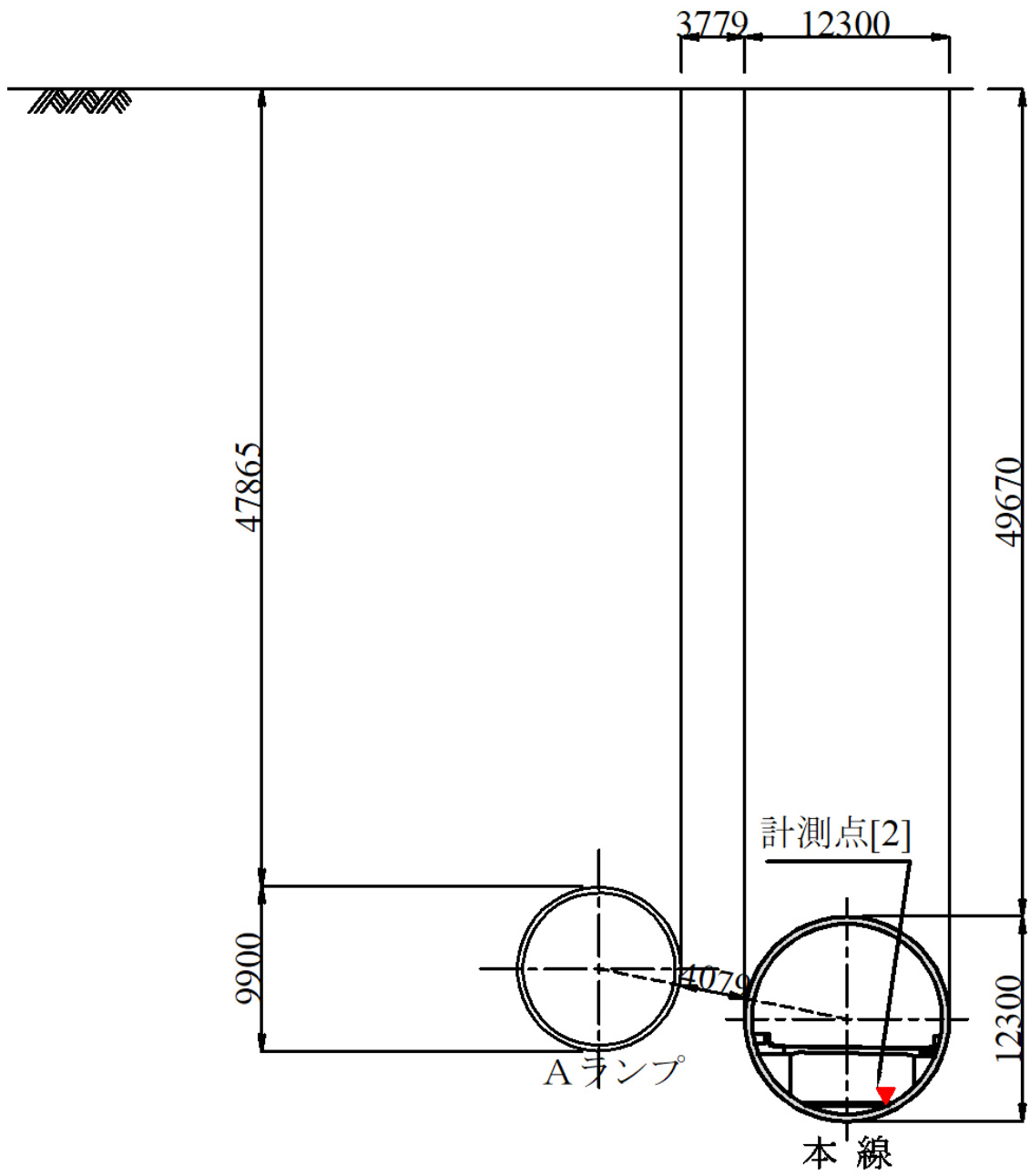


図 4.3.2-4 計測点[2]を含む横断面における A ランプシールドと本線トンネルの相対位置

### 4.3.3 本線トンネル内に設けた変位計測点との比較

次に、A ランプシールドが本線トンネルに最接近した表 4.2.5-5 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 4.3.3-1、図 4.3.3-2、図 4.3.3-3 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 4.3.3-1 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たものであり、本線トンネルの外面側への変形をプラスで示し、内空側への変形をマイナスで示している。なお、各グラフにおける縦軸の変位量の上限および下限値の設定については、図 4.3.2-1 および図 4.3.2-2 と同様に、第 3 章にて算出した鉛直方向および水平方向の変形量から 5mm 単位で切り上げた値を採用した。

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 4.3.3-1 を拡大した対象箇所を図 4.3.3-4 に示す。

図 4.3.3-2 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 4.3.3-1 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 4.2.3-3 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4.3.3-3は、他計測箇所である図4.3.3-1および図4.3.3-2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。

計測に使用したトータルステーションおよびターゲットは、本線トンネルにおける車両走行空間内に設置されているが、既に供用していたことから、車両が走行していた。首都高速道路におけるシールドトンネル内において、車両からの排熱によって温度上昇することは確認されているが<sup>15)</sup>、 $5^{\circ}\text{C}$ 程度の温度差であり、温度変化による計測の影響はほぼないと考えられる。また、現場にて使用したトータルステーションの計測精度は、 $\pm 3\text{mm}$ である。

計測精度を踏まえ、計測結果と解析結果を改めて比較した場合、まず、図4.3.3-1は、変位量が収束する最大変位量において、計測点[4]および[6]は約1mmの差であるが、計測点[5]は約4mmの差となっている。次に図4.3.3-2では、どの計測位置においても差が約2mmである。図4.3.3-3では、計測点[4]および[5]が約3mm、計測点[6]が約5mmの差である。計測精度を踏まえると、各計測結果と解析結果はほぼ一致した結果を得られていることが

改めて確認できる。

以上の結果から、馬場出入口工事のように既設の近接構造物に対し、急曲線で急勾配となる複雑な線形を有する新設シールドトンネルが、三次元的に離隔を変化して近接した場合の掘進による近接影響は、ギャップ要素を用いて線形の影響、裏込め注入量および裏込め注入圧力の影響を反映した三次元 FEM 解析によって、計測値に近い値を再現することができる。

