

鉄道営業線直下・小土被り条件における 併設シールドの掘進と回転・扛上

岩村 忠之¹・手塚 洋平¹・足立 邦靖²・高橋 寛³

¹京王電鉄株式会社 鉄道事業本部 工務部 調布工事事務所（〒182-0026 東京都調布市小島町 2-30-16）

²正会員 株式会社大林組 名古屋支店 URUP田原JV工事事務所（〒441-8074 愛知県豊橋市明海町 3-58）

³正会員 株式会社大林組 土木本部 生産技術本部 シールド技術部（〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2）

東京都、調布市および京王電鉄株式会社は、京王線の柴崎駅～西調布駅間約 2.8km 区間と相模原線の調布駅～京王多摩川駅間約 0.9km 区間の 2 区間を地下化する連続立体交差事業を施行している。本工事は、本事業のうち国領駅～調布駅間の上下線、延長 861m×2 本のシールド工事であり、①営業線直下を小土被り（最小土被り 4.7m/0.69D）で縦断方向に連続して掘進すること、②掘削対象地盤は立川礫層が主体で、バインダー分が少ないこと、③上下線トンネルの最小離隔が 400mm と超近接併設シールドであること、⑤営業線直下の回転立坑において、約 300t のシールドを回転・扛上し、Uターン施工を行うなどの特徴を有する。本稿では、このような条件下における泥土圧シールドの施工計画、施工上の課題と対策および施工結果について報告する。

キーワード： 泥土圧シールド、営業線直下、小土被り、併設シールド、回転・扛上

1. はじめに

東京都、調布市および京王電鉄株式会社では、京王本線の柴崎駅～西調布駅間約 2.8km の区間と相模原線の調布駅～京王多摩川駅間約 0.9km の区間を地下化する立体交差化事業を 2004 年 9 月より施行している。この事業では、3 つの駅部と 3 箇所の掘削部には開削工法を、駅間部ではシールド工法を採用して、現在、早期完成に向け工事を進めているところである。

表-1 に事業概要、図-1 に事業全体平面図を示す。

2. 工事概要

本稿の対象となる第 2 工区シールド工事は、国

領駅～調布駅間の 861m を泥土圧シールドにて施工する工事である。シールドトンネルは上下線 2 本を施工することとなるが、延長 1,722m（L=861m×2 本）を 1 台のシールドマシンで Uターン施工する。シールドトンネルは、国領駅～布田駅間では横並び配置であるが、将来の線増線（急行線）を調布駅に接続する計画であることから、調布駅では縦並び配置（上り線ホームが地下 3 階、下り線ホームが地下 2 階）となるため、布田駅～調布駅間において、横並びから縦並びへと変化する（図-2 参照）。

(1) 地質概要

土質縦断図を図-3 に示す。

シールド掘削対象地盤の大半を占める立川礫層（Tag）は、玉石状の礫（最大径 300mm）を含む砂礫層で、いずれの深度においても径 200mm クラス

表-1 事業概要

事業目的	鉄道と道路の連続立体交差工事・鉄道の地下化工事		
事業名称	京王電鉄京王線（柴崎駅～西調布駅）及び同相模原線（調布駅～京王多摩川駅間）連続立体交差工事		
事業区間	京王線の柴崎駅～西調布駅間の 2.8km、相模原線の調布駅～京王多摩川駅間の 0.9km 合計 3.7km		
構造形式	地下方式	駅施設	国領駅・布田駅・調布駅
事業者	東京都・調布市・京王電鉄株	発注者	京王電鉄株
事業期間	2004 年 9 月～2013 年 3 月		

