

# 上下併設の大断面シールドが既設トンネルに与える影響

奥 要治<sup>1</sup>・土橋 浩<sup>2</sup>・堀地 紀行<sup>3</sup>・長屋 淳一<sup>4</sup>・張 升翼<sup>5</sup>・小泉 淳<sup>6</sup>

<sup>1</sup>非会員 サンワコムシス(株) (〒166-0003 東京都杉並区高円寺南2-12-34)

E-mail: famioku2013@dream.bbexite.jp

<sup>2</sup>フェロー (一財)首都高速道路技術センター (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-10-11 虎ノ門PFビル)

E-mail: dobashi@tecmex.or.jp

<sup>3</sup>正会員 国土館大学教授 (〒154-8515 世田谷区世田谷4-28-1)

E-mail: horichinoriyuki@gmail.com (Corresponding Author)

<sup>4</sup>正会員 (株)地域地盤環境研究所 (〒540-0008 大阪市中央区大手前2-1-2 国民会館住友生命ビル4F)

E-mail: nagaya@geor.co.jp

<sup>5</sup>正会員 環境工学(株) (〒190-0022 東京都立川市錦町2-6-5 立川三恵ビル4F)

E-mail: Sijang@hotmail.com

<sup>6</sup>正会員 (株)地下構造技術(早稲田大学名誉教授) (〒120-0046 東京都足立区小台1-8-2)

E-mail: koizumi@waseda.jp

地下約40mの硬質地盤中に建設された外径約3.2mの既設シールドトンネルに、新たに外径約13.1mの2本の大断面シールドが上下に併設して近接施工された。光ファイバー方式で計測された既設トンネルの内空変位とFEM解析の結果を比較し、既設トンネルに与える近接の上下併設シールド施工の影響を考察した。また、シールド重量を考慮した一連の施工時荷重を、2次元弾性FEMに逐次入力し検証した結果、既設トンネルの内空変位の計測結果と解析結果は良好な整合性を示した。本研究では、計測結果から得られた知見について述べ、併せてシールド重量を考慮した上下併設シールド施工時の影響予測解析手法を提示した。

**Key Words:** twin large nearby shield tunneling, monitoring an existing tunnel, BOTDR (fiber optics), elastic 2D-FEM, considering the weight of shield boring machine

## 1. 序論

### (1) はじめに

大都市の地下空間では、地下鉄、通信、上下水道、電力、ガスなどの社会基盤施設が輻輳し、中心部ではこうした施設が幾重にも交差、並行し、高密度に集積している。近年、これらの施設に道路トンネルも加わり、地下インフラは一層過密化を呈している。こうした状況のなか、2車線を有する高速道路の大断面シールドトンネルが2本、用地の占用幅の制約から上下に併設して施工された。この上下併設トンネルの間に既設の通信用シールドトンネルが近接して位置することとなり、施工時の影響が懸念された。このため、施工時の安全性等を確認する目的で、通信用トンネル坑内で内空変位計測が実施された。本研究では、計測結果から得られた既設トンネルに及ぼす影響について知見を述べるとともに、計測結果の検証を目的にFEM解析を行い、計測結果と解析結果を比較検討し、考察を加えた。

### (2) 本研究の位置付けと内容及び構成

シールドの近接施工に関する研究は、従前より多くの論文が発表され、橋本の上下隣接シールド施工の研究<sup>1)</sup>

はその嚆矢として知られる。その後も上下および左右併設など数多くの計測結果が報告<sup>2),3)</sup>され、さらに、上下と左右の計4本のシールド施工<sup>4)</sup>の実績などもあり、現在、併設シールドの施工技術は、ほぼ完成の域に達したと評価されている。ここで上下併設施工に関する知見を土木学会のトンネル標準示方書[シールド工法]・同解説(以下、「シールド示方書」という)から整理すると、後続シールドを下に施工する場合、上段のトンネルには後続シールドの掘削による地盤の隆起や緩みによる鉛直荷重の増加や不同沈下が発生し、上段トンネルは影響を受けることが指摘されている<sup>1),2)</sup>。一方、後続シールドを上に施工する場合、下段のトンネルが上段の後続シールドから受ける影響は、比較的小さいとの知見<sup>2)</sup>が示されている。こうした理由から、上下併設シールドの施工では、下段シールドを先行し、上段シールドを後続させる施工が一般的とされている。

次に、シールド施工の解析的な研究について概要を述べる。シールドの掘削にともなう周辺地盤や既設トンネルへの影響を評価する方法として、地盤を平面ひずみ要素とし、覆工をはり要素でモデル化し、施工ステップを考慮したFEMによる解析等によって評価する場合が多い<sup>2)</sup>。さらに施工時の偏圧を評価した解析的研

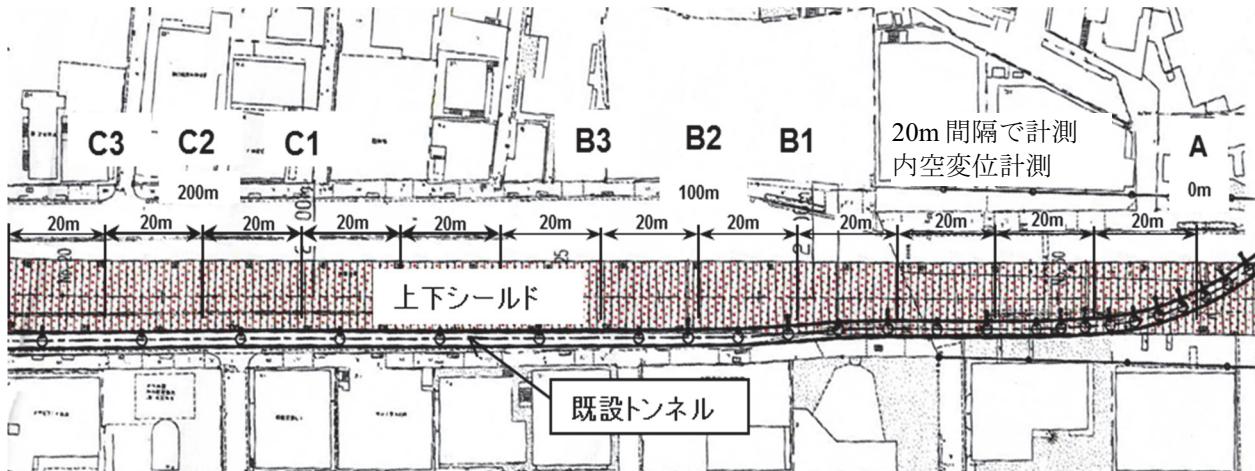


図-1 既設トンネル内空変位計測の位置平面図

究<sup>5),6)</sup>や、3次元挙動の評価に低減係数を導入し、2次元FEM解析で併設トンネルの挙動を高精度に解析した事例<sup>7)</sup>も示されている。またシールド周辺地盤の変位を解析的に求め、FEM解析モデルにその値を入力する方法<sup>8)</sup>も提案されている。

研究対象の既設トンネルは、大断面シールドの掘進の影響を、近接して上下から併せて受ける数少ない事例と言える。しかし、上下いずれかの大断面シールドの掘進の影響を受ける場合を例とすると、すでに多例が散見され、今後も一定程度が想定される。本事例の既設トンネルは、上下併設シールドトンネルの知見<sup>1),2)</sup>によれば、はじめに影響が大きいとされる下段シールドの掘進の影響を受け、次に施工の影響が軽微とされる上段シールドの掘進の影響を受けた。しかし上段トンネルと既設トンネルの離隔が、下段トンネルとの離隔に比べて数倍大きいにもかかわらず、既設トンネルで計測された内空変位は、上段シールドの影響と考えられる内空変位が、下段シールドの影響と考えられる内空変位を上回った。2章と3章では計測の概要とその結果について論述する。また、2006年版シールド示方書では、「FEM解析が示すところによると後続トンネルが上方にある一般的な場合では、先行トンネルに対する除荷の傾向を示している。これらは硬質地盤での現場計測で土圧や覆工断面力に関し定量的に整合した報告もある<sup>9)</sup>」と記述されている。しかし、本研究の計測結果では、このような記述内容とは異なることから、新たな施工時荷重の検討が必要と考えた。4章では、計測結果の検証を目的に、シールド施工時の荷重として一般的とされる切羽圧、シールドテール部の応力解放、裏込め注入圧といった一連の荷重に加え、新たにシールド本体の重量を荷重として評価して、2次元弾性FEM解析を実施した。これによると、既設トンネルの内空変位の解析結果は、計測結果と良好な整合性を示した。

こうしたことから、上下併設シールドトンネル施工時の評価手法として、シールド重量を具体的に評価、適用したFEM解析手法を提示した。

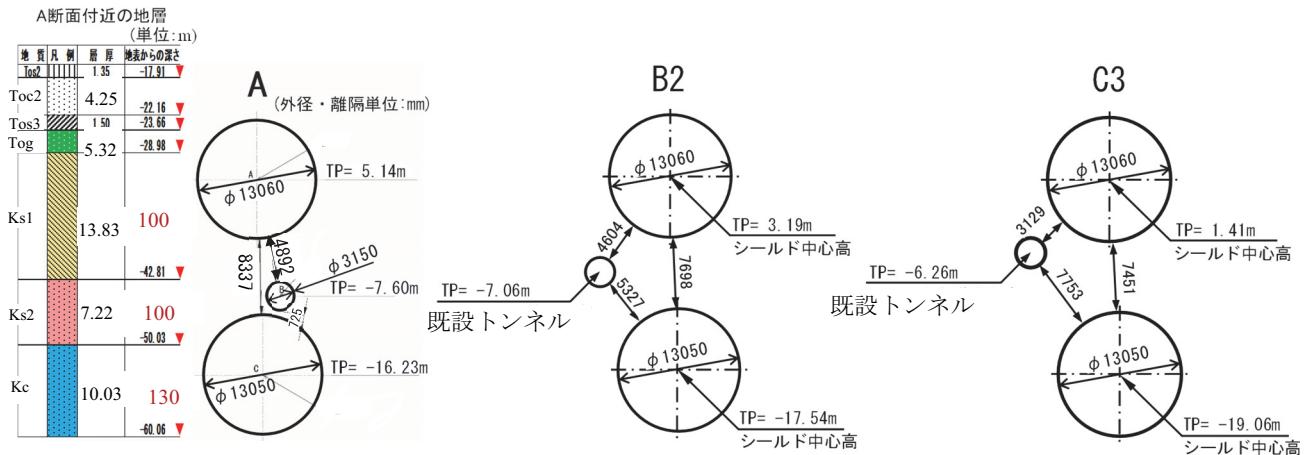
## 2. 現場計測

### (1) 計測現場の概況

計測は、2本の大断面シールドに上下から挟まれる状況となる既設の通信用シールドトンネル内で実施された。影響が最も懸念された主計測断面のA断面では、離隔はともに $0.5D_0$  ( $D_0$ : 上・下段のシールドの外径は約13.1m) の近接施工の範囲内となり、上段シールドから約4.9m、下段シールドから約0.7mの離間距離である。上下2本のトンネルは、ともに泥水式シールド工法で掘削され、シールド外径の詳細は下段が13.05m、上段が13.06mで、シールドの総重量はともに20,580kN (2100tf) を超える。また、セグメント幅は、下段のトンネルで1.2mと1.5mが採用され、上段トンネルは1.2mである。計測現場と計測位置の平面図を図-1に示す。主計測断面Aと補完計測断面B<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>の横断面図およびA断面付近の地質柱状図を図-2に示す。