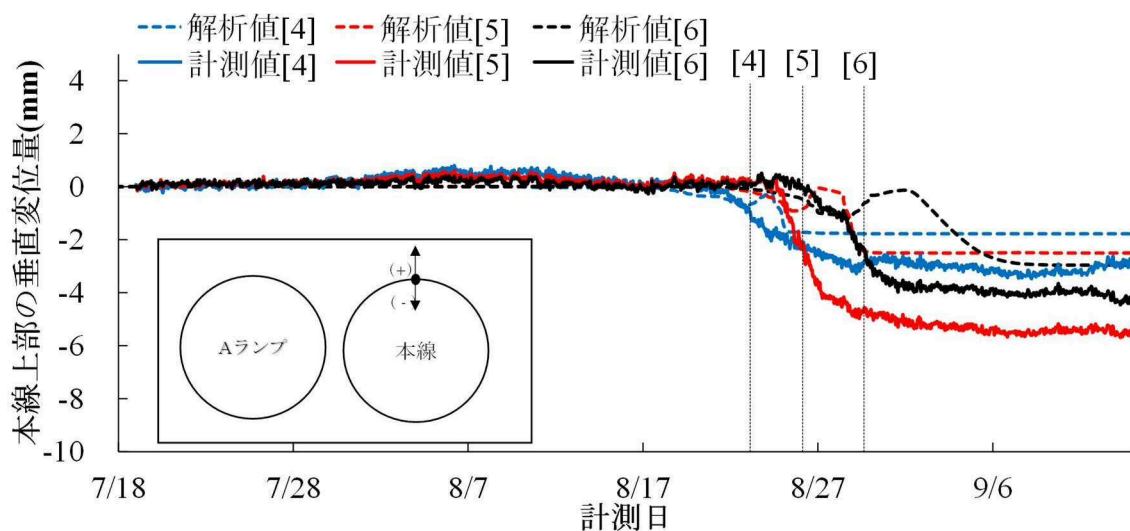


図 4.3.3-1 本線トンネルクラウン部の鉛直変位の比較

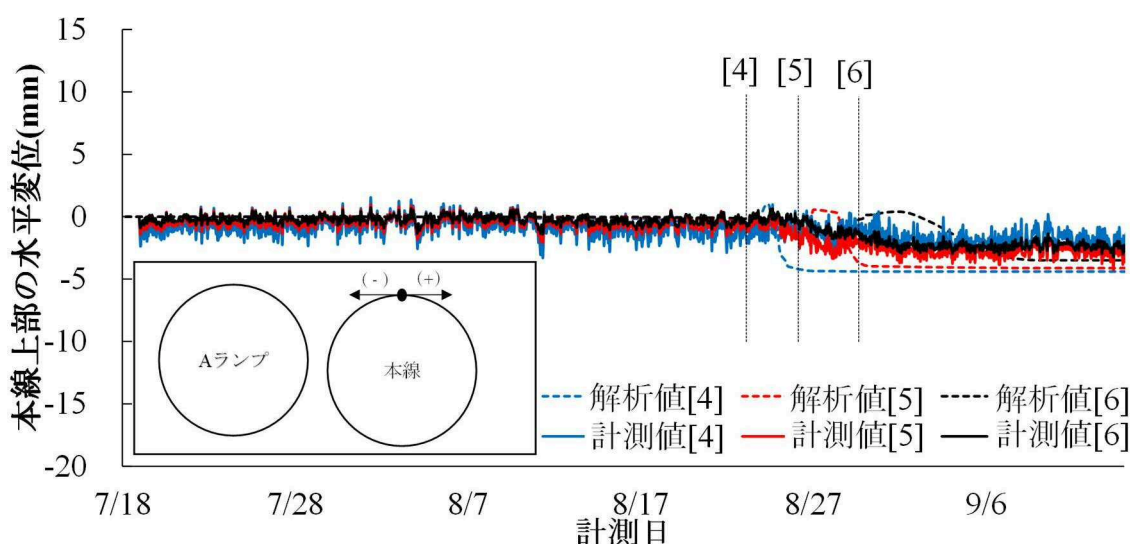


図 4.3.3-2 本線トンネルクラウン部の水平変位の比較



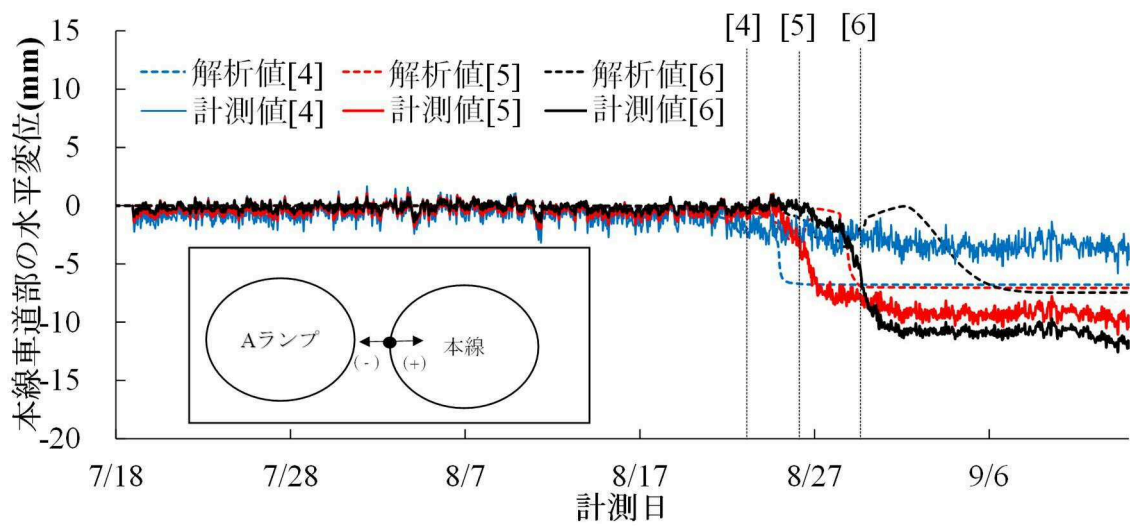


図 4.3.3-3 本線トンネルスプリングライン部の水平変位の比較

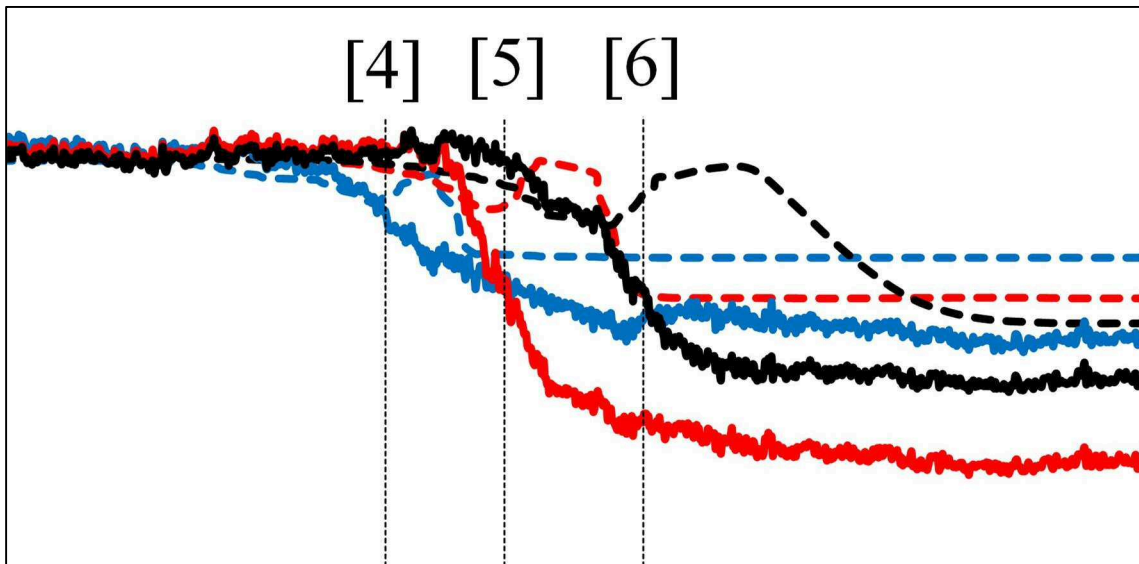


図 4.3.3-4 図 4.3.3-1 における計測点付近の拡大図

## 【第4章 参考文献】

- 1) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 3 シールド工法の調査・設計から施工まで，pp. 283, 1997.
- 2) MIDAS IT Japan Co., Ltd.: 64 ビット基盤地盤分野汎用解析システム，Midas GTS NX, 2018.
- 3) 地盤工学会：地盤技術者のためのFEMシリーズ② 有限要素法をわかる，pp. 34-43, 2020.
- 4) 寺山徹，山本泰幹，今田徹：シールドトンネルランプ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.
- 5) 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. 62, 2006.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 初谷樹弥，鈴木誠，杉山博一，中井照夫：三次元有限要素法を用いたシールドトンネルの施工解析検討，土木学会年次学術講演会公演概要集，III-361, 2020.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) Ingles, O. G. and Metcalf, J. B.: *Soil Stabilization: Principles and Practice*, 1972.
- 14) 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.
- 15) 松月基将，水野明哲，柳寛孝：山手トンネルの温度上昇の原因と対策について，日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集，No. 16-1, 2016.