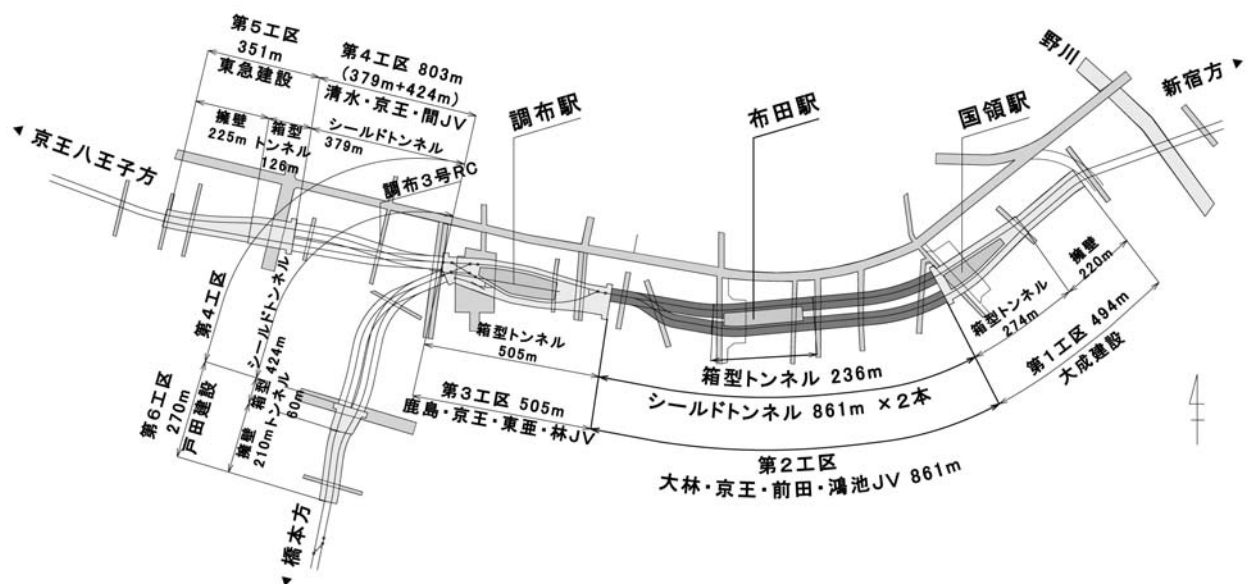


図-1 事業概要図

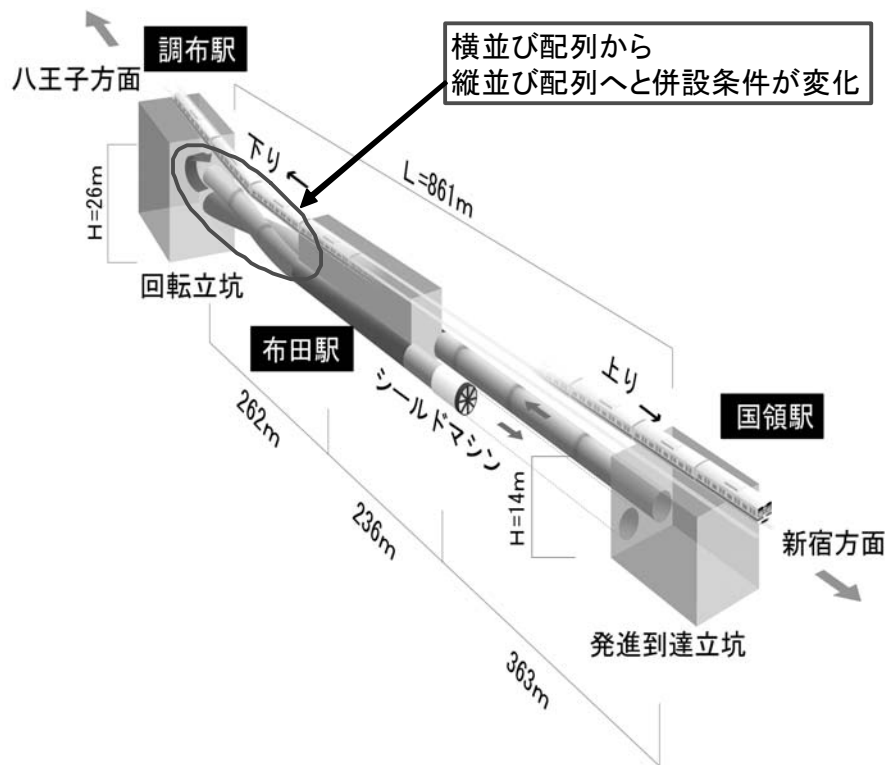


図-2 第2工区シールド概要図

の玉石が3～10個/m³程度混入し、バインダー分が5%以下という特徴を有している。また、透水係数は概ね $10^{-2} \sim 10^{-1}$ cm/s オーダーである。