### (2) 計測方法

既設トンネルの内空変位計測にはBOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) と呼ばれるレーザー光を用いた計測手法を採用了。レーザー光を光ファイバーケーブルに透過させると、レーザー光は、ブリルアン (Brillouin) 散乱光を含む空間散乱光として反射する。光ファイバーケーブルにひずみが発生すると、ひずみの大きさに比例して、ブリルアン散乱光の波長が変化する。その特性を利用して、ひずみが読み取られる。また、この散乱光のサンプリングと同時に、入射光との時間差を測定して位置を検知する。この技術は、OTDR



地質柱状図は A 断面の状況のみを示す。赤の数字は N 値

図-2 既設トンネルと上下シールドの位置関係

(Optical Time Domain Reflectometry: 光学的時差反射法)と呼ばれ、これによりひずみの発生位置を検知する。光ファイバーケーブル内のひずみの測定と、ひずみ発生位置の検知を融合させた技術が BOTDR で、すでに多くのトンネル計測で実績<sup>10)-12)</sup>を有する。この方法では、光ファイバーケーブルを、構造物に所定の間隔で固定治具を用い、定着させて敷設する。ケーブルに適度な張力を導入することで、一定の圧縮ひずみも測定が可能となる。荷重変化などで構造物に変位が発生し、固定治具間が伸縮すると、それに呼応して光ファイバーケーブルも伸縮するため、ひずみと発生位置の測定が可能となる。BOTDR の最小測定ゲージ長 (G.L.) は 1 m 以上<sup>13)</sup>とされ、計測されたひずみに対して、 $\pm 20 \mu$  ( $2 \times 10^{-5}$ )<sup>14)</sup>程度の測定値の幅を有する。BOTDR に用いられるレーザー光は民生用の光通信回線に使用される伝送損失の少ない波長 1,550 nm (nano;  $10^{-9}$ ) 帯と同じレーザー光が一般的に用いられる（例えば<sup>15)</sup>）。ひずみデータの採取に際し、このレーザー光を照射するが、レーザースペクトルの特性から、波長は 1,550 nm を中心に数 nm 程度のスペクトル幅を有する（例えば<sup>16)</sup>）。ひずみデータを運ぶブリルアン散乱光の波長も同様にスペクトル幅を有し、反射光の波長を読み取るアナライザーも分解能という幅を持つことから、BOTDR で計測されたひずみは、真値に対し測定値の幅（約  $\pm 20 \mu$ ）を有する。本計測事例では、内径約 2.80 m（外径約 3.2 m）の既設トンネルで、治具を除いたケーブル長約 2.60 m のトンネル内空変位の計測値には、レーザー光のスペクトル幅や計測器の分解能などによる  $\pm 0.05$  mm 程度の測定値の幅（誤差）が確率論的に含まれる可能性がある。こうした理由で、本報告で計測変位の読み値は 0.1 mm 単位で（小数点第 2 位四捨五入）で表記した。

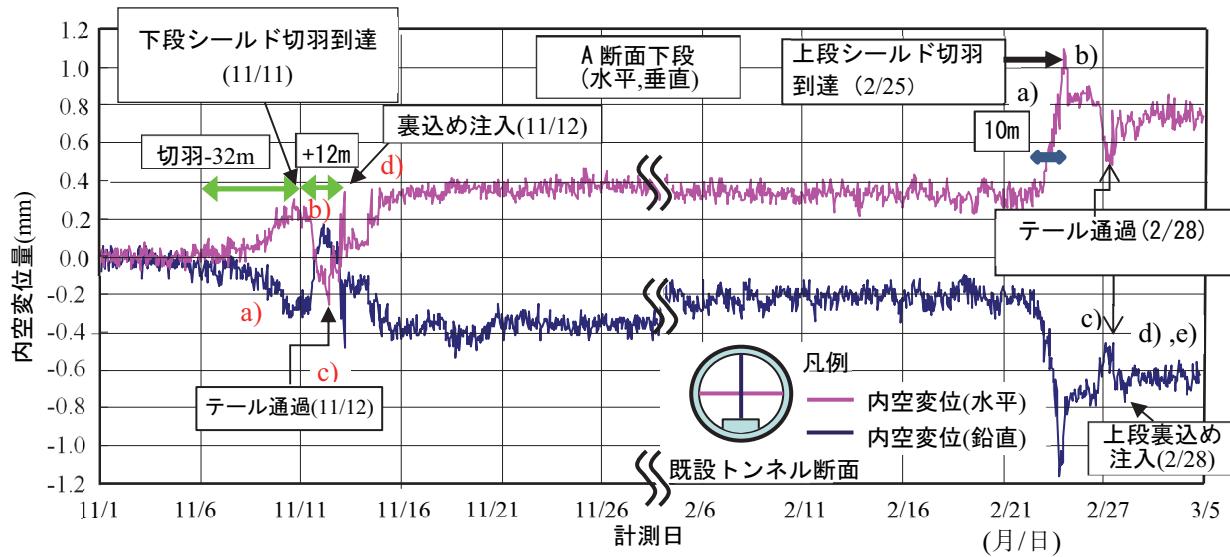
### （3）計測断面

既設トンネルの内空変位の計測は、図-1 に示すように A 断面を起点に 20 m 間隔の 14 断面（図中は 13 断面を表示）で実施された。また図-2 として計測始点から 100 m の中間点 B<sub>2</sub> 断面と、終端付近の C<sub>3</sub> 断面も主計測断面の A 断面に加え、報告する。なお B 区間、C 区間は掘進日報等を保有していないため、切羽位置は概略の位置の把握に留まる。また計測断面に沿った地質縦断図は保有していない。主計測の A 断面は、ほぼ直上 4.9 m と、直下 0.7 m の離隔距離で 2 本の大断面シールドが施工された。この区間は、シールド掘削の影響を大きく受けると想定されたため、主計測断面として、鉛直と水平の 2 方向の内空変位を測定した。この A 断面ではシールドの掘進時の施工データを反映した FEM による検証解析を行った。補完計測断面の B 断面と C 断面は、トンネル縦断方向には新設の 2 本のシールドトンネルと並行する位置関係にあり、横断面的には、2 本のシールドトンネルに上下から斜めに挟まれる位置関係となっている（図-2 参照）。これらの断面の内空変位は、補完計測と位置づけ、光ファイバーケーブルの敷設において、足場を必要とせず、敷設が鉛直方向に比べて容易で低廉な水平方向のみとした。

## 3. 既設トンネルの内空変位計測の結果と考察

### （1）下段シールドによる A 断面の内空変位

図-3 に A 断面の内空変位の計測結果を示す。図中で赤色は水平方向の内空変位を、青色は鉛直方向の内空変位を示している。上下 2 本のシールドは、下段シールドが先行し、上段シールドが後続した。各施工段階における既設シールドの内空変位の変化を以下に示す。なお、変位の表記で + は伸張を意味し、- は収縮を意味する。内空変位のデータは 1 時間ごとに放射された



図中の a), b), c), d), e) は 3. (1), (2) の説明に対応。赤は下段、黒は上段シールド。

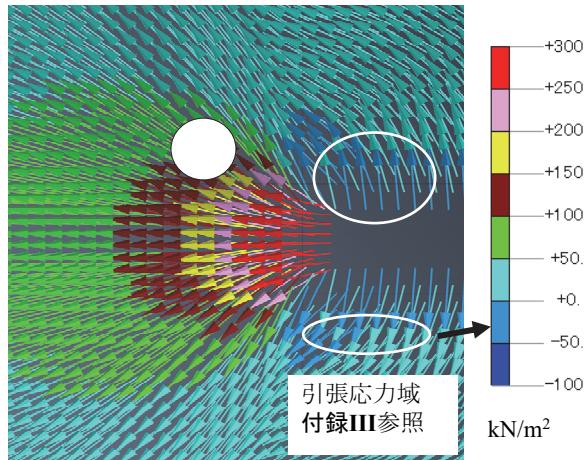
図-3 A 断面の内空変位計測結果

レーザー光により採取された。図-3の横軸の計測日は約13か月間が圧縮されて表記されている。このため、図中の個々の計測値は前後のデータと大変接近し、波動して見えるが、横軸を拡張すれば、明確な折れ線となる（付録I, IV 参照）。同時刻、同一箇所を対象とした測定の値に波動は無く、確定値として整理される。その確定値は2. (1)の説明のように、 $\pm 20\mu$ 程度の真値との幅（誤差）を確率的に有することになる。また測定値の温度補正は計測期間中、常に実施されていた。

#### a) 切羽接近から到達

掘進データから下段シールドの切羽が、A断面の約30m手前の位置に接近した時点から、既設トンネルの内空変位に変化が現れ、鉛直方向が減少し、水平方向が増加する、横長楕円の変形となった。こうした傾向は下段シールドの切羽がA断面に到達するまで継続し、切羽の到達時点で、初期の状態から鉛直方向は、-0.3mm水平方向は、+0.4mm変位した。考察を加えると、既設トンネルに与えた影響として、下段シールドの切羽面に対し、地山側から側方土圧と地下水圧が作用し、切羽側からは、泥水圧と、カッター圧に加え、スキンプレートに働く周面摩擦力を差し引いたシールドのジャッキ推力等が作用している。シールドの施工管理における泥水圧は、静止土圧と地下水圧に変動圧を加えた圧力として設定<sup>2)</sup>されるが、実際の施工では、こうした設定泥水圧に、ジャッキ圧の一部や切削時のカッター圧等の施工時荷重が作用する。これを考慮すると、シールド推進時における切羽前面の地山には、その深さにおける静止土圧と地下水圧の合計を上回る圧力が作用することも想定される。下段シールドがA断面の位置から、シールド外径の約2.5倍（約30m）ほど手前の位

置に達した付近から、下段シールドの切羽圧などの施工時荷重が、既設トンネル下部の周辺地山に付加的な応力を発生させた可能性が考えられる。その結果、既設トンネルが鉛直方向に圧縮され、断面は鉛直方向に収縮し、水平方向は相反的に伸張し、既設トンネルの断面が横長の楕円に変化したものと考えられる。水平方向の変位の理由として、既設トンネルが、2次覆工を有するシールドトンネルで、比較的剛な閉合された円環構造と評価でき、かつトンネル断面の周長変化も微小と考えられることから、鉛直方向の荷重による変位に対し、その直交方向に逆向きの変位を発生させる円環構造特有の挙動<sup>17)</sup>と理解できる。シールド掘削中の接近で、既設トンネルに内空変位が発生する状況を説明するために実施した簡易FEM解析から得られた、図-4は、地表面を自由境界面とした半無限弾性体に、地表からdの深さに荷重Pを水平方向に作用させたもので、トンネル掘削状況に近い弾性解析問題として知られる、Mindlinの第二解<sup>18)</sup>の境界条件を適用して、弾性FEM解析モデルに切羽圧を作用させて得たものである。解析の詳細を以下に記載する。施工対象である東京礫層や上総層など、硬質地盤をFEM解析する場合、微小変形の範囲で、地盤の変位を議論せず、切羽安定のための切羽圧による地盤内の応力増分とその方向を調べるに際し、地盤を弾性体と仮定することに疑義は殆ど無いと考える。図-4のFEM解析の要素数は9,500、弾性係数 $E_0 = 85,000 \text{ kN/m}^2$ （弾性係数は $E_0 = 2,800 \text{ N}$ 適用、N値30以上の硬質地盤と評価）、切羽圧:  $410 \text{ kN/m}^2$ （下段シールドの切羽圧）とし、地盤の自重は考慮せず、切羽圧による地盤内応力の増分などを解析した。FEM解析の範囲は、3辺固定、地表面自由の半無限地盤を対象