## 第5章 離隔距離に基づく影響評価

### 5.1 二次元解析と三次元解析の比較

A ランプシールド施工時の事前検討においては、3.3.3にて述べたように、二次元はりーばね解析による影響検討により、A ランプシールド掘進時と通過後の本線トンネルの最大変位量を求めた。ここでは、図4.3.3-1、図4.3.3-3にて示した三次元解析結果と現場の計測結果に対し、二次元はりーばね解析の結果を比較することにより、併設トンネルの三次元離隔変化における、施工前の影響検討手法の妥当性について検討する。

図5.1-1、図5.1-2は、図4.3.3-1、図4.3.3-3の比較結果に二次元はりーばね解析にて算出した変位量を追記したものである。これらの図では、本線トンネルクラウン部の鉛直変位量とスプリングライン部の水平変位量について、はりーばね解析値がシールド通過前と通過後の検討をしていることから、各計測点までの変位量をシールド掘進時の変位量で示し、各計測点後から本線トンネルまで近接するまでを掘進後の変位量で示すことで、三次元解析の結果と比較している。A ランプシールド掘進時の本線トンネルクラウン部、スプリングライン部のA ランプシールドの掘進による変位は計測値、三次元解析値ともに十分小さい値であり、はりーばね解析値は過大であることがわかる。二次元はりーばね解析においては、既設の本線トンネルに対し、A ランプシールドの掘削時における切羽圧が影響を及ぼし、変形することを想定して算出したが、計測結果ではほぼ影響がなく、再現できていない。一方、三次元解析においては、4.3.3にて述べたように計測値を再現できていることがわかる。

図4.3.3-3で示したA ランプシールドが各計測点を通過した後の変位については、二次元はりーばね解析の結果が最も大きな値を示していることがわかる。図5.1-1で示しているクラウン部内空側への最大鉛直変位の中で、最も大きな変位を示した位置は、計測値[2]である。計測値と解析値のそれぞれの関係は、はりーばねモデルによる解析値が8.3mm、三次元解析が2.5mm、計測値が6.2mmとなっている。図5.1-2で示しているスプリングライン部外面側への水平変位では、最も大きな変位を示した位置が計測値[3]である。計測値と解析値のそれぞれの関係は、はりーばねモデルによる解析値が18.4mm、三次元解析が7.5mm、計測値が12.6mmとなっている。最大変位のみで比較した場合、クラウン部の鉛直変位では、計測値に対し、はりーばねモデルが約130%、三次元解析が約40%となる。また、スプリングラインの水平変位においては、計測値に対し、はりーばねモデルが約150%、三次元解析が約60%となる。

以上の結果から、最大変位のみを比較した場合、計測値と解析値の差では、はりーばねモ

ゲルと三次元解析では大きく変わらないことがわかる。

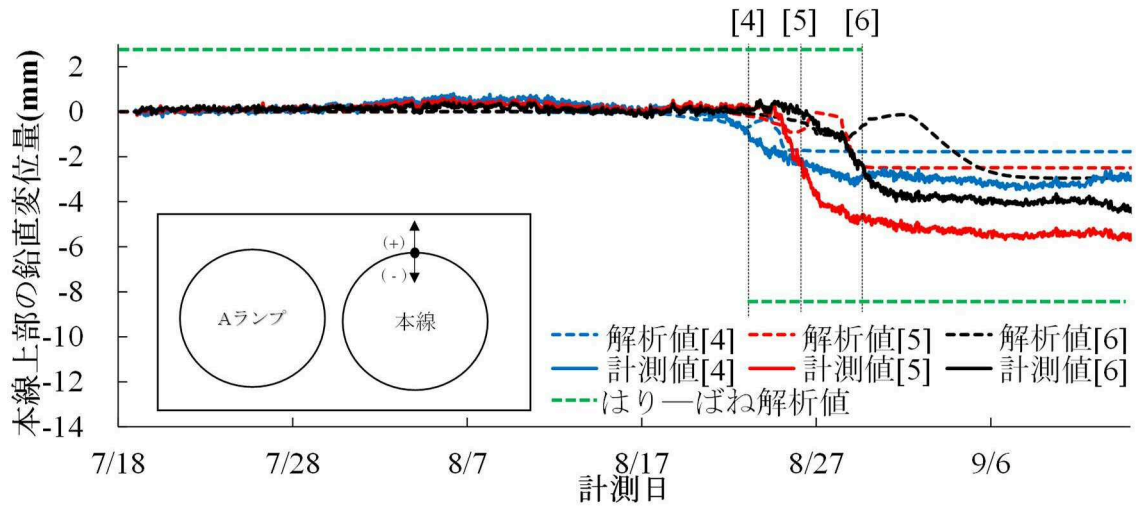


図 5.1-1 本線トンネルクラウン部の鉛直変位の比較

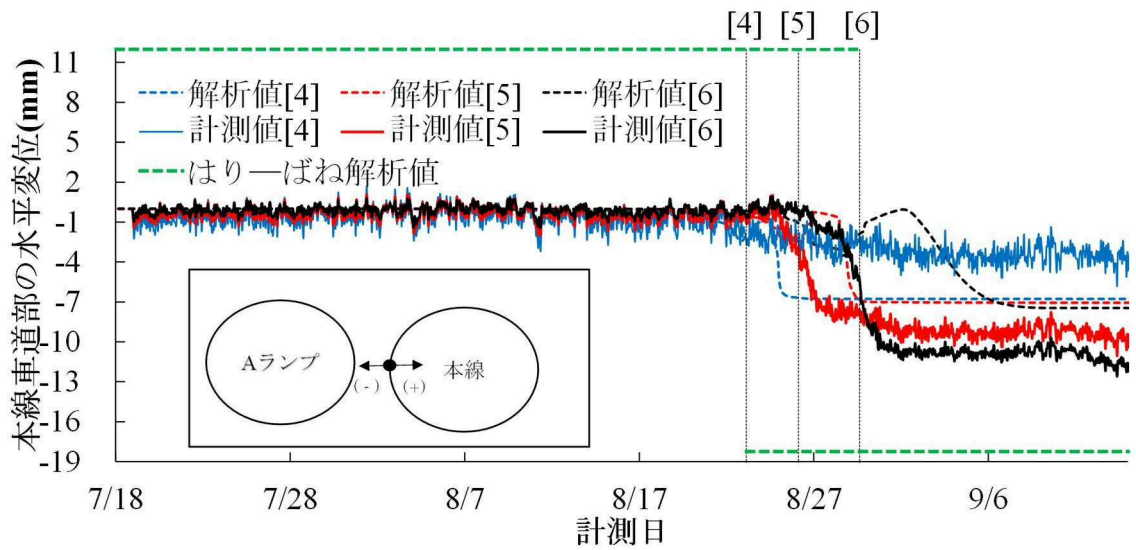


図 5.1-2 本線トンネルスプリングライン部の水平変位の比較

## 5.2 二次元はりばね解析による事前検討結果の評価

比較した二次元はりばね解析と三次元 FEM 解析は、それぞれ異なる解析手法にて算出した結果である。二次元はりばね解析においては、本線シールドトンネルを対象にセグメントをはりとし、地盤をばねとしたモデルで考え、セグメントに作用する荷重に対し、部材の許容応力度から許容変形量を算出することで、最大変形量を定めている。一方、三次元解析においては、セグメントを線形等方性弾性モデル、地盤をモール・クーロン型の弾塑性モデルとしており、本線シールドトンネルの変形量を算出しており、構成則が異なる。そのため、それぞれ算出した解析結果の比較にあたっては、併設トンネルの影響の再現性という観点ではなく、解析結果の活用方法の観点で比較し、評価することとした。本研究においては、これまでに検討されていない、今後増加する可能性がある、併設トンネルの三次元離隔変化に着目しており、解析結果の活用の観点は、どの程度の変形を踏まえて施工計画を立案するかという近接影響に対する、施工前の適切な事前検討方法を確立につながると考えた。