上総層群砂質土層 (Ks1) は、比較的均質な細砂～粗砂が互層状をなしており、所々に粘性土薄層を介在する。N値は最上部で20～40程度を示すものの、概ねN値50以上の締まった地層である。上総層群粘砂性土層 (Ksc) は、固結シルトと砂の

互層で、N値は35～50以上を示し、多くは50以上の硬い地層である。

また、地下水位はGL-5.5～-7.3mであり、トンネル断面のスプリングラインから天端の間を季節により変動する。

(2) セグメント構造

第2工区シールド工事のうち地中切掘げにより

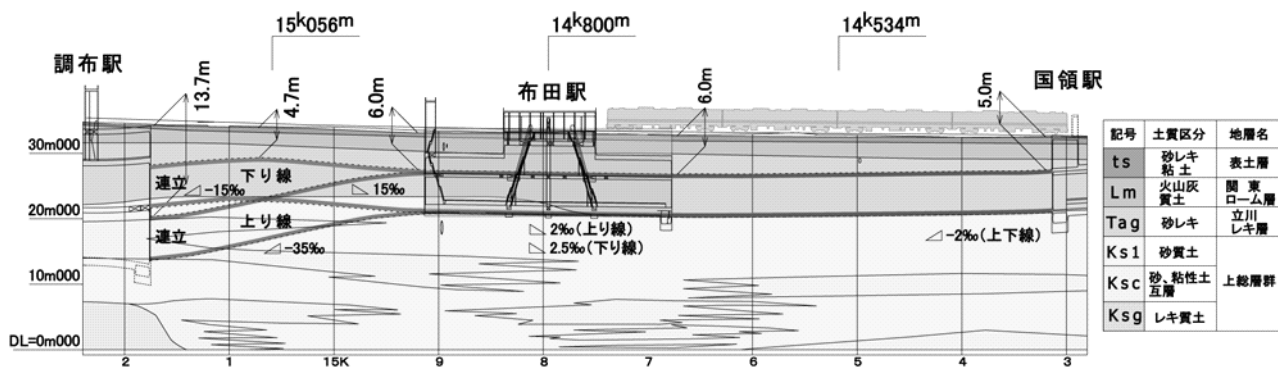


図-3 土質縦断面図

駅舎を築造する布田駅部ではダクトイルセグメントを、国領駅ー布田駅間および布田駅ー調布駅間ではRCセグメントを用いることで、二次覆工を省略する計画とした。

このうち、上下線2本のトンネルが左右の併設から上下の併設へと漸次変化し、土被りが13.7mまで深くなる布田駅ー調布駅間の上り線262m区間(185リング)においては、鉄道トンネルとして初めて鋼繊維補強高流動コンクリートセグメント(以下、SFRCセグメント)を採用した。本セグメントは、鋼繊維の補強効果により曲げ耐力の増加が見込めることに加えて、鉄道トンネルで重大な事故に直結するコンクリート片はく落の防止

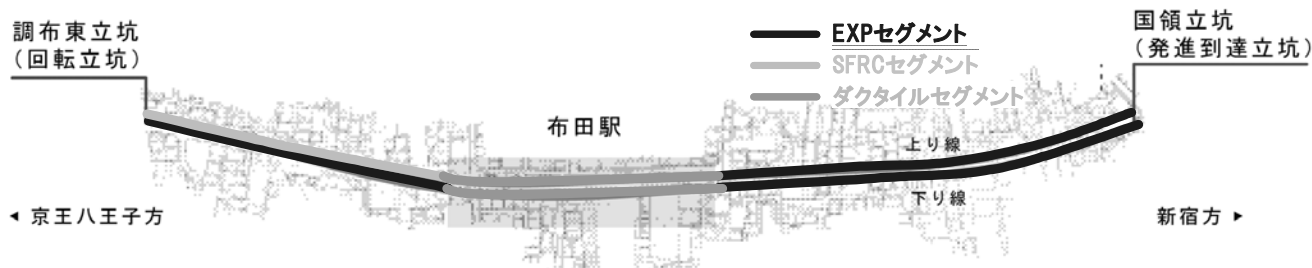
効果が期待できる。

さらに、一般部のRCセグメントにおいても、トンネル覆工のはく離・はく落を防止するため、セグメントの内表面に「耐アルカリガラス繊維シート」を設置したEXP(エキスパート)セグメントを採用した(図-4, 5参照)。