(楕円内は引張応力域、白丸は既設トンネルを示す。  
なお、ベクトル矢印拡大のため、要素数を減じている)

図-4 下段シールド切羽圧による最大主応力ベクトル図

に横 180 m, 深さ 180 m とした。弾性 FEM 解析の結果の最大主応力ベクトル図から、切羽到達前の計測断面に対し、斜め下方から押し上げる応力が切羽圧によって発生し、既設トンネル下部および側部周辺に作用していることが読み取れる。これらが原因となり、既設トンネルの内空に鉛直方向の圧縮変位を発生させたと考える。

#### b) 切羽通過から中胴部通過

下段シールドの切羽が計測断面を通過し、シールドの中胴部が通過中の間、既設トンネルの内空変位は、下段シールド接近時とは逆に、鉛直方向は急に伸張し、水平方向は逆に収縮した。この傾向はシールドテール通過の直前まで継続し、下段シールド施工前の初期の状態である鉛直および水平とともに内空変位  $\pm 0 \text{ mm}$  に、いったん戻った。さらにシールドの切羽が A 断面に到達し、中胴部通過までの間、既設トンネルの断面は、下段シールド接近中の横長変形とは逆の縦長変形に移行する。この区間を考察する。図-4 に示す斜め下から押し上げる切羽圧の影響は切羽到達直後、ほぼ消失している。また、切羽後方では、一部に引張応力が確認できる（図-4 と付録 III 参照）。これにより、地盤の水平方向の圧縮応力が緩められ、鉛直方向への応力解放を促す効果が考えられる。既設シールドの下部地盤には、下段シールドとの間の中間地山を介して、下段シールドの姿勢に起因した推力、下段シールドの切羽から天端付近に廻った泥水圧、下段シールドと地山間で生じた推進時の摩擦力によるポアソン比分の鉛直応力成分などが、作用していたと推察される。こうした状況で、掘削時のオーバーカットの影響等<sup>19)</sup>も加わり、下段シールド中胴部通過中に、列挙した応力に変動が生じ、既設トンネルの下部周辺地盤において、一部で応力解放が発生した可能性が考えられる。

#### c) テール通過

下段シールドのテール部付近が A 断面に達すると、鉛直方向の内空変位は  $+0.2 \text{ mm}$ 、水平方向の内空変位は  $-0.2 \text{ mm}$  となった。この結果、既設トンネルは切羽到達時と相反する縦長梢円の形状を示した。既設トンネルを上下から挟むシールドトンネルはシールド径が約 13.1 m と大口径であることから、テールボイドへの裏込め注入は、多くの注入ポートを設けた同時裏込め注入工法が採用されていたが、面板における地山の切削後、実際に裏込め注入が行われるまでは、オーバーカット<sup>2)</sup>されたシールドの外周地盤はその間に応力解放される<sup>19)</sup>。計測された変形は、テールボイドやオーバーカット部の応力解放の結果が影響したものと考えられ、シールド施工の多くの研究成果<sup>1), 4)</sup>によって確認された現象とも符合する。これにより、離間距離がわずか 0.7 m の既設トンネルに、こうした応力解放が直接的に影響し、鉛直方向の内空変位が切羽到達時の  $-0.4 \text{ mm}$  から、 $+0.2 \text{ mm}$  の変位に変化したと考えられる。鉛直、水平の内空変位の振れ幅はともに  $0.6 \text{ mm}$  程度であった。

#### d) 裏込め注入から上段シールド接近まで

テールボイドへの裏込め注入圧の影響により、既設トンネルの内空は鉛直方向が  $+0.2 \text{ mm}$  から一転して  $-0.7 \text{ mm}$  変位し、 $-0.5 \text{ mm}$  となった。水平方向は  $-0.2 \text{ mm}$  から  $+0.6 \text{ mm}$  変位して  $+0.4 \text{ mm}$  となり、大きな内空変位の変化が生じた。下段シールドの裏込め注入により、既設トンネルの内空は再び鉛直方向が収縮し、水平方向が伸張して、再度、横長梢円となり、切羽到達時の形状に戻った。これは下段シールドの裏込め注入材がボイドを満たし、注入圧力が地山を介して上部に位置する既設トンネルの下部地盤に影響し、鉛直上向きの応力増加を発生させたことなどが考えられる。しかし本計測では地山応力に関するデータを取得していないため、次章の FEM 解析によってこうした現象を確認する。下段シールドの裏込め注入以降は、内空変位は微小な変動をともなって水平方向はほぼ同じ値の  $+0.4 \text{ mm}$  で推移し、鉛直方向は  $-0.4 \text{ mm}$  変位から  $-0.2 \text{ mm}$  と緩やかな復元傾向を示した。既設トンネルは横長梢円の形状を保持しつつ、次の上段シールドの掘削を迎える。

## (2) 上段シールドによる A 断面の内空変位

#### a) 切羽接近から到達

下段シールドが A 断面を通過してから約 100 日後に、上段シールドの切羽が A 断面に到達した、上段シールドの切羽が A 断面に到達する 2 日ほど前の 8 リング、約 10 m (図-3 参照) 手前の位置から、急激な断面の変形が現れた。切羽到達の時点でピーク値を示し、初期の状態から鉛直方向は  $-1.1 \text{ mm}$  の変位となり、上段到

達直前の  $-0.2$  mm から  $-0.9$  mm 変位した。水平方向は  $+0.4$  mm から  $+0.7$  mm 変位して、 $+1.1$  mm となった。とくに切羽が到達する前後、図-3 中に示す 2/24～2/25 にかけての横長変形の急激な進行は、既設トンネルに対して、上載荷重など上部からの荷重の増加を示唆する変化と推察される。

#### b) 切羽通過からシールド中胴部通過

切羽通過から中胴部通過の間、既設トンネルに作用する鉛直方向の荷重が減少したかのように鉛直変位は  $-1.1$  mm から、 $+0.3$  mm 変位して  $-0.8$  mm に、同様に水平変位は  $+1.1$  mm から  $-0.3$  mm 変位して  $+0.8$  mm となった。つまり、鉛直、水平それぞれ最大  $\pm 1.1$  mm 程度の変位から  $\mp 0.3$  mm 復元し、鉛直荷重の除荷的な挙動を示した。この動きは重いと考えられるシールド機の先頭部通過から、比較的軽い中胴部への移行との関連性を推測させる計測結果となった。

#### c) テール通過

既設トンネルの内空は初期状態に戻るような復元的な変形が進み、鉛直方向で  $-0.5$  mm の変位、水平方向で  $+0.5$  mm の変位となった。この変形は、下段シールド通過時同様、テールボイドの応力解放の影響によるものと考えられる。

#### d) 裏込め注入

2/28 の裏込め注入時の注入圧の影響により、再び大きな横長の変形が生じた。その値は、切羽到達後のマシン中胴部通過中の値と同程度の鉛直方向で  $-0.8$  mm の変位、水平方向で  $+0.8$  mm の変位となった。テール通過時から、鉛直方向で  $-0.3$  mm、水平方向で  $+0.3$  mm 変位したことになる。

#### e) 裏込め注入から計測終了まで

既設トンネルの鉛直方向の内空変位は  $-0.8$  mm から  $-0.6$  mm に減少し、さらに復元傾向を示した。水平方向の内空変位は  $+0.8$  mm を維持した。その後、計測値の時間軸の圧縮や BOTDR 特有の微細な変位の変動をともないながら、この横長変形は計測終了までの約 4か月間にわたり継続した。この既設トンネルの内空変位の挙動は、先に記したように、下段シールド裏込め注入以降の動きとほぼ同様の動きであり、上段、下段両シールド施工後の既設トンネルの挙動は、ともに鉛直の内空変位は減少し、真円に向かって回復傾向を示し、水平方向は変位を維持する傾向を示した。この原因として、鉛直土圧と水平土圧の関係などが考えられるが、説明に必要な計測データを採取していないため、今後の課題としたい。