まず、馬場出入口工事にて用いられた近接部の二次元はりばね解析による影響評価検討手法については、5.1にて示すように、本線トンネル通過時および通過後の計測結果に対し、過大であった。一方、三次元解析結果は計測結果と比較すると傾向が近似しており、各計測点における総合的な最大変位量も近い結果となっている。

ここで、実際に施工前の検討手法として考えた場合、最も効果的かつ効率的な事前対策を講じるためには、計測結果に近似する検討手法が最適であると考えられる。そのため、計測結果に近似している三次元解析結果を用いて事前対策を実施することが考えられるが、本研究の場合、三次元の解析における最大変位量の結果は、計測結果の最大変位量より小さい値となっている。そのため、三次元解析の結果を最大変位量として想定した場合、三次元解析結果と計測結果の間で本線トンネルへの影響が必ずしもないとは限らないため、計測結果より大きな値を算出することが望ましいと考える。一方、二次元はりばね解析は、計測値より十分に大きい値を示しているため、安全側の結果であることがわかる。また、実際の現場において使用する際には、設計では二次元はりばね解析にて検討し、その後設計検討の照査として、三次元解析を行うことで、二次元はりばね解析結果を確認し、より信頼性の高い検討結果となる。

以上から、工事施工前の検討は、A ランプシールド掘進の影響をはりとばねで表現し、適切に設定することで、特に新設シールド通過後の既設トンネルの変形評価については、安全率を有した評価法と判断できる。

## 5.3 併設トンネルにおける離隔距離に着目した影響評価

第2章で述べたように、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FEM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5.3-1、図5.3-2、図5.3-3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を赤線、スプリングライン部での水平変位を青線で離隔に応じた変化にあわせて示し、計測点[2]、[3]における実測値を変位の線の色と同色でプロットしている。また、計測点[2]および[3]の本線トンネルと馬場出入口トンネルの位置関係を図5.3-4に示す。

図5.3-1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4.2.2-3および図4.2.2-4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5.3-2は、図5.3-1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5.3-1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 5.3-1** 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 5.3-1**、**図 5.3-2** 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 5.3-3** 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 4.2.1-1**、**図 4.2.1-2** 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一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、はり一ばね解析の結果は、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、はり一ばね解析の結果は、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いたため、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いたため、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 5.3-3 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、この無次元量の関係図を管理図として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 5.3-3 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。