(3) 本工事の特徴

本シールド工事の特徴を以下に示す。

- ①営業線の直下を小土被り(最小土被り4.7m/0.69D)で縦断方向に連続して掘進
- ②掘削対象地盤は立川礫層が主体のため、バインダー分が少なく、最大礫径は300mmオーバー



種別	桁高 (mm)	幅 (mm)	継手構造
SFRCセグメント	300	1,400	リング間: プッシュグリップ セグメント間: 先付水平コッター
EXPセグメント			
ダクトイルセグメント	250	1,250	ボルト

図-4 セグメント割付図

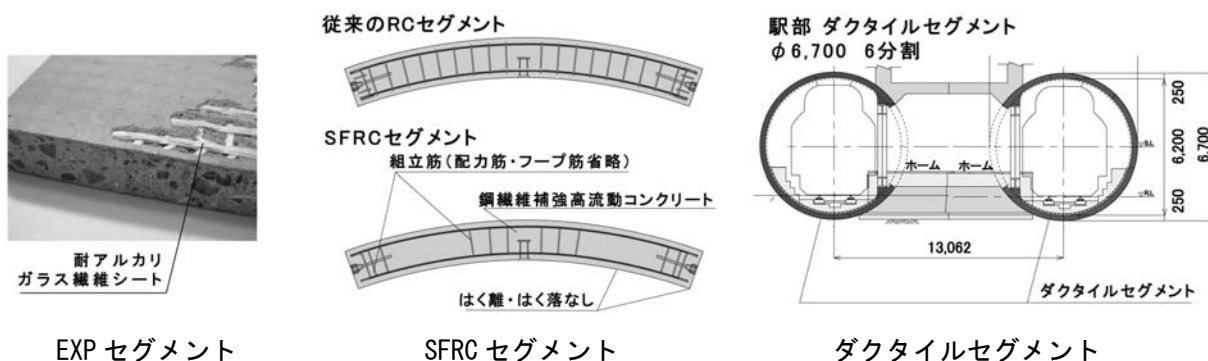


図-5 セグメント構造

- ③シールド掘削断面内に地下水位面が存在（断面に対して不飽和）し季節により変動
 - ④上下線のシールドトンネルの最小離隔が 400mm と超近接
 - ⑤中間駅となる布田駅部では、シールド通過後、並列シールドの地中切掘げにより駅舎を築造
 - ⑥営業線直下の調布東（回転）立坑において、約 300t のシールドを回転・扛上
- 以上に示すとおり、本工事はこれまで国内でも例を見ない極めて厳しい条件のシールド工事であった。

3. 営業線直下・小土被り・礫層掘進対策

(1) シールドの仕様

本工事におけるシールドの特徴およびその選定理由を以下に述べる。

①泥土圧シールド工法の採用

泥水式シールド工法による立川礫層での泥水の逸泥や噴発、小土被り掘進における地上への泥水の噴発への懸念、発進基地の用地が狭いという施工条件を総合的に考慮して泥土圧シールド工法を採用

②スポークタイプの採用

立川礫層の最大 300mm の礫を破碎しての掘進では、片道 861m の延長をカッタービット交換無しでは困難であると判断し、礫を破碎せずに取り込むこととして、開口率を大きく確保できるス

ポークタイプを採用

③大口径リボン式スクリーコンベヤの採用

最大礫径 300mm を余裕を持って取り込むことが可能となるように排土可能径 $\phi 500\text{mm}$ のリボン式を採用

④2次スクリーコンベヤの採用

確実にプラグゾーンを形成し、スクリーコンベヤゲートでの土砂の噴発を防止するため、2次スクリーコンベヤを採用

⑤セグメントからの同時裏込め注入方式

シールドからの同時裏込め注入方式を採用した場合、シールド本体テール部に設けられた同時裏込め注入装置がスキンプレートから突起し、礫層地山を乱し、地表面へ影響（沈下）を引き起こすことが懸念されるためセグメントからの裏込め同時裏込め注入方式を採用

⑥二股構造形状保持装置の採用

セグメントからの同時裏込め注入方式の場合、形状保持装置とセグメントの裏込め注入孔の位置の干渉により、1 リング後方のセグメントから裏込め注入を行うことが多いが、できる限り早いタイミングかつ発生するテールボイドの近傍から裏込め注入を実施して礫層の崩れ等による地表面の影響を小さくするために二股構造形状保持装置を採用