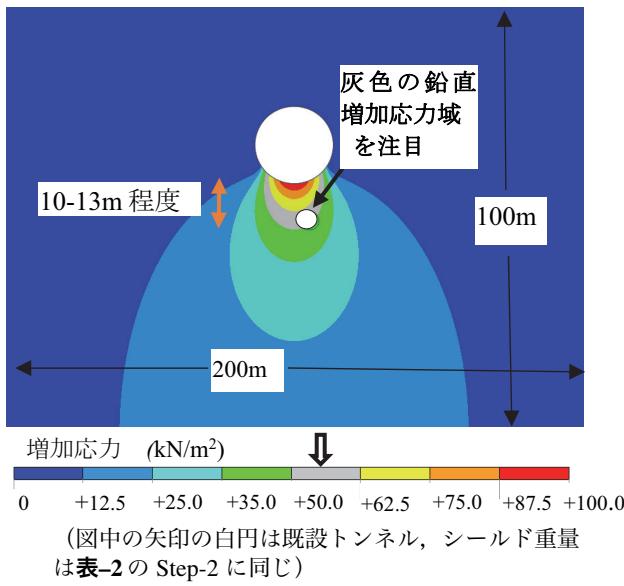
### (3) 下段シールドと上段シールドが既設トンネルに与える影響の比較

#### a) 下段シールドの影響

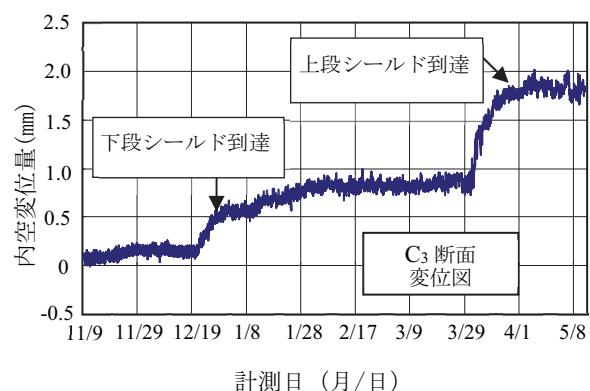
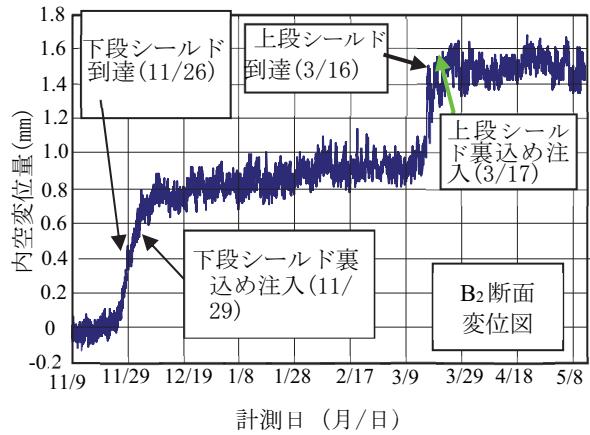
下段シールドでは、切羽が計測断面に到達する約 30 m (約  $2D_0$ : ここで  $D_0$  はトンネル外径) 手前の位置から、既設トンネルの A 断面に横長の変形が生じた。この主な理由として図-4 で先に述べたように、既設トンネルより深い位置で設定された泥水圧などの切羽圧が、切羽前方の地盤を押し、その応力が三次元的に上部の既設トンネル周辺地盤に伝播したものと推察できる。次に、切羽が通過し、遠ざかる過程では、切羽圧の影響も消散し、鉛直方向に押された既設トンネルは復元の傾向を示す。また下段シールドは既設トンネルの下部に位置するため、周辺地盤の初期応力も比較的大きく、したがって下段シールドのテールの解放応力も大きくなると考えられ、これによって、既設トンネルは相応の影響を受ける。さらに、下段シールドのテールボイドへの裏込め注入圧も既設トンネルに対して土被りが大きいことや、高い地下水圧との関係などで大きな注入圧を設定することとなり、この裏込め注入圧が既設トンネルに影響を与えたと考えられる。以上の様に、下段シールドの施工においては、離隔にもよるが、既設トンネルは、切羽圧、テールボイドの応力解放、裏込め注入圧といった、下段シールドの一連の施工時荷重の影響を受け、それらは、シールド示方書の通り十分に考慮すべき事項と考える。

#### b) 上段シールドの影響

上段シールドでは、図-4 の切羽圧による最大主応力の角度から想定される、下段シールド時のような約 30 m (約  $2D_0$ ) 前方からの切羽圧とみられる既設トンネルへの影響は確認できなかった。本事例では、上段シールドの泥水圧は、下段シールドに比べて約 20 m 土被りが小さい位置で設定されている。加えて既設シールドとの離隔も下段シールドの約 0.7 m と比較して約 4.9 m と大きいため、上段シールドの施工では、泥水圧などの切羽圧が既設トンネルに対して、ほとんど影響を与えることなく掘進したと考えられる。一方、シールド重量との関係が推測される影響が、切羽到達の約 10 m 手前に接近した時点から現れたことが確認できる。この現象の究明のため、簡易解析を行った。半無限弾性地盤の Boussinesq<sup>20),21)</sup> の解をトンネル形状で表現するため、境界条件を円形とし、荷重は施工で使用したシールド重量を適用した、弾性 FEM 解析の結果を図-5 に示す。要素数は 107,000、荷重であるシールド重量は、 $131.1 \text{ kN/m}^2$  (チャンバー内土荷重を含む) とした。また、荷重の作用範囲は 120 度 (例えば<sup>22),23)</sup> とし、その根拠は付録 II に記載した。弾性係数は  $E_0 = 85,000 \text{ kN/m}^2$  (N 値 30 以上の硬質地盤)、地盤の自重は考慮せず、シールド重量



による鉛直増加応力を解析した。解析の幅は 200 m、深さは 100 m。境界条件は 3 辺固定、地表面自由の半無限地盤とした。図-5 に示す鉛直増加応力は Boussinesq の解<sup>20)</sup>と同様に 3 次元的な圧力球根の形状を示すこととなり、鉛直増加応力が比較的顕著と認められる図中のグレー（灰色）表示の 50 kN/m<sup>2</sup>（土被り換算で約 3 m）以上の圧力球根の直径が、概ねシールド外径の 13 m 程度と読み取れ、その圧力球根直径と、既設トンネルの内空変位の増加発生位置である、シールド切羽の到達前約 10 m とが距離的に概ね整合することから、シールド重量が既設トンネルの鉛直方向の内空変位の収縮と一定の関係性があると考えられる。計測結果では、切羽到達時に鉛直方向の内空変位は、上段シールド到達前の -0.2 mm から大きく変位し、-1.1 mm の変位（水平変位は +1.1 mm）となった（図-3 参照）。これは、上段シールド重量が約 20,580 kN と大きく、かつ既設トンネルとの離隔が約 4.9 m ( $0.38D_0$ ) と近接していたことが既設トンネルに比較的大きな影響を与えたと考える。上段シールド中胴部通過中の既設トンネルの内空変位が回復する傾向は、重い先頭部のシールド重量通過完了による影響が大きいと考えられる。その後、テール通過中はテールボイドの応力解放、裏込め注入など一連の影響を比較的顕著に受けたと考えられる。下段シールド施工との相違点は、上段シールド施工では、下段シールドの裏込め注入以降、既設トンネルの内空変位は上段シールド接近 (10 m 程度) までほとんど変化が計測されなかった。この点から切羽圧の影響は軽微であったと考えられる。一方、シールド重量によると推察される影響を比較的顕著に受けたと考えられる。



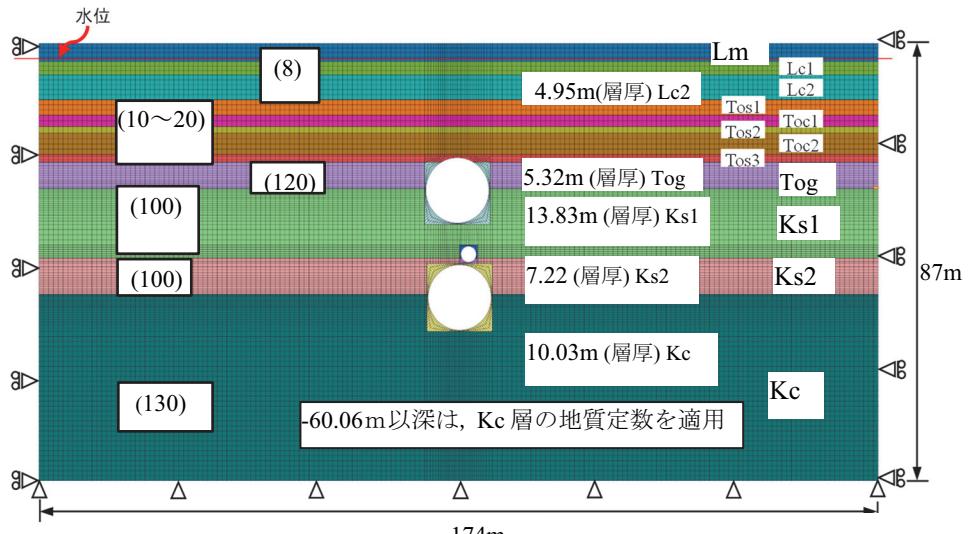
#### (4) B 断面, C 断面の計測結果

B<sub>2</sub> 断面, C<sub>3</sub> 断面の計測結果を図-6, 図-7 に示す。両計測とともに下段シールドの到達と裏込め注入により内空変位が進行し、上段シールドの到達と裏込め注入で、もう一段上がって内空変位が進行する類似の傾向を示した。B<sub>2</sub> 断面では、下段シールドの切羽到達日に水平変位が +0.5 mm ほど変位し、その後の裏込め注入の影響で +0.8 mm となった。続く上段シールドの到達と裏込め注入で +0.7 mm ほどの変位が加わり約 +1.5 mm の変位を計測した。C<sub>3</sub> 断面においても、下段シールド到達と裏込め注入の影響、および上段シールドの同様の影響により、B<sub>2</sub> 断面の計測値と類似の傾向を示し、シールド相互の離隔や地盤の変化により最大変位で約 +1.8 mm を計測した。

### 4. FEM による数値解析的検証

#### (1) 解析の目的と概要

上下 2 本の新設の併設シールドが、既設シールドトンネル本体に地山を介して与える影響を検証する目的で、A 断面を対象に逐次施工時荷重を入力する 2 次元



(かっこ内の数字は N 値。薄い層厚は表-1 の深度参照)

図-8 A 断面 FEM 解析メッシュ図

表-1 FEM 解析に用いた地質定数

地盤	深度 (m)	N 値	$v$ : ポアソン比	$\gamma$ : 濡潤重量 (kN/m <sup>3</sup> )	E: 弹性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	
					$E_b$ : 坑内水平載荷試験	4 $E_b$ 又は 2800N
Lm	-3.41	8	0.45	13.1	—	22,400
Lc1	-6.26	8	0.45	13.2	—	22,400
Lc2	-11.21	8	0.45	14.7	—	22,400
Tos1	-14.31	21	0.35	18.3	13,141	52,564
Toc1	-16.56	10	0.40	18.7	—	28,000
Tos2	-17.91	21	0.35	17.9	13,141	52,564
Toc2	-22.16	10	0.40	18.4	—	28,000
Tos3	-23.66	21	0.35	18.8	18,041	72,164
Tog	-28.98	120	0.30	18.6	206,780	827,210
Ks1	-42.81	100	0.30	18.7	72,343	289,372
Ks2	-50.03	100	0.35	18.7	—	280,000
Kc	-60.06	130	0.30	18.1	—	364,000

弾性 FEM 解析を行った。また、A 断面から約 120 m 離れた補完計測断面の B<sub>2</sub> 断面については、地盤定数と施工データなどを保有していない。しかしシールド重量を考慮した本解析手法の適用性をさらに確認するため、A 断面付近のデータを準用することとして、B<sub>2</sub> 断面についても FEM 解析を実施した。このため、B<sub>2</sub> 断面の計測結果と解析結果については、具体的な数値の大小比較は行わず、変位の傾向の比較のみを議論するに留めた。

表-1 には解析に用いた地質定数を示す。図-8 には A 断面の FEM メッシュ図を示す。FEM 解析モデルは土

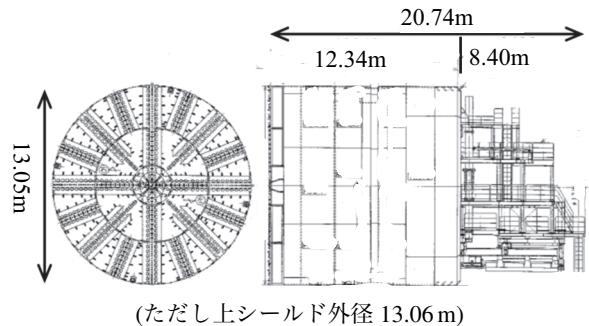


図-9 シールド機の概要図

水分離の弾性モデルで、境界条件は、側面を水平方向固定、鉛直方向自由とし、底面は水平方向および鉛直方向ともに固定とした。解析領域は幅 174 m、深さ 87 m で、メッシュは、節点数 17,358、要素数 17,322 である。メッシュ図において上下シールドと既設トンネルの外周付近は、外周面で 1 度きざみに接点入力と変位出力を実行したため、高精細メッシュを使用している。メッシュが濃密なためグラデーションを生じ、色彩が濃く表示されるが、解析領域の層厚に応じ、周囲と同じ地質定数が入力され、特異な値は使われていない。図-9 にシールドの概要図を示す。今回解析に適用したシールド重量は、シールドの先端部の面盤、支持機構、隔壁、スキンプレート、内部機器類などの各重量とシールドの既知の重心位置からシールドを 3 分割して前胴部の単位長の重量を求め、切羽到達時のシールド重量として解析に用いた。本研究の解析では Step-1, Step-3, Step-4 は文献 7) の解析手法を適用し、新たにステップ Step-2, Step-6 でシールド重量を考慮した。各施工ステップにおける入力値の詳細を表-2 に示す。FEM 解析では、施