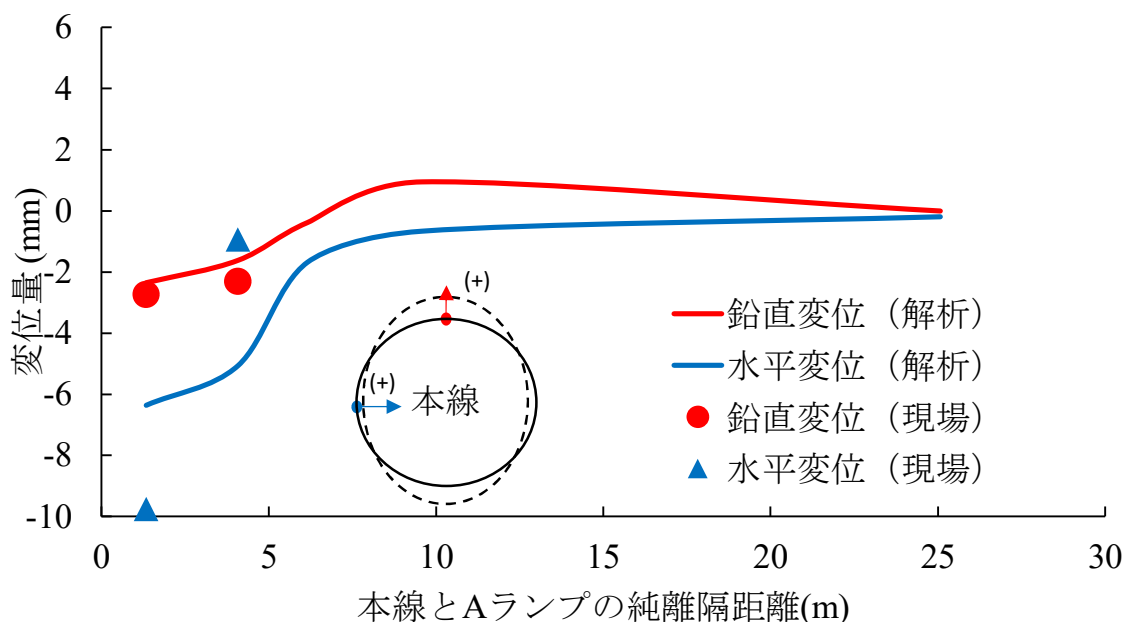


図 5.3-1 A ランプとの純離隔距離に応じた本線トンネルクラウン部、スプリングライン部の変位量の変化



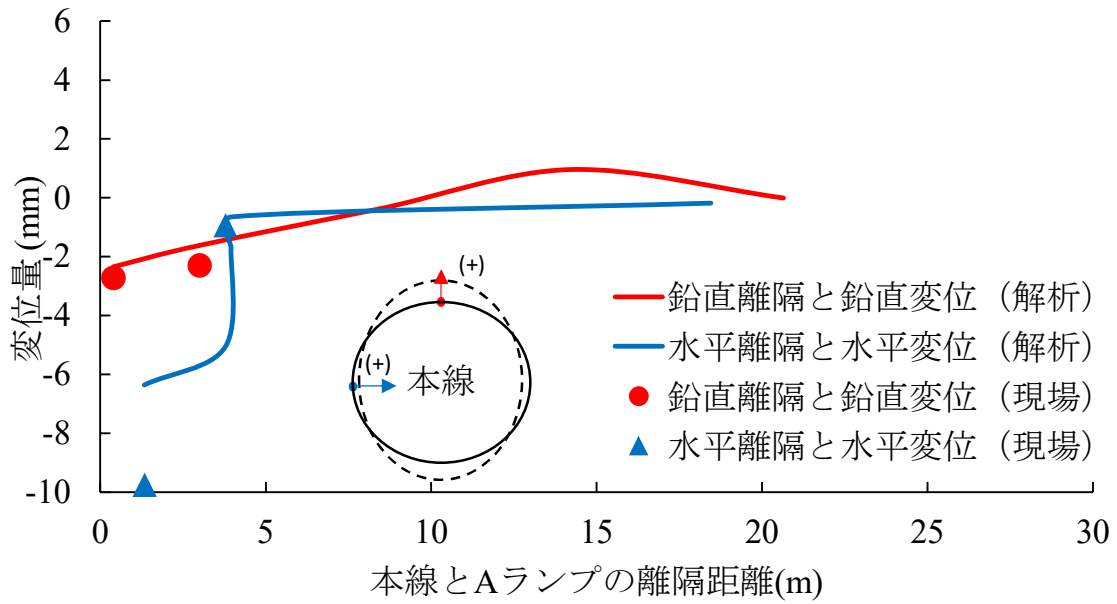


図 5.3-2 A ランプとの離隔距離に応じた本線トンネルクラウン部, スプリングライン部 の変位量の変化

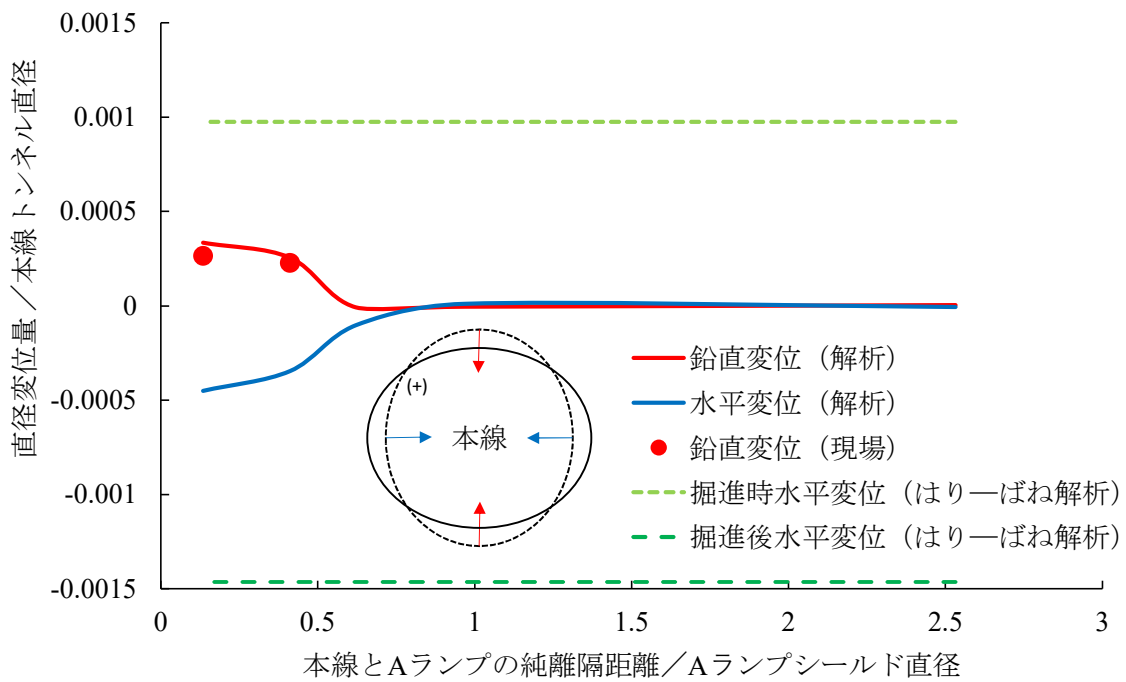


図 5.3-3 無次元化した A ランプとの純離隔距離に応じた本線トンネル直径変化率の変化

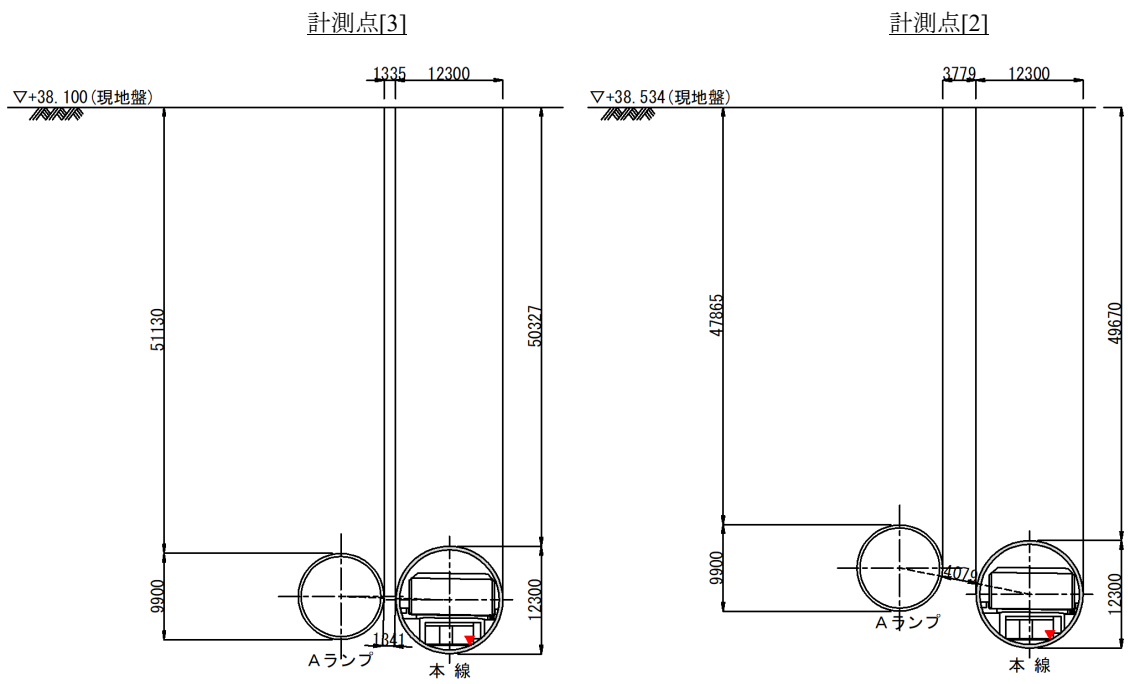


図 5.3-4 計測点[2]および[3]における本線と A ランプの位置関係

## 5.4 無次元量の関係図を用いた近接影響の評価

本研究の解析結果によって得られた内容から無次元化した関係図は、A ランプシールドの結果から算出した結果である。馬場出入口工事においては、前述したように A ランプシールドを掘進する前に、同様な急曲線および急勾配の線形を有した、本線トンネル近接する 3 本のシールドトンネルを掘削している。そこで、馬場出入口シールドトンネルにおける、B, C, D ランプシールドの計測結果と新たに考案した無次元量の関係図を比較することとした。比較した結果を図 5.4-1 に示す。なお、図 5.3-3 に示した結果を踏まえた比較とするため、水平変位は同様にここでは比較対象としない。

図 5.4-1 に示した比較結果は、鉛直変位を対象としてプロットした関係図である。インバート部の計測は A ランプシールドを除いて計測していないことに加え、インバート部の計測結果は、A ランプシールドにおいて約 0.5mm の変位であり、クラウン部の鉛直変位に対し微小であることから、B, C, D ランプシールドも同様に大きな変位が生じていないと仮定し、本線トンネルにおけるクラウン部の計測結果を用いて算出した。

比較の結果から、C および D ランプシールドの本線トンネルから離れた計測点のように、無次元量の関係図と近似している計測値もある。また、B および C ランプシールドの本線トンネルと近接した計測点のように、無次元化で示せていない、更に近接した箇所においては、直径変位量に本線トンネルの直径を除した値が大きくなり、その後の影響についても表現できていると考えられる。

一方、赤枠で示している計測値は、無次元化の結果から乖離していることがわかる。まず、B ランプシールドの値については、最大値が生じた時期が到達後約 2 週間経過観察をした際に計測した結果である。B ランプシールドは、4 つのランプシールドの中で最初の掘進であったため、実際の施工においては、特に慎重に掘削した。A, C, D ランプシールドは、示した 2 つの計測位置の通過に要した期間が約 1 週間であることに対し、B ランプシールドは約 3 週間要しており、最大値を示した時期は、計測点通過から約 1 ヶ月後の値である。そのため、掘削による地盤乱れによる影響が他のランプシールドよりも大きくなったことにより、大きな残留変位が生じたと考えられる。