⑦セグメントに二重止水裏込め注入孔を採用

従来の簡易逆止弁と取り外し可能な高止水逆止弁の二重構造として止水性を向上し、再注入の必要が生じた場合には高止水逆止弁を取り外し

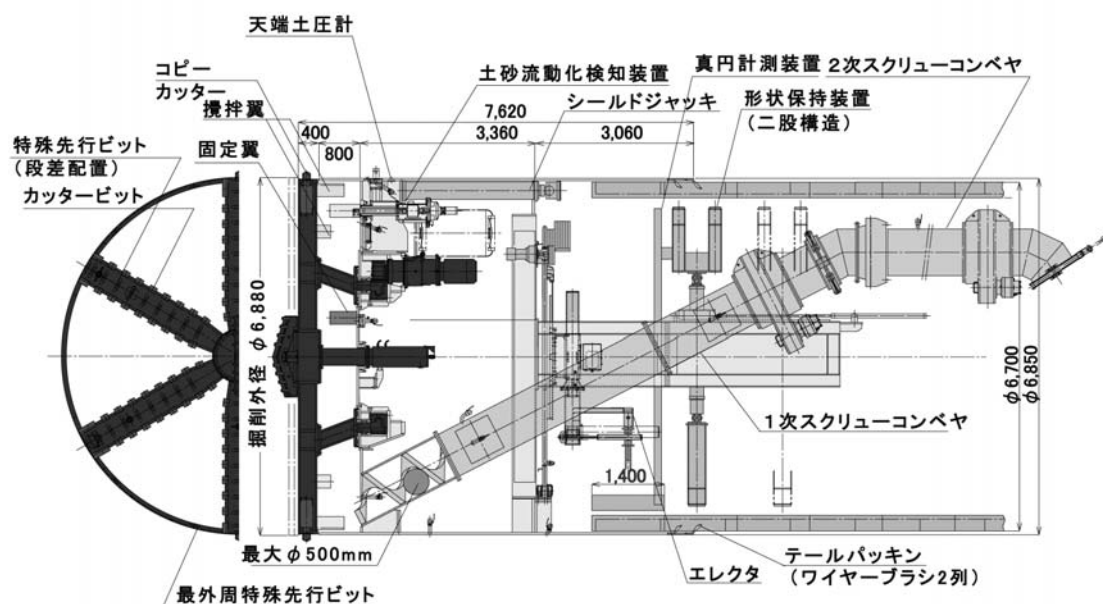


図-6 シールド構造概要図

表-3 管理土圧基準値一覧表

土圧計位置	管理対象	下限値	上限値
上部	正	有効静止土圧＋地下水圧＋予備圧＋列車動的荷重 予備圧；先行 30～40kPa，後続 50～60kPa 列車動的荷重；上部 2kPa，中央部 1kPa	有効土被り圧
中央部	副		設定なし
下部	補助	上・下限値は設けず チャンバとスクリーコンベヤの閉塞防止のための目安として監視	

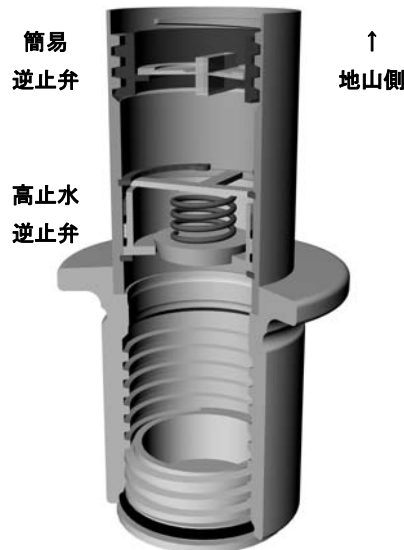


図-7 二重止水裏込め注入孔

注入することを可能とするため（図-7 参照），二重止水裏込め注入孔を採用

また，礫層を長距離掘進することに加えて，発進部および到達部にシールドで直接切削可能なSEW壁を採用しているため，特殊先行ビットを段差配置することで，カッタービットの耐久性を向上し，切削性能を維持・確保することとした。