表-2 FEM 各ステップでの荷重モデルと荷重入力値

(表中の 2 段, 3 段の Step-1, Step-2 などはスペースの関係で Step1, Step2 などと短縮表記)

入力 Step	Step-1 . 切羽接近	Step-2 . 切羽到達	Step-3 テール応力解放 <sup>25)</sup>	Step-4 . テール裏込注 <sup>7)</sup>
入力状況	<p> <math>\Delta P_1 = (P_{ch} - P_h) \times \alpha</math>  <math>P_{ch}</math> : 切羽圧 (実測値)          (中心位置)  <math>P_h</math> : 切羽面の地山側圧          (中心位置)  <math>\alpha = 0.15^{(7)}</math> </p>	<p> <math>\Delta P_d</math>  <math>\Delta P_2</math>: マシーン重量  <math>\Delta P_3</math>: 掘削土重量          チャンバー内の掘削土重量          は泥水比重 1.3 と評価. 地下          水との比重差 0.3 と評価.          マシーン重量: 2,000kN/m          (底部に 120° の範囲で載荷)          ※ マシーン先端部は鋼材の          水中重量を適用.          チャンバー内は浮力考慮な          し (カッターのスリット通          水のため)       </p>	<p> <math>\Delta P_{out}</math>  <math>\Delta P_{in}</math>          テール天端付近の概念図          全周同様の考え方          応力解放率 <math>\alpha</math> : 20%<sup>25)</sup> </p>	<p> <math>\Delta P'_{out}</math>  <math>\Delta P'_{inj}</math> (注入圧全周同値)          テール天端付近の概念図          は全周同様の考え方.       </p>
入力値	<p>Step1 : <math>\Delta P_1 = 44.0\text{kN/m}^2</math></p> <p>Step5 : <math>\Delta P_1 = 26.3\text{kN/m}^2</math></p>	<p>Step2 : 切羽圧 = <math>307.5\text{kN/m}^2</math>            マシーン・土荷重 = <math>131.1\text{kN/m}^2</math></p> <p>Step6 : 切羽圧 = <math>172.5\text{kN/m}^2</math>            マシーン・土荷重 = <math>131.1\text{kN/m}^2</math></p>	<p>Step2 : 切羽圧 = <math>307.5\text{kN/m}^2</math>            Step6 : 切羽圧 = <math>172.5\text{kN/m}^2</math></p>	<p>Step4 : 裏込圧 = <math>450\text{kN/m}^2</math>            セグメント荷重 = <math>15.6\text{kN/m}^2</math></p> <p>Step8 : 裏込圧 = <math>240\text{kN/m}^2</math>            セグメント荷重 = <math>15.6\text{kN/m}^2</math></p>
摘要	切羽接近時圧力は全周同値	マシン重量補正値 75% <sup>7)</sup>	応力解放率 20% <sup>25)</sup>	裏込め注入圧は全周同値

表-3 FEM 解析用シールド切羽圧・裏込め注入

計測リング (Aリング)	A+2	A+1	A	A-1	平均値 (入力値)
上段切羽圧(kPa)	231	236	233	228	230
上段裏込注入圧(kPa)	340	329	279	326	320
下段切羽圧(kPa)	399	412	414	415	410
下段裏込注入圧(kPa)	601	606	608	598	600

表中の +, - は A リングからの位置を示す。+1 は 1 リング前方。平均値は、各 4 値の相加平均の小数第一位を四捨五入した値。

工時の再現性を考慮し、下段および上段シールドのトンネル掘削時に記録された泥水圧と裏込め注入圧を解

表-4 既設トンネルの断面諸定数

	断面二次モーメント $I(\text{m}^4)$	ヤング係数 $E(\text{GPa})$	$EI$ ( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ )
鋼製セグメント	$6.34 \times 10^{-6}$	206	$1.31 \times 10^{-3}$
2次覆工	$1.59 \times 10^{-4}$	29.4	$4.67 \times 10^{-3}$
重ね梁構造	$1.65 \times 10^{-4}$	—	$5.98 \times 10^{-3}$

析時の施工時荷重として入力した。表-3 に施工時データの切羽圧と注入圧を示す。また既設トンネルの覆工は鋼製セグメントにコンクリートの 2 次覆工が施工されており、曲げ剛性は、重ね構造と評価し、完全剛性一様リングの梁要素として解析した(表-4 参照)。

### a) 切羽の前方地盤への作用

切羽圧の前方地盤への影響は、切羽中心の泥水圧に15%<sup>7)</sup>を乗じて円形トンネルの掘削面の全周放射方向に作用<sup>7)</sup>させた。

### b) 切羽到達時

切羽到達時は、シールド前方部の重量にチャンバー内に充満した掘削土の重量を加えてシールド重量として作用させた。チャンバー内の掘削土はスリットからの泥水や地下水侵入のため水中单位体積重量を適用した。また、シールド重量のチャンバー部分も同様に面盤スリットから浸水があるため、密閉された中空とはならない。よって、チャンバー容積の浮力は考慮せず、シールドは地下水位以下のため、シールド重量は水中と評価して鋼材の比重から水の比重を差し引いた値で換算し適用した。掘削土を含めたシールド重量の載荷分散角度の120°は、開削円形トンネルの基礎コンクリートの打設範囲<sup>22),23)</sup>と、分散角度を評価するために実施したFEM解析による結果を参考に適用した(付録II参照)。

### c) 応力解放とセグメント設置時

テール部の応力解放率は既往の論文中の硬質地盤における解析事例<sup>24)-26)</sup>を参考に、地山応力と、泥水圧の差分に対し、20%<sup>25)</sup>の応力解放率を適用して解析を行った。また、テール脱出後のセグメント重量にはトンネル内空を含めたトンネル横断面に対する浮力を考慮している。

### d) 裏込め注入その他(全般)

テールボイドへの裏込め注入は施工データをもとに計算の容易さから簡易的な放射状の全周同じ圧力<sup>7)</sup>を作

用させた。

以上のa)からd)の4ステップを下段、上段の各トンネルの施工に対して逐次計算を実施した。そして、本来の3次元応力空間でのトンネル軸方向への応力減衰効果を考慮するため、2次元応力状態への補正值として75%<sup>7)</sup>を適用した。また、テールの応力解放を除き、他の荷重は掘削面に作用する荷重として入力した。本研究のFEM解析手法はシールド重量を施工時荷重として評価し、シールド施工による影響を具体的に解析した事例となる。

## (2) 解析結果と考察

既設トンネルのA断面における内空変位の計測結果とFEM解析結果を図-10に示す。図中には、シールド重量を考慮しない解析ケースも併せて表示した。図-10のグラフが示すとおり、既設トンネルの内空変位の実測値とシールド重量を考慮した場合の解析結果は、良い整合性を示した。また、シールド重量の有無を比較すると、影響が大きいと考えられるStep-6(上段シールド到達時)では、シールド重量を考慮した解析値は実測値と比較して4%程度の誤差で良い一致を示した。一方、シールド重量を考慮しない場合、内空変位は約25%(約0.3 mm)ほど小さく算出され、上段シールドが到達し、その自重が影響したと推察される特徴的な既設トンネルの変位挙動は表現できなかった。Step-2の下段シールド到達時には、シールド重量を考慮した場合は、しない場合と比較して、内空変位はやや小さく算定された。これは、連続体の弾性解析であるため、既設トンネルの

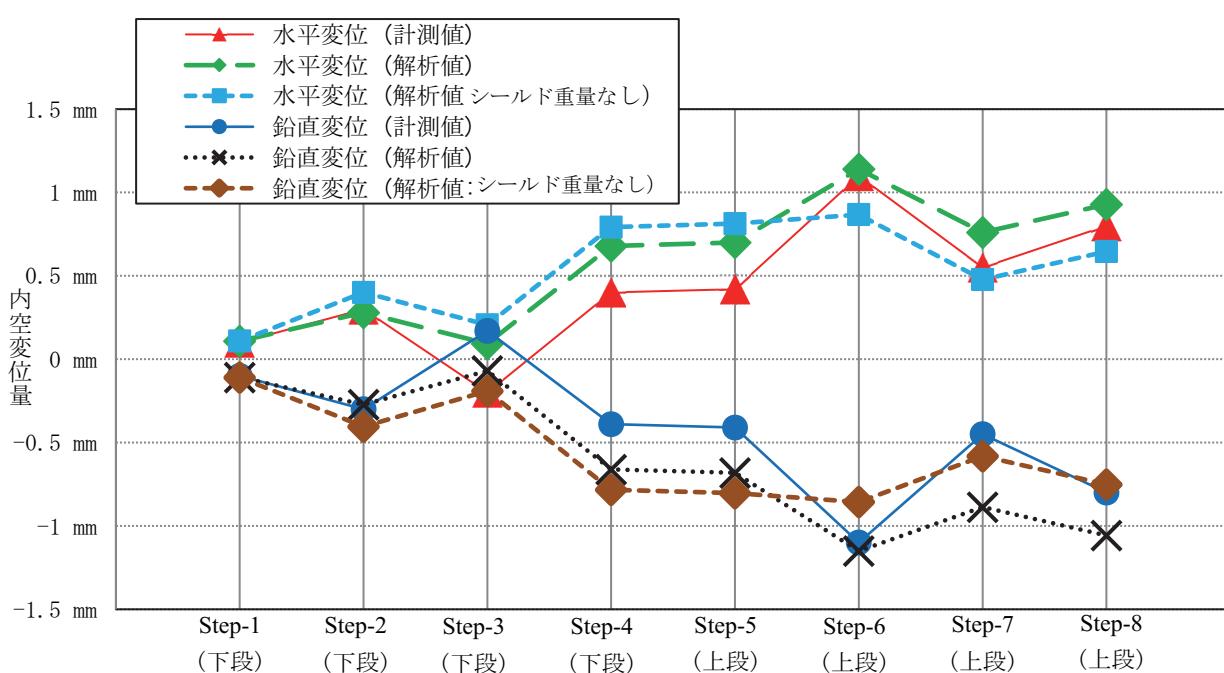
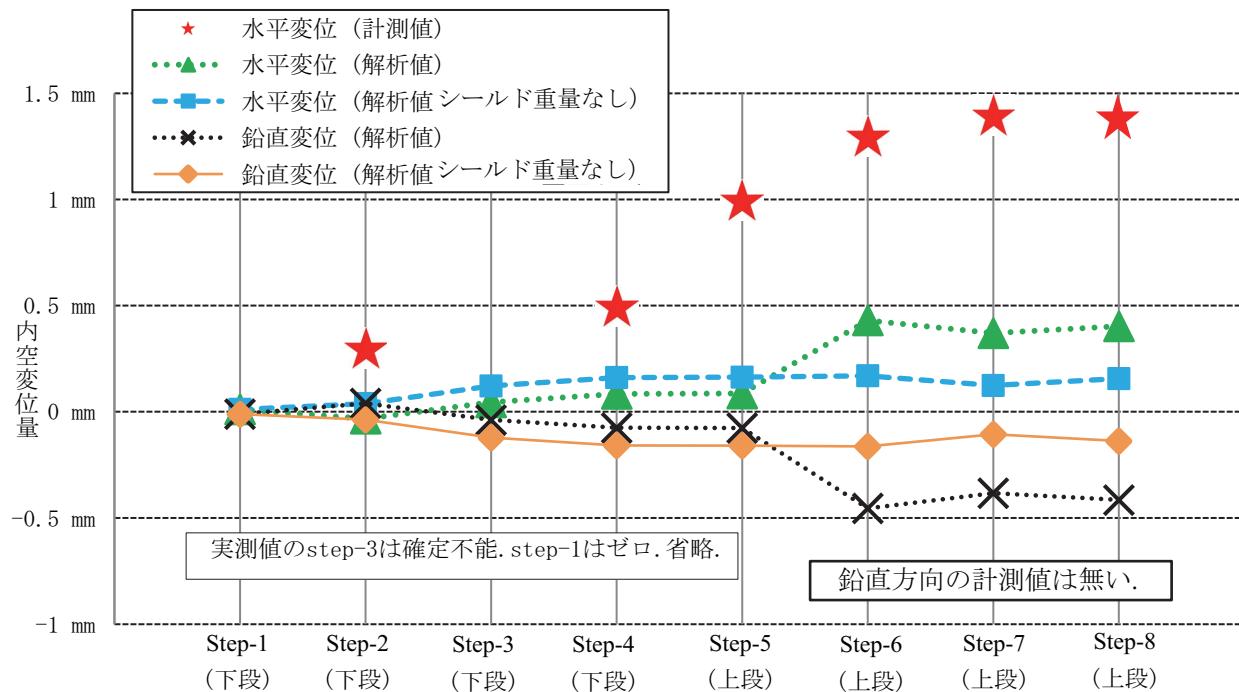