次に D ランプシールドの最も本線トンネルに近い結果は、各計測点の中で最も小さい変位量を示している。ほぼ純離隔距離が同じとなる B ランプシールドと比較し、約 20%程度の変位に収まった結果となった。D ランプシールドは、B ランプシールドに続いて掘進したシールドトンネルであり、掘進においては B ランプシールドの掘進結果を踏まえ、本線トンネルの変状を抑制するために、A ランプシールドと同様に裏込め注入材の配合を早期強度発現型とし、到達壁に影響を確認した時点から掘進速度を微速にする対策を実施した。D ランプシールドは、全てのランプシールドの中で全体的に最も変位が小さかったランプシールドである。これは、各ランプシールドの離隔は異なるが、掘進管理によるものと考えら

れる。

A, C ランプシールドの到達部においては、平衡土圧を中心とした切羽土圧から到達部まで約 1m となった地点から 0.01MPa に切り替えている。しかし、D ランプシールドに限り、到達部から 5.6m の位置から切羽土圧を 0.01MPa に切り替えた。近接構造物が存在する中でのシールドトンネルの掘進管理は、適切な設定が困難であるが、到達部からの距離を踏まえた設定により小さい変位量となったと考えられる。

以上の結果より、実際の施工状況によって差異は生じるが、本研究にて新たに示した併設トンネルの直径および純離隔距離と直径変位量による無次元量の関係図は、妥当性であると判断できるため、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。

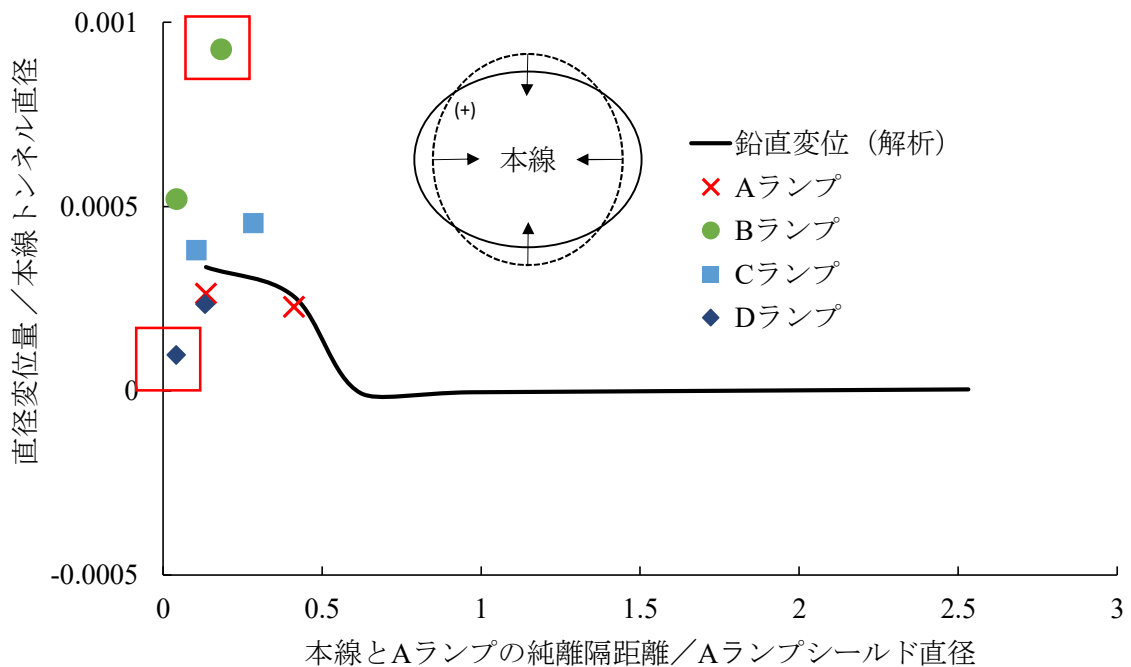


図 5.4-1 無次元量の関係図と施工結果の比較

## 5.5 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トンネルが、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既設シールドトンネルに対する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。しかしながら、本研究のギャップ要素を用いた解析は、複雑な併設トンネルの影響を模擬したものであり、地盤内の状況によって挙動が変化する可能性があることから、適用については、異なる地盤特性を用いた解析結果を比較したうえで改めて評価するなど、精査する必要がある。

導入したギャップ要素は、更に改良を施すことで精度が向上すると考えられるが、その解析結果を図5.3-3に示した無次元量の関係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。無次元量の関係図は事前検討の使用において簡便であることから、一般的な線形等の計画段階においても活用が見込めるため、適用範囲の拡大と正確性の向上は、今後の検討手法として活用が大いに期待できる。

その他、実際の施工においても、新設するシールドトンネルの掘進の影響を適切に検討することは、既設の近接構造物に対する正確な影響を把握するだけでなく、新設するシールドトンネルの掘進計画にも反映することで、例えば適正な掘進速度で掘進することを可能とし、施工期間の短縮に寄与することも期待できる。

## 第6章 結論

本研究では、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。また、施工前に実施した二次元はり一ばねモデルを用いた解析と新設シールドトンネルの掘進による影響を再現した三次元FEM解析結果と計測結果との比較を踏まえて現場施工前の有効な影響検討手法について検討した。

最後に本研究によって得られた知見を以下のとおりまとめ、全体の総括とする。

- 1) 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への影響は、二次元のはり一ばねモデルを用いた解析によって、既設シールドトンネルの最大変形量を算出し、その結果を掘進管理に反映することで、安全に施工することができる。
- 2) 三次元FEM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。
- 3) 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
- 4) 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。
- 5) 新設シールドトンネルの掘進による荷重の影響は、既設シールドトンネルに対して近接する前から影響があると考えられることから、二次元のはり一ばねモデルを用いた解析においても影響を確認した。しかし、実際の新設シールドの掘進による影響は、新設するトンネルが近接するまでほぼ影響はなく、三次元解析においても実施工結果と同様に、併設する既設トンネルへの影響がないことを確認した。
- 6) ここで用いられた近接部の二次元はり一ばね解析による影響評価検討手法については、新設シールドトンネルの掘進による、近接時の変位については過大である。しかし、新設シールド通過後の既設トンネルの変形評価については適正な安全率を有した評価法と判断で

きる。

- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 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。

本研究で得られた知見は、三次元的に離隔が変化する併設シールドトンネルにおける、事前検討の影響評価に際して参考になると考える。また、本研究ではギャップ要素を用いた三次元 FEM 解析を用いて、離隔距離とトンネルの直径変化率を用いた無次元量の関係図を提案したことにより、定量的な評価ができることは、今後都市内で増えると想定される同様の条件下における検討において、有用になると考えられる。

しかしながら、様々な事例における適用や簡便で適切な検討を可能とするためには、新たに実施した三次元 FEM 解析について、導入したギャップ要素に改良を加え、更に無次元量の関係図に反映し、更新する必要がある。

具体的には、ギャップ要素で表現した急曲線および急勾配の影響は、地盤内で生じていると考えられる。急曲線による水平方向の余掘りと急勾配による鉛直方向の余掘りに対する土圧の影響に対する再現できていない。水平方向と鉛直方向の掘進による土圧の影響は異なり、特に軟弱な地盤においては、影響が顕著に生じる可能性があるため、水平方向と鉛直方向の土圧をそれぞれ表現できる改良が必要であると考えられる。

また、都市内の地盤においては、地下構造物を構築する際に生じている地盤内の乱れや地質構成、地下水の流れ等が特殊な場合もあることから、適用における留意事項も整理する必要がある。