(2) 切羽の安定対策

a) 掘削用添加材

主たる掘削対象地盤である立川礫層はバインダー分が不足しているため，ベントナイト系加泥材を添加することでこれを補った。また，気泡を添加することにより，チャンバ内の塑性流動性を安定化すると同時にベルコンでの排出に適した排土性状を確保し，合わせてカットトルクと推力の低減を図ることとした。

b) 土砂流動管理技術の適用

シールド施工時の切羽の安定保持に必要なチャンバ内土砂の塑性流動状態を定量的に評価・把握するため，リアルタイムに視覚的に捉えることが可能な「チャンバ内の土砂流動管理技術」を導入した（図-8 参照）。

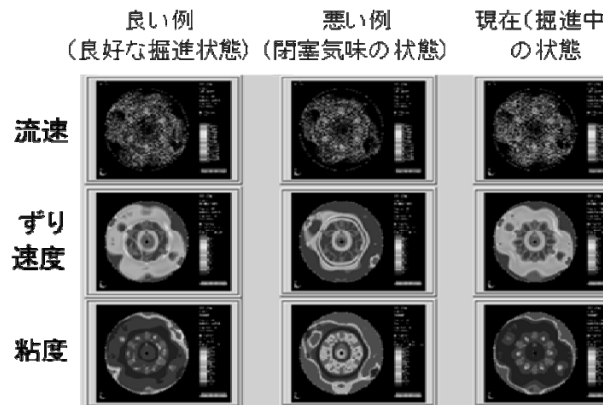


図-8 土砂流動管理技術

c) 切羽土圧管理

小土被り条件下では，切羽土圧の検討の指標となる，静止土圧や有効土被り圧，主働土圧が土被りの大きい条件に比べて小さくなる。そのため，切羽土圧の許容幅（有効土被り圧－静止土圧や静止土圧－主働土圧）も狭くなり，わずかな管理誤差でも周辺地盤や列車の運行に影響を与える可能性がある。

このように，従来以上に綿密な切羽土圧の調整が必要となるため，チャンバ内に土圧計を6箇所（上部・中央・下部各2箇所）配置し，表-2に示すような管理基準値を設定した。

(3) 計測管理

列車運行の安全確保を目的として，掘進状況を正確かつ継続的に把握するため，24時間の自動計測体制で各種計測機器による情報化施工を行うこととした。

a) トライアル計測

周辺地盤および営業線に影響を与えない掘進管理方法を早期に確立するため，発進立坑から約90mまでの区間（営業線の直下に侵入するまでの区間）をトライアル掘進区間とした。トライアル計測断面は3断面設置し，各種計測装置によりデータを収集し，掘進管理に反映させることとした（図-9）。

b) 本掘進区間における軌道・地盤計測

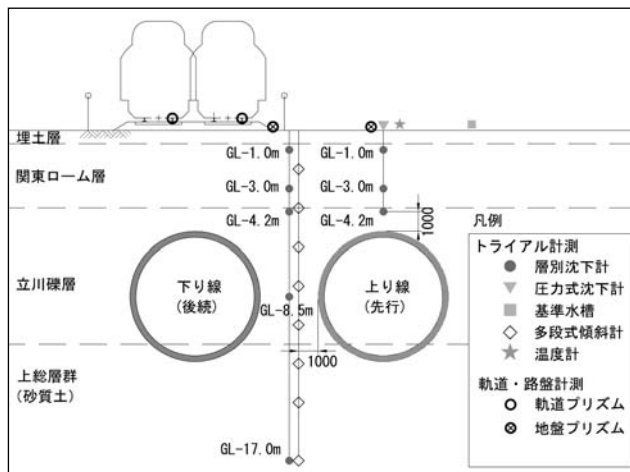


図-8 トライアル計測断面

軌道の安全確認と、地盤の変状を掘進管理ヘリアルタイムにフィードバックし地盤変状を最小限に抑えるため、トータルステーションによる自動計測を実施した。測定箇所は、上下線の内軌側レールとシールド直上地盤とし、測定ピッチは 10m とした。