図-10 A断面の計測結果とFEM解析結果の比較(既設トンネルの水平・鉛直内空変位)

図-11 B<sub>2</sub> 断面の計測結果と FEM 解析結果の比較（水平方向内空変位量）

下方付近の地盤が下段シールドの自重により鉛直下方へ引き込まれ、既設トンネルも同様に引き込まれた結果、既設トンネルの鉛直方向も 0.1 mm ほど伸びたことで、シールド重量を考慮しない場合の値を下回ったと考えられる。しかし、この Step-2 における実測値との比較でも、シールド重量を考慮した場合の解析値の方が一致度は高く、計測値との誤差は 5%程度であった。解析結果を、全 8 Step で評価すると、下段シールド施工が対象の Step-4 までは、シールド重量考慮の有無で、両ケースの解析結果に大きな差は見られない。一方、Step-5 以降の上段シールド施工の影響を見ると、切羽到達時の Step-6 ではシールド重量を考慮した解析値が実測値とより良い整合性を示したと言える。次の Step-7 のテール部の応力解放時は、シールド重量は解析結果に影響を与せず、シールド重量有無の両ケースとも内空変位量が同じ値だけ減少して算定されるため、Step-6 で小さく算定されたシールド重量を考慮しないケースが、結果として Step-7 では実測値に近くなった。また Step-8 でも同じ値の裏込め注入による影響が加算されるため、ここでもシールド重量を考慮しないケースの一一致度が僅かに高い。しかしながら、解析手法の評価にあたり重要と考えられる点として、解析全体を通した整合性と、個々の値の一一致度が考えられるが、設計や施工の安全性の観点から見ると、最大変位付近のピーク挙動をより的確に把握することが、特に構造物の安全側の評価判定の観点から大変重要と考えられる。こうした点から評価すると、上下併設シールドの影響解析では、

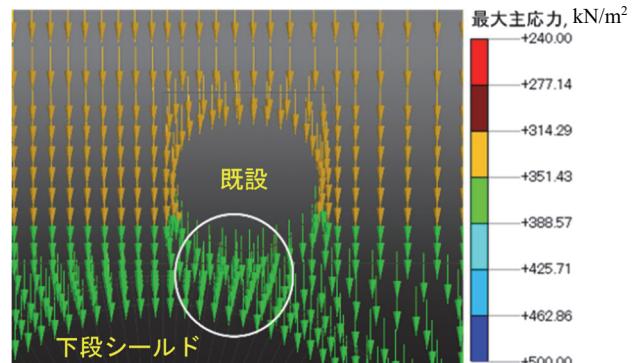


図-12 最大主応力ベクトル図初期状態 (step-0)

特に上段シールドにおいては、シールド外径や離隔、地盤条件などにもよるが、シールド重量を考慮した解析手法について有用性があると考えられる。

図-11には B<sub>2</sub>断面を対象とした解析結果と実測値の比較を示す。前述のように詳細な施工情報を保有していないため、約 120 m 離れた A 断面のデータを準用した。このため、個々の値を直接比較すること自体の有意性は薄いと考えるが、上段シールド施工以降の特に Step-6 以降の計測値の上昇傾向と比較すると、シールド重量を考慮した解析は、実測値の傾向により良く呼応したと考える。補足的かつ限定的ではあるが、シールド重量を考慮することで、上段シールドの影響を一定程度、評価できると考える。図-12に初期状態 (Step-0) の、図-13に下段シールド接近時 (Step-1) の最大主応力ベクトル図を

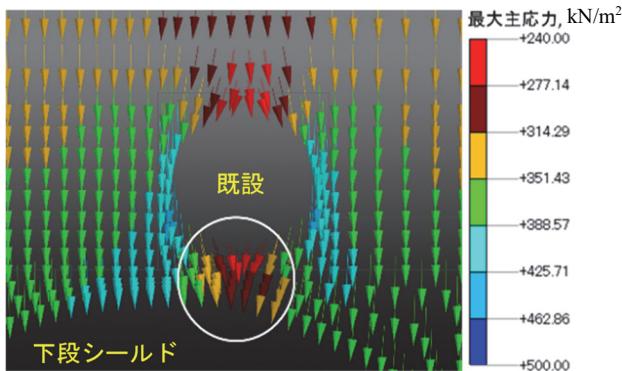


図-13 最大主応力ベクトル図 (step-1: 下段シールド接近)

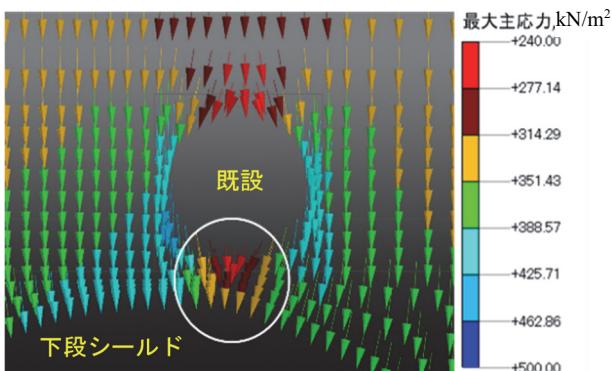


図-14 最大主応力ベクトル図 (step-2: 下段切羽到達)

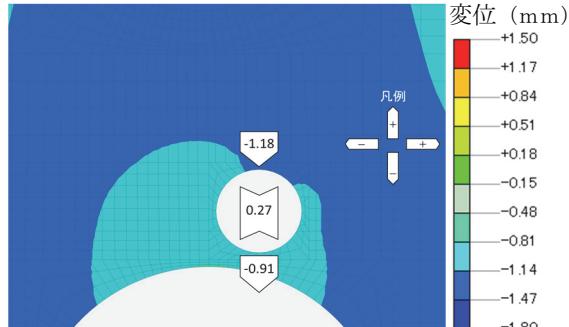


図-15 FEM 鉛直変位図 (step-2: 下段切羽到達)

示す。図-12, 図-13の白枠内の比較から、既設トンネルの下端で主応力の低下がみられる。これは下段シールドの接近にともない切羽圧の影響を受けて、既設トンネル下部地盤に鉛直上向きの応力が作用したため、その相殺で鉛直方向の最大主応力が低下したものと考えられる。図-14にStep-2の下段シールド切羽到達における最大主応力ベクトル図を示す。既設トンネルの下部地盤の白枠内で、鉛直方向の最大主応力がわずかに増加している。これはトンネル離隔部分では、Step-1の放射状の切羽圧と比べStep-2の切羽到達時の泥水圧の値は大きく、この理由だけでは、最大主応力はさらに相殺され減少するが、Step-2ではさらにシールド重量が

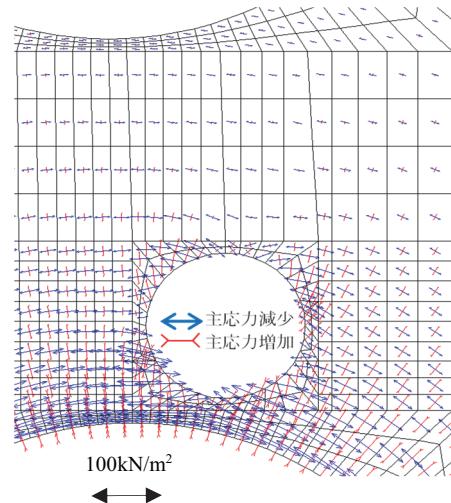


図-16 主応力増分ベクトル図 (step-4: 下段裏込め)

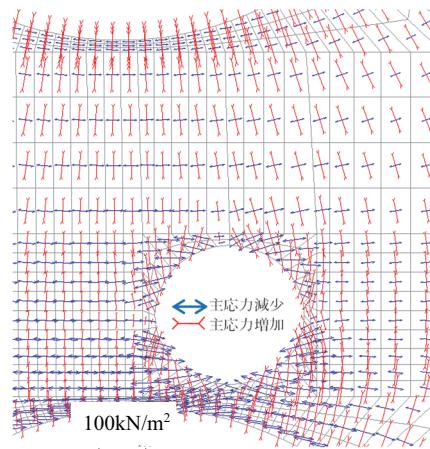


図-17 主応力増分ベクトル図 (step-6: 上段切羽到達)

鉛直方向に作用するため、その結果、最大主応力はわずかに増大したと考えられる。図-15にStep-2における鉛直変位を示す。図より、既設トンネル上部地盤は約1.2 mm 鉛直方向に変位し、既設トンネル下部地盤の変位は約0.9 mm に留まった。この差分量の約0.3 mm が既設トンネルの内空変位となって鉛直方向に収縮した。この変位は、図-10に示す既設トンネルに発生した内変位の計測結果とほぼ一致している。図-16には、Step-4の下段シールド裏込め注入時の主応力増分ベクトル図を示す。図-16から、下段シールドの裏込め注入圧により、既設トンネルと下段シールドとの間の地盤で、圧縮主応力の増加が顕著となり、これにより、既設トンネルは縦に圧縮され内空が鉛直方向に収縮したと考えられる。また、図-17に上段シールドの切羽到達における主応力増分ベクトル図を示す。図-17から、既設トンネルの上部地盤から側方地盤、下部地盤において鉛直方向の主応力の顕著な増加が確認できる。これは、上段シールドの先頭部付近のシールド重量が影響したと考えら