例えば、本研究の背景にて述べた日本橋では、地下化の検討における既存の地質調査結果の確認において、調査箇所が近傍しているにも関わらず、軟弱層が一部存在していることを確認した。地質調査を実施する箇所が限られている都市内においては、実際の地盤と設計上想定した地盤が異なることが想定される。

また、地盤特性の他にも一般化するにあたり、地下化が進んでいる都市内においては、併設トンネルの位置関係が複雑であることから、どのような位置関係によって併設するかに着目する必要がある。既設シールドトンネルに対し、上下および左右で併設する位置関係によって変位量が変わる可能性があるため、三次元 FEM 解析や無次元量の関係図は安全側

に評価する配慮が必要と考えられる。

本研究で実施したギャップ要素を用いた三次元 FEM 解析や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を確認できる無次元量の関係図は、特殊な事例を含めた様々な事例を収集し、計測結果を用いて上述した内容等を改良していくことで、適用範囲の確立、安全性への配慮を含めた精度の向上等が臨めるが、現状入手可能な施工事例の結果が少ないことから、具体的な反映手法も含め、今後の研究課題とする。



## 謝 辞

本研究は早稲田大学理工学術院赤木寛一教授のご指導のもと、首都高速道路の馬場出入口工事を対象とした三次元 FEM 解析結果をもとに研究結果をまとめたものです。論文の作成にあたって、赤木寛一教授には長期間、論文に対するご助言など全てにわたり丁寧なご指導を頂いたことを心より深く感謝いたします。また、本研究を取りまとめるにあたり、ご指導とご助言を賜った早稲田大学理工学術院小峯秀雄教授、早稲田大学理工学術院岩波基教授に心から感謝いたします。

本研究は、2017 年 8 月から開始し、博士論文を脱稿するまで約 5 年の歳月を要し、論文として取りまとめるための研究開始のご助言から脱稿までの期間、技術センターの土橋副理事長には多くのご指導やご助言をいただきましたことを衷心より感謝申し上げます。

本研究に用いた三次元 FEM 解析は、試行錯誤を繰り返し、何度も計算した賜物であり、株式会社大林組の Alireza AFSHANI 氏、元早稲田大学修士学生の Grant Hasan 氏に御礼申し上げます。

本研究の対象工事である馬場出入口工事は、著者が 2013 年 7 月から 2016 年 6 月まで従事し、工事監督、工程および施工管理をしていました。工事受注者であった清水 JV の元監理技術者の相川潤一氏、元監理技術者谷口禎弘氏、元監理技術者小川卓氏、元監理技術者杉本高氏、元工事長西丸和範氏、元工事長磯部哲氏には、本研究に使用したデータの提供以外にも、初めてシールドトンネルの工事監督に携わった著者に当時施工内容を一つひとつ丁寧にご説明いただき、急曲線および急勾配の線形を有しつつ、既設シールドトンネルへ近接する、類を見ないシールドトンネル工事を安全に完工した皆様に感謝申し上げるとともに、一緒に仕事が出来ましたことを誇りに思います。また、設計における考え方のご助言をいただいた小野塚直紘氏に御礼申し上げます。

本研究は前述の方々、また紙面の都合で記述することが出来なかった多くの方々の長年に渡るご指導、ご助言、ご協力がなければ完成するものではありませんでした。ここに改めて深甚なる感謝の意を表する次第です。

最後に、あたたかい励ましをいつも送り、支え続けてくれた家族に心から感謝します。

# 参考文献

## 【第1章】

- 1) 譽田孝宏, 粥川幸司, 杉本光隆, 中村益美, 岡田章: 急曲線シールド掘進に伴うトンネル覆工挙動の現場計測, トンネル工学報告集, 第15巻, pp. 367-354, 2005.
- 2) 岡田久延, 岸孝雄, 吉田良三, 藤塚豊裕: 大深度、急曲線、急勾配シールドの施工, トンネル工学研究論文・報告書, 第6巻, pp. 393-398, 1996.
- 3) 小宮一仁, 赤木寛一: 有限要素法によるシールドトンネルの掘削のシミュレーションと地盤挙動解析, 第5回計算力学シンポジウム報文集, 日本科学技術連盟, pp.243-248, 1991.
- 4) 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. 51-56, 2001.
- 5) 吉野修, 小宮一仁: 3次元土～水連成有限要素法によるシールド掘進解析, トンネル工学研究論文・報告集, 第11巻, pp. 59-68, 1993.
- 6) 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.
- 7) 佐藤有美, アピチャート・サラムーン, 杉本光隆: シールド機動力学モデルに基づく裏込注入のシールド機挙動に与える影響評価, トンネル工学研究論文・論文集, 第11巻, pp. 38-42, 2001.
- 8) 宮川房夫, 久保康文, 水谷進, 吉村和彦, 粥川幸司: 泥水式シールド超近接施工の掘進過程を考慮した3次元FEM解析, トンネル工学研究発表会論文・論文集, 第4巻, pp. 63-70, 1994.
- 9) 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.
- 10) 吉田保, 田中弘, 草深守人, 武田洋: 接触問題として扱ったシールド掘進時の地盤変状解析, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第4巻, pp. 71-78, 1994
- 11) 黒川信子, 草深守人, 田中弘, 吉田保: シールド掘進中の負荷土圧に伴う近接構造物への影響検討解析手法, トンネル工学研究論文・報告書, 第6巻, pp. 321-326, 1996
- 12) 武田洋, 草深守人, 吉田保, 田中弘, 黒川信子: 有限要素法による接触問題の数値解析法とシールドトンネルへの適用, 土木学会論文集, No. 603/III-44, pp. 1-10, 1998.
- 13) 矢萩秀一, 荻野竹敏, 沼澤憲二郎, 深井直光, 斉藤正幸: シールドトンネルの施工時荷重の影響に関する現場計測結果と考察, トンネル工学論文集, 第17巻, pp. 63-74, 2007.
- 14) 石村利明, 森本智, 角湯克典: 三次元シェルモデルを用いた施工時荷重の影響に関する一考察, 土木学会年次学術講演会公演概要集, 第3部, pp. 327-328, 2012.

- 15) 長屋淳一, 橋本正, 小山幸則, 建山和由, 塚田泰博: 施工時荷重によるシールドトンネル覆工の挙動事例とその解析方法の提案, 土木学会論文集 F1, Vol. 71, No. 3, pp. 94-111, 2015.
- 16) 木股浩孝, 仲山貴司, 津野究, 粥川幸司, 小西真治: シールドテールとセグメントの接触を考慮した施工時荷重の解析的検討, 土木学会論文集 F1, Vol. 69, No. 1, pp. 73-88, 2013.
- 17) 土橋浩, 桑野玲子: 三次元 FEM 解析による大深度シールドトンネル拡幅工法の作用の評価に関する研究, 生産研究, 第 67 巻 4 号, pp.233-234, 2015.
- 18) 橋本定雄: 軟弱地盤における上下隣接シールド施工の実測と計測結果について, 土木学会論文集, 第 352 号/III-2, pp. 1-21, 1984.
- 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. 65-66, 2016.
- 20) 小泉淳, 村上博智, 西野健三: シールドトンネルの軸方向特性のモデル化, 土木学会論文集, 第 394 号/III-9, pp. 79-88, 1988.
- 21) 木村定雄, 矢田敬, 小泉淳: 併設して施工されるシールドトンネルの影響解析, トンネル工学研究発表会論文・論文集, 第 1 巻, pp. 89-94, 1991.
- 22) 木村定雄, 山下雄一, 清水幸範, 小泉淳: 併設シールドトンネルの影響評価について, トンネル工学研究論文・報告書, 第 6 巻, pp. 327-332, 1996.
- 23) 堀地紀行, 平嶋政治, 松下芳亮, 石井恒生: 軟弱粘性土地盤における併設シールドトンネルの現場計測とセグメントリングの疑似三次元構造解析モデル, 土木学会論文集, No. 418/III-13, pp. 201-210, 1990.
- 24) 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.
- 25) 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. 90-101, 2016.
- 26) 松本嘉司, 小山幸則, 清水満, 小林宏基: 併設シールドが先行トンネル断面力に及ぼす長期的影響の検討, トンネル工学研究発表会論文・報告書, 第 4 巻, pp. 211-216, 1994.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) 山口巖, 山崎糸治, 福島健一, 小林隆, 杉嶋敏夫: 併設シールドの影響予測解析と実際の挙動, トンネル工学研究発表会論文・報告書, 第 5 巻, pp. 39-46, 1995.
- 30) 山口巖, 山崎糸治, 小林隆, 松下惇次, 杉嶋敏夫: 4 本併設シールドの地盤-トンネル挙動分析と併設シールドの設計・施工への応用に関する研究, 土木学会論文集, No. 561/III-38, pp. 47-62, 1997.
- 31) 舟橋秀磨, 大繩泰平, 木村定雄, 小泉淳: 併設シールドトンネルの影響評価について (そ