(4) シールド掘進結果

上記、各対策を施し、掘進を行った結果を示す。

a) 添加材管理結果

発進当初は気泡を主体として添加材を使用した。切羽の安定が困難となったため、ベントナイト系加泥材を主体（気泡を補助的に併用）として使用する計画に変更したところ、切羽の安定を確保することができた。また、上総層群区間および地下駅構築のために先行薬液注入を実施した地中切上げ区間の掘進においては、気泡での掘進が適していた。

添加材の量および注入位置は、土砂流動管理技術のリアルタイムシミュレーション結果に基づき決定した。

b) 土圧管理結果

トライアル計測において土圧管理方法を確立し、

軌道・地盤計測結果をフィードバックしながら切羽土圧管理結果を行った。加えて、掘進停止時におけるチャンバ内土圧の減少によって直上の営業線に影響を及ぼすことがないよう、土圧が減少し管理土圧下限値を下回ると、ベントナイト系加泥材を注入して土圧を回復させる「土圧保持システム」を採用した。その結果、営業線直下において変位量を概ね管理目標値の $\pm 5\text{mm}$ 以内に抑制でき（図-9）、列車の運行を妨げることなく掘進を完了することができた。

なお、掘進開始当初は直上の列車動的荷重の影響が懸念されたが、土圧計による実測値はシールド天端で約 $2\sim 3\text{kPa}$ と非常に小さいものであった。これは軌道のバラスト道床がクッション材の役割を果たしたためではないかと推察される。

4. 近接施工対策

(1) セグメント計測

本工事では、双設されるトンネル間の離隔が極めて小さいため、後続トンネル（下り線）掘進時の切羽土圧や裏込め注入圧などが、先に構築された先行トンネル（上り線）に影響を及ぼすことが懸念された。そこで図-10～12 に示すように上り線のセグメント計測を行い、掘進管理にフィードバックするとともに、後続トンネル掘進の影響が大きいと判断される場合には、仮設支保工の設置など、先行トンネルの補強を検討する計画とした。

(2) 近接施工実施結果

後続トンネルが計測断面①（トンネル離隔 550mm）を通過する際に得られたセグメントの計測結果から、上下線のトンネルが最も近接する計測断面③（トンネル離隔 400mm）の位置でのセグメントの応力状態を予測した結果、特別な対策は不要であると推定された。さらに計測断面②（トンネル離隔 1,400mm）にて上記推定の妥当性を確認