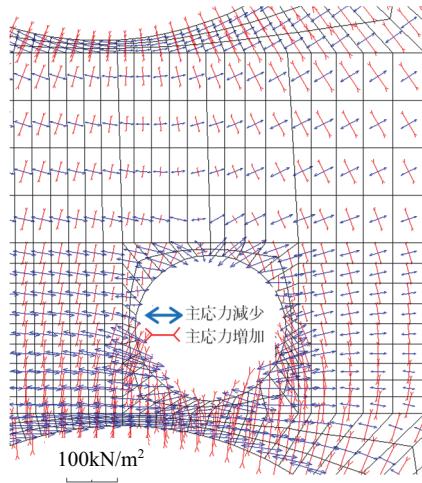


図-18 主応力増分ベクトル図 (step 7: 上段応力解放)

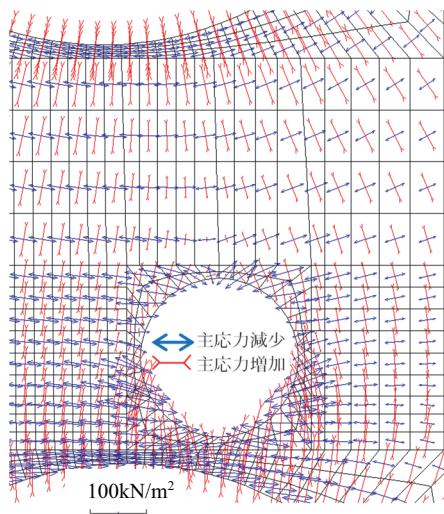


図-19 主応力増分ベクトル図 (step-8: 上段裏込め注入)

れる。これによって既設トンネルは鉛直方向に圧縮され、収縮した。図-18に上段シールドテール通過時の応力解放による主応力増分ベクトルを示す。上段シールド応力解放により既設トンネル周辺では水平方向の主応力が減少し、鉛直方向の主応力がわずかに増加している。これは既設トンネルの内空が水平方向に収縮し、鉛直方向に伸長したことによる応力変化と考えられる。図-19に上段シールド裏込め注入時における主応力増分ベクトル図を示す。図-19から、上段シールドの下端から既設トンネルの周辺地盤の全域において、鉛直方向の主応力の増加が確認できる。この影響により既設トンネルは再度、鉛直方向に圧縮されて収縮した。また、既設トンネルの曲げモーメントは今回のFEM解析の結果によると、初期の最大曲げモーメント47kN·mに対して、Step-6の上段シールド到達時には84kN·mとなり、37kN·mほど増加した。曲げモーメントの増分の計測は今回実施していないため、計測方法も含めて今後

の課題としたい。

## 5. 結論

外径約13.1mの2本の大断面シールドが、外径約3.2mの既設のシールドトンネルを上下から挟んで下段先行、上段後続で併設施工された。近接施工区間において既設トンネルの内空変位を光学的測定方法(BOTDR)を用いて計測し、得られた結果について考察を加えた。また、既往の施工過程を踏まえた逐次弹性FEM解析に、シールド重量を新たに施工時荷重として評価し、既設トンネルの内空変位について解析的検証を行った。本研究によって得られた知見と成果を以下に示す。

- (1) シールド示方書に記載の一般的なシールドトンネル施工では、上下併設シールド施工の場合、後続の上段シールドが、既設の下段トンネルに与える影響は、小さいと評価されている<sup>2)</sup>。しかし、今回の大断面シールドの計測結果では、既設トンネルの内空変位(鉛直・水平方向)は下段シールド施工後の約0.4mmに比べ、上段シールド施工では単独で約0.7mm(累計で約1.1mm)となった。本研究の事例は、一般的とは言い難い大断面の上下近接施工であるが、上段シールドの影響は必ずしも軽微とは言い難い結果と言える。今後の類似施工では、後続する上段シールドの外径や相互の離間距離、地質状況等を十分考慮し、入念な検討や予測解析そして施工が必要と考えられる。
- (2) 既設トンネルに対して、上下併設シールドが近接施工される際の解析的な評価方法として、従来の逐次施工過程に、シールド重量(チャンバー内掘削土重量を含む)を考慮した弹性FEM解析を実施した。その結果、各施工ステップで既設トンネルの内空変位を、一定程度の精度をもって解析することができた。シールド重量を考慮しない場合と比較すると、特に、上段シールドの影響による既設トンネル内空変位の最大値付近の値を、より良好な精度で解析ができたと考える。

**謝辞:** 本研究をまとめるにあたり、首都高速道路(株)の津野和宏氏(現: 国土総合研究所教授)と長田正光氏にはシールド施工データの取得に関し、御助力を頂いた。また、当該区間のシールド工事を施工した鹿島建設(株)と大成建設(株)の関係者の方々にはシールド施工データの整理に御協力を頂いた。そして、既設トンネルの内空変位データの整理は、計測を担当したNTTインフラネット(株)とアイレック技建(株)の方々に大きな御支援を頂いた。ここに、関係各位に対し深く感謝の意を表します。

## 付録 I BOTDRによる計測値のグラフの波動について

BOTDRを用いた測定値に含まれる測定値の幅(誤差)については、2.(2)「計測方法」で説明を付した。実際の計測では、測定値はデジタルデータの確定値としてエクセルファイルなどで整理、取得される。**図-I.1**に本報告の**図-3**の内空変位計測結果を示す。**図-I.2**にエクセルデータから作成した**図-I.1**の矢印の2月25日付近の鉛直内空変位を示す。

**図-I.2**に示すように、BOTDRによって1時間間隔で採取された計測値は、確定値として採取され、既設トンネルの鉛直方向内空変位の最大値は2月25日の22時40分の-1.14 mmである。またその前後の計測値は、21時40分の-1.07 mm, 23時40分の-1.03 mmであった。レーザー光の波長幅や計測器に起因する測定値の幅(誤差)は、確率的に存在する。本文中の**図-3**の計測値が波動的見える理由は、約13か月、約9000回を超える計測値を幅約20 cmに圧縮し、折れ線で表示したことも一因と考える(付録IV参照)。

## 付録 II シールド重量の地盤中の分散角度

シールド重量の地盤中の分散角度を把握する目的で、弹性FEM解析を実施した。地盤は半無限弾性体とし、3辺固定、上面自由、要素数107,000、幅200 m、深さ100 m、弹性係数 $E_0 = 85,000 \text{ kN/m}^2$  ( $E_0 = 2,800 \text{ N: N}$  値30 以

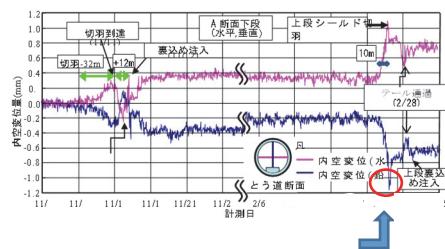


図-I.1 本文中の**図-3**の縮図

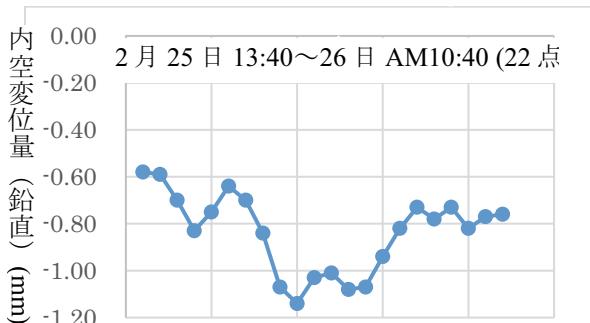
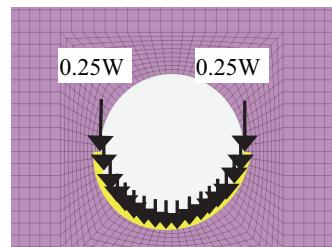


図-I.2 図-I.1の拡大(矢印↑上の赤丸内) 計測値

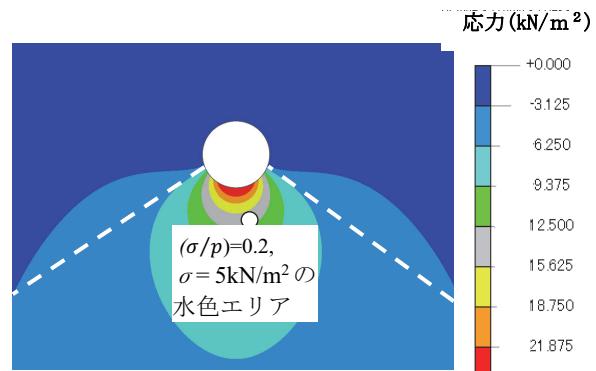
上の硬質地盤)シールド重量 $W = 490 \text{ kN/m}$ (単位長さあたり50tf/m相当)。シールド重量は**図-II.1**に示すように、下部半円アーチ(鋼製、弹性係数 $20,500 \text{ N/mm}^2$ )を構造モデルとし、全シールド重量の50%を上部半円から、下部半円アーチの左右2支点に集中荷重として与え、下部半円アーチの重量は半円を120分割して微小な鉛直方向の集中荷重として与えた。FEM解析の結果を示す応力分布図を**図-II.2**に示す。図中の白破線は、シールド重量による鉛直応力の増加が顕著となった、 $\sigma/p = 0.2$ 程度の圧力球根<sup>20)</sup>に対する接線で、この角度を参考に、シールド重量による鉛直増加応力域を示す分散角度を、概ね90度から120度程度の範囲と評価した。ここで、 $p$ は文献20)におけるBoussinesqの解での地表面載荷応力で、 $\sigma$ は、それに対する地中の鉛直増加応力を示す。

なお、FEMで地盤解析を実施する際、境界面に作用する荷重の方向が必要となる。泥水については粘性流体と扱い、压力の作用方向は、加圧状態ではシールドを中心とした放射状とした。またシールド重量の作用方向は、鋼材と地盤(砂礫)の摩擦係数(0.5~0.6)<sup>27)</sup>を考慮のうえ、荷重入力の簡便さも考慮し、シールド中心から放射状の作用方向としている。



ここで  $p = 490 \text{ kN}/20 \text{ m} = 24.5 \text{ kN}/\text{m}$ , 20 m: 半円周相当

図-II.1 シールド重量の荷重入力状況(FEM)