- の 1) -先行トンネルに作用する荷重の評価方法について-, 土木学会年次学術講演会公演概要集, III-636, pp. 1272-1273, 1995.
- 32) 小笠原政文, 佐々木一哉, 藤井義文, 真川三雄: 超近接シールドの作用土圧に関する遠心力実験 (その 1) 砂質地盤中の水平に隣接する円形セグメント, 土木学会年次学術講演会公演概要集, III-B162, pp. 324-325, 1996.
  - 33) 小笠原政文, 佐々木一哉, 藤井義文, 畑中善徳, 近信明: 超近接シールドの作用土圧に関する遠心力実験 (その 2) 砂質地盤中の水平に隣接する円形セグメント, 土木学会年次学術講演会公演概要集, III-B163, pp. 326-327, 1996.
  - 34) 小笠原政文, 津野和宏, 藤井義文, 畑中善徳, 野村成樹: 超近接シールドの作用土圧に関する遠心力実験 (その 3) 砂質地盤中の水平に隣接する円形セグメント, 土木学会年次学術講演会公演概要集, III-B102, pp. 204-205, 1997.
  - 35) 小笠原政文, 津野和宏, 藤井義文, 平井卓, 畑中善徳: 粘性土における併設シールドトンネルの作用土圧に関する研究, トンネル工学研究論文・報告集, 第 7 巻, pp. 47-54, 1997.
  - 36) 岩田敏和, 中井照夫, ホサインシャヒン, 菊本統, 石井健嗣: 新しい双設トンネル掘削実験とその解析, 土木学会論文集, Vol67, No.3, pp. I-33- I-44, 2001.
  - 37) 深山大介, 石橋正博, 島越貴之: 首都高中央環状線五反田出入口トンネル構造の概要, 地下空間シンポジウム論文・報告集 21, pp. 91-98, 2016.
  - 38) 安井雅士, 遠藤啓一郎, 住野英明, 半田陽介: 並走するシールドトンネルを非開削で一本化: 大橋連結路, 建設機械施工, vol.65, No.10, pp. 66-70, 2013.
  - 39) 鈴木康洋, 佐々木順一, 越田健: 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, 2014 May, Vol.54, No.8, pp.16-19, 2013.
  - 40) 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. 24, 2016.
  - 41) 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. 25, 2016.

## 【第 2 章】

- 1) 地盤工学会: 地盤工学・実務シリーズ 28 近接施工, pp. 1, 2011.
- 2) 日本国有鉄道: 近接橋台橋脚の設計施工指針 (案), 1973.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 地盤工学会: 地盤工学・実務シリーズ 28 近接施工, pp. 5-8, 2011.
- 6) 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.
- 7) 石原陽介, 角田浩, 小西由人: 泥水圧式シールド通過に伴う地下鉄躯体への影響, 土木学会年次学術講演会公演概要集, 第 6 部, pp. 97-98, 2004.

- 8) 石田高啓, 斉藤亮, 守田貴裕: 超近接して施工する 4 シールドトンネルの併設の影響, 土木学会年次学術講演会公演概要集, 第 3 部, pp. 835-836, 2009.
- 9) 小峰隆幸, 助川博之, 綿引秀夫: 近接施工における既設構造物の挙動について, トンネル工学研究論文・報告集, 第 7 巻, pp. 389-394, 1997.
- 10) 角田浩, 森健太郎, 川口博行, 小川卓, 久原高志: 三次元沈下曲面を用いたシールド掘進に伴う近接構造物の沈下量予測方法, トンネル工学論文集, 第 14 巻, pp. 132-137, 2004.
- 11) 中村信義, 川村努, 泊弘貞, 村上博智: 近接施工の影響を受けるシールドトンネルの検討手法の提案とその適用例, 土木学会論文集, No. 686/VI-52, pp. 66-77, 2001.
- 12) (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.
- 13) 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.
- 14) 田嶋仁志, 岸田政彦, 川田成彦, 小林靖典, 斉藤正幸: 併設シールドトンネルの影響評価方法に関する検討, トンネル工学研究・報告集, 第 13 巻, pp. 407-412, 2003.
- 15) 中山隆, 中村信義, 中島信: 泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について, 土木学会論文集, No. 397/VI-9, pp. 133-141, 1988.
- 16) 藤木育雄, 横田三則, 米嶋賢二, 村田基代彦: 軟弱地盤でのシールドトンネル掘進に伴う周辺地盤の変形について, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第 1 巻, pp. 83-88, 1991.
- 17) 猪熊明, 田子島充: シールドトンネル弾性有限要素解析の入力設定に関する研究, トンネル工学研究論文・報告集, 第 9 巻, pp. 249-252, 1999.
- 18) 藤井郁男, 真下英人, 石村利明, 真弓英大: シールド掘削における地盤変状予測, トンネル工学研究論文・報告集第 9 巻, pp. 243-248, 1999.
- 19) 市田雄行, 小原伸高: トンネルの 2 次元掘削解析における応力開放率に関する一考察, トンネル工学報告集, 第 25 巻, I-31, pp. 1-8, 2015.

### 【第 3 章】

- 1) 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. 55, 2016.
- 2) 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. 2-62, 2018.
- 3) 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. 97, 2016.
- 4) 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. 2-19, 2018.
- 5) 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. 2-24, 2018.
- 6) 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. 56, 2016.

### 【第 4 章】

- 1) 地盤工学会: 地盤工学・実務シリーズ 3 シールド工法の調査・設計から施工まで, pp. 283, 1997.

- 2) MIDAS IT Japan Co., Ltd.: 64 ビット基盤地盤分野汎用解析システム, Midas GTS NX, 2018.
- 3) 地盤工学会:地盤技術者のためのFEMシリーズ② 有限要素法をわかる, pp. 34-43, 2020.
- 4) 寺山徹, 山本泰幹, 今田徹: シールドトンネルランプ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.
- 5) 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. 62, 2006.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 初谷樹弥, 鈴木誠, 杉山博一, 中井照夫: 三次元有限要素法を用いたシールドトンネルの施工解析検討, 土木学会年次学術講演会公演概要集, III-361, 2020.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) Ingles, O. G. and Metcalf, J. B.: *Soil Stabilization: Principles and Practice*, 1972.
- 14) 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.
- 15) 松月基将, 水野明哲, 柳寛孝: 山手トンネルの温度上昇の原因と対策について, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集, No. 16-1, 2016.

## 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，朴仁渉，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