白破線は $(\rho/p) = 0.2$ 程度の鉛直応力増加域に対する接線で、荷重分散角度と評価した。

図-II.2 シールド重量影響範囲のFEM解析結果

### 付録 III シールド切羽圧による切羽後方の引張応力の発生状況

シールドの切羽圧の影響で、施工対象地盤を弾性地盤と仮定した場合、切羽後方のシールド上下部の周辺地盤では引張主応力の発生が確認できる(図-III.1参照)。こうした青色表示の引張応力を受ける地盤では、ポアソン比に伴い引張主応力に直交して圧縮主応力が作用する。特にシールド上部に着目し、その地盤の上部に近接する既設トンネルや、埋設管路などが存在すれば、既設のトンネルや管路の下部地盤はほぼ鉛直下向に圧縮応力を受け、応力解放が促進されると考えられる。なお、図-III.1は本文中の図-4と同じ条件の解析結果であり、出力方法を変えたものである。ここで、図中の赤色表示は切羽圧による圧縮の主応力(増分)ベクトルである。

前述の応力解放が促進される理由を、図-III.2に示す。

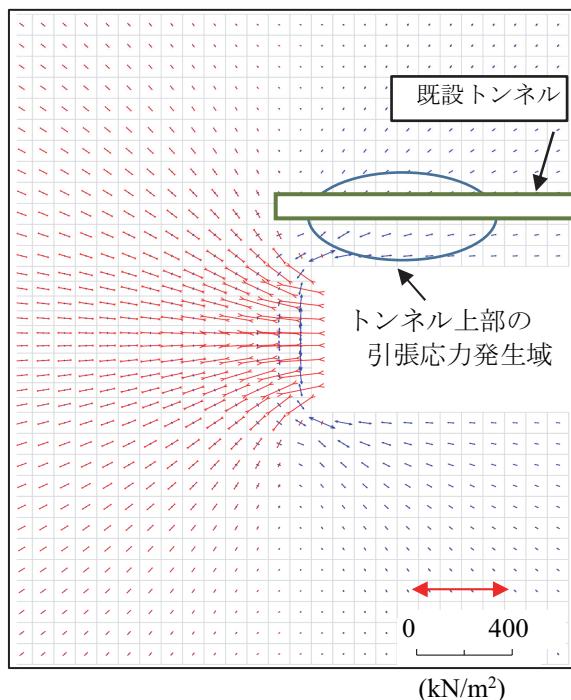


図-III.1 主応力増分ベクトル図(1ステップのみの解析であり、主応力ベクトル図と同義となる)

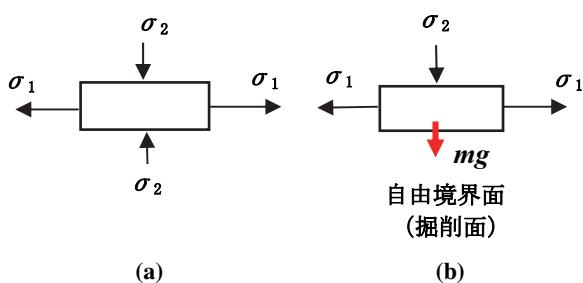


図-III.2 切羽後方に発生する引張応力とその影響

図中の左図(a)は、水平方向に作用する引張の主応力 $\sigma_1$ に対して、それに垂直に、 $\sigma_1$ にポアソン比を乗じた $\sigma_2$ が作用する。次に右図(b)の下面において、掘削面を想定し、境界条件として自由境界面とすれば、この境界面には、泥水式シールド工法ではスキンプレート背面に周り込んだ泥水の圧力が作用する。仮に素掘りでは完全な応力解放状態(下面の $\sigma_2 = 0$ )となり、上面からの $\sigma_2$ のみが作用することになる。シールドの掘削により、切羽圧が作用し、切羽後方の地盤中において、一部に引張応力が確認された。この影響は、天端の掘削面において、応力解放を助長させるものと考える。また、重力場における解析においても、弾性地盤では、線形解の重ね合わせにより、右図(b)の赤矢印の様に、土塊要素の質量に重力加速度が作用する状態となり、切羽圧による切羽後方での影響は、重力場においても同様と考えられる(図-III.2のm:質量、g:重力加速度)。

### 付録 IV 内空変位データの波動の原因の考察

採取されたデータに過誤や偶然誤差が無いとした場合、本報告以外でも、シールド掘進時の地盤等の変位データに波動<sup>19),28)</sup>が見受けられる。その理由として以下が考えられる。

- a) 切羽面の砂礫等とビットとの間の切削時の振動
- b) 掘進に伴う切羽の地盤構成の変化に起因した切羽面の透水率の変化と、それに連動した地盤中の切羽伝播圧力の変動
- c) ジャッキ推進時のシールドと地盤との摩擦振動などが考えられる。本報告の計測時に、著者と計測員は既設トンネル内で、シールド接近時の振動音を確認している。シールド掘削推進時の地盤振動が既設トンネル内壁に伝播し、音を発したと考えられる。こうした振動が、トンネル計測時の内空変位データに波動として影響を与えた可能性が考えられる。

### 参考文献

- 1) 橋本定雄:軟弱地盤における上下隣接シールド施工の実態と計測結果について、土木学会論文集、No. 352/III-2, pp. 1-22, 1984.12.
- 2) 土木学会:2016年制定 トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説, pp. 65-66, pp. 165-166, p. 208, 2016.7.
- 3) 鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物設計標準・同解説(シールドトンネル), P64, 2013.2.
- 4) 山口巖, 山崎糸治, 小林隆, 松下惇次, 宮田弘之介, 杉島敏夫:4本併設シールドの地盤-トンネル挙動解析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, 1997.3.
- 5) 太田拡, 橋本昭雄, 長屋淳一, 管茜櫻:シールド掘進時の施工時荷重による地盤変形に関する計測結果と分析、トンネル工学報告集、16卷, pp. 395-402, 2006.
- 6) 田島仁志, 岸田政彦, 川田成彦, 小林靖典, 斎藤正:併設シールドトンネルの影響評価方法に関する検討、トンネル工学研究論文・報告集、13卷, pp. 407-412, 2003.

- 7) 中井照夫, 奥野哲夫, Hossain Md. Shahin : トンネル設計における数値解析の役割, 地盤工学会誌, Vol. 63, No. 2, Ser. No. 685, pp. 75-76, 2015.2.
- 8) 佐藤豊, 小西真治, 杉本光隆, A. Sramoon : 変位境界を用いた有限要素法によるシールド通過時における硬質地盤の挙動評価, 土木学会論文集, No. 722/III-61, pp. 49-58, 2002.12.
- 9) 土木学会 : 2006 年制定 トンネル標準示方書 [シールド工法編]・同解説, p. 55, 2006.10.
- 10) 奥要治, 堀地紀行, 小泉淳, 平岡慎雄 : 光ファイバーケーブルによるシールド近接交差計測と既設トンネルの断面力解析, トンネル工学論文集, 第 15 卷, pp. 107-114, 2005.
- 11) Mohamad, H., Soga, K., Bennett, P. J. and Mair, R. J.: Monitoring twin tunnel interaction using distributed optical fiber strain measurements, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 138 (8), pp. 957-967, 2012.8.
- 12) 奥野正富, 太田拡, 誉田孝宏, 柳川真次, 増田敏一 : 近接施工にともなう既設シールドトンネルの補強工事と長期変状監視, トンネル工学報告集, 第 16 卷, pp. 381-388, 2006.11.
- 13) 上明戸昇, 田村琢之, 熊谷幸樹, 塩谷智基 : FGBBOTDR 総合技術による高精度ひずみ分布の解析手法の提案, 第 66 回土木学会年次学術講演会, VI-256, pp. 511-512, 2011.
- 14) [www.phosc.jp>cms>article](http://www.phosc.jp/cms/article) (光ファイバーセンシング振興協会ホームページ)
- 15) 藤田勇 : ケーソン中詰砂の流失監視への BOTDR の応用, 港湾空港技術研究所資料, No. 1095, p. 6, March 2005. ISSN1346-7840
- 16) ファイバーラボ株式会社 : レーザー線幅, <https://www.fiberlabs.co.jp>
- 17) 土木学会 : 構造力学公式集, p. 407, 2003.3.
- 18) 岡村宏一, 島田功 : 3 次元弾性問題の一数值解法とその応用, 土木学会論文報告集, 第 189 号, p. 34, 1972.3.
- 19) 望月秀太郎, 山本尚文, 湯上繁信, 矢野毅 : 幹線道路陸橋直下のシールドトンネルの施工, トンネルと地下, 第 52 卷 7 号, pp. 19-26, 2021.7.
- 20) 松岡元 : 土質力学, 森北出版, 第 1 版 19 刷, pp. 70-86, 2017.
- 21) 秋山成興 : 弹性体の力学, 新体系土木工学, 土木学会編, pp. 179-192, 1981.
- 22) 全国ヒューム管協会 : 技術資料ヒューム管設計施工要領, pp. 76-77, 2013.10.
- 23) 名古屋市上下水道局 : 標準構造図 (下水道編), P8, 2020.8.
- 24) 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, 第 397 号/VI-9, pp. 133-141, 1988.9.
- 25) 矢萩秀一, 入江健二, 大門信之, 中村兵次, 鈴木久尚 : 施工過程を考慮したシールドトンネルの応力計算方法, 土木学会論文集 F, Vol. 65, No. 2, pp. 128-147, 2009.4.
- 26) 新田耕司, 橋本正, 誉田孝宏, 西沢勝己, 塩谷智弘, 中廣俊幸 : 粘性土地盤における実測値に基づくシールド掘削時の応力解放率について, 第 31 回地盤工学研究発表会, pp. 2191-2192, 1996.
- 27) 濱戸内秀規, 新城俊也 : 石灰質砂と鋼材の摩擦特に及ぼす水分の影響, 琉球大学農学部学術報告, 第 48 号, pp. 103-112, 2001.
- 28) 足立紀尚 監修, 小山幸則, 鹿島豊, 須賀武, 高田正治, 木村宏 著 : 土圧式シールド工法—その理論と応用, pp. 46-59, pp. 162-163, 鹿島出版会, 2009.10.

(Received April 19, 2021)

(Accepted August 1, 2022)

## MEASURED DEFORMATIONS AND EXPECTED ANALYSIS CAUSED TO THE EXISTING TUNNEL DURING NEARBY CONSTRUCTION OF UPPER AND LOWER PARALLEL SHIELD TUNNELS

Yawji OKU, Hiroshi DOBASHI, Noriyuki HORICHI, Junichi NAGAYA,  
Seungik CHANG and Atsushi KOIZUMI

Twin large shield tunnels for highway services were excavated above and below an existed shield tunnel. The deformations of the existing tunnel were measured during nearby shield tunneling. The vertical and horizontal inner deformations of the existing tunnel were measured by specific fiber optics being called BOTDR. The deformations of the cross-section of the existing tunnel were detected with an accuracy of 0.05 mm. This paper is described remarkable knowledge of the vertical and horizontal deformations of the cross-section of the existing tunnel being influenced by upper and lower parallel shield tunneling. The authors also proposed the simple 2D FEM with the inclusion of the self-weight of the shield machine in the simultaneous excavation of vertical parallel shield tunnels. The construction data being corresponded to the shield tunneling are applied to analyze the changes of the deformations of the existing tunnel and nearby ground stresses. The results of the calculation showed good agreement with the deformations of the cross-section of the existing tunnel. As the result, we could propose a predictive calculation method for vertically parallel shield tunneling.