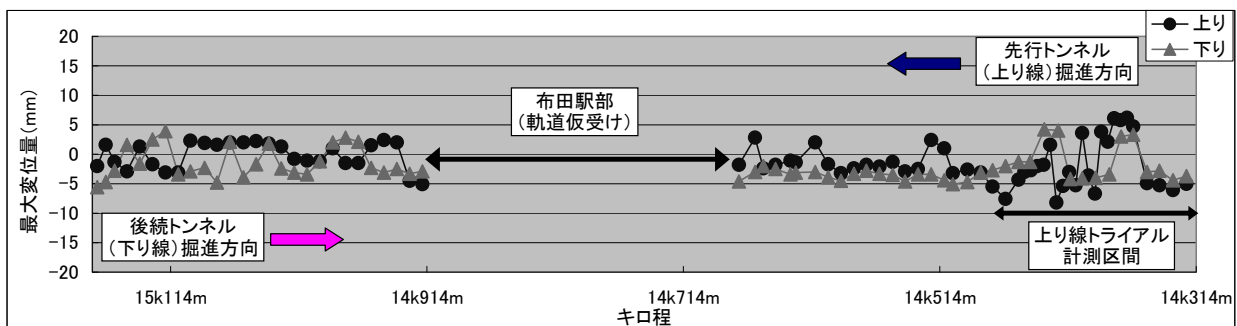


図-9 地盤変状管理結果

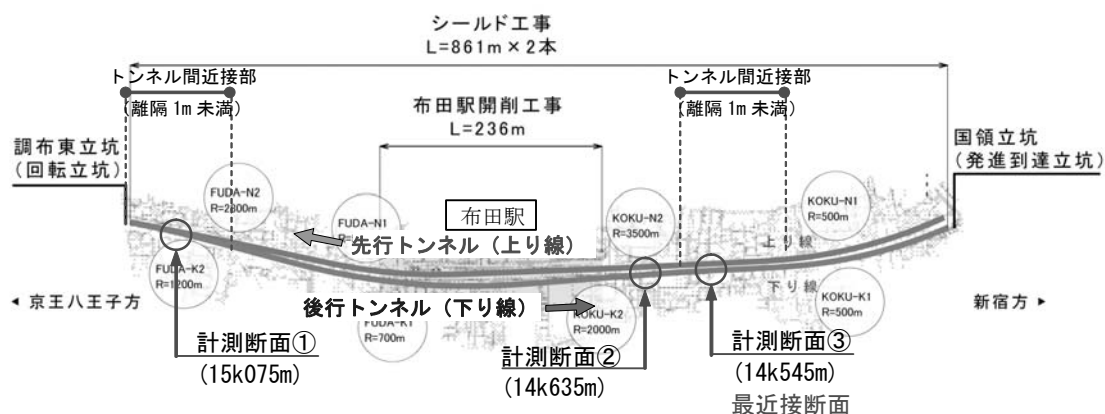


図-10 セグメント計測位置平面図

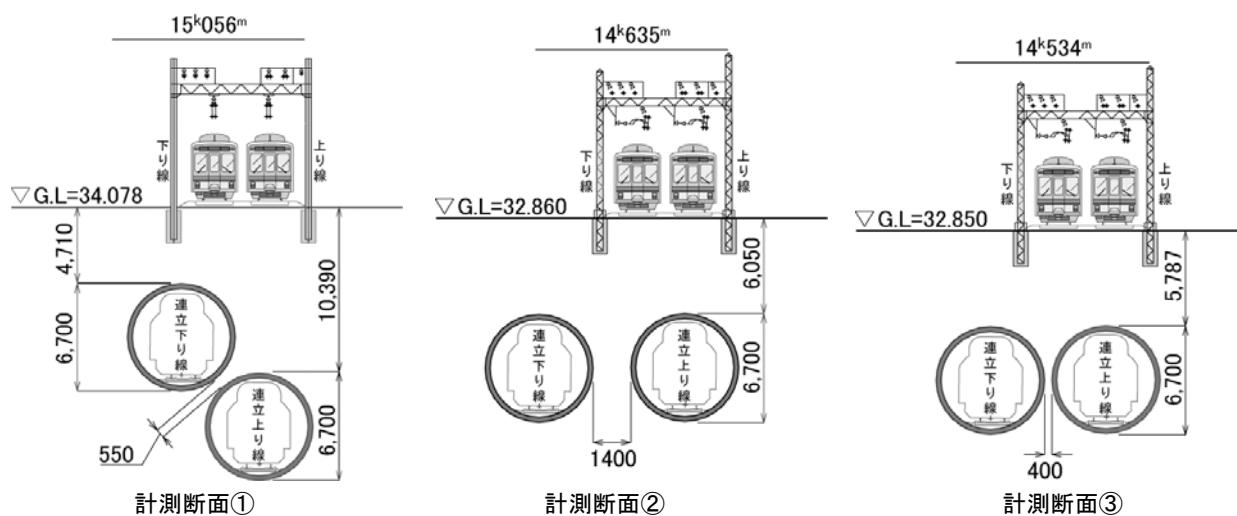
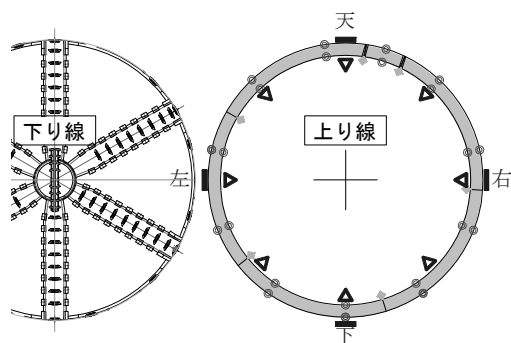


図-11 近接状況説明図



計測機器			計測位置
凡例	計器名称	計測項目	
—	パッド式土圧計	外力	・天端、下端、側面 (右・左)
◎	ひずみゲージ	鉄筋応力	・各ピース内・外周の主鉄筋 2箇所ずつに貼付
△	プリズム (トータルステーション用)	内空変位	・1断面につき8点設置
◆	変位計	継手目開き	・各継手に2箇所設置

図-12 セグメント計測断面図

して、計測断面③を通過した結果、先行トンネルに有害な影響を及ぼすことなく、当該箇所の施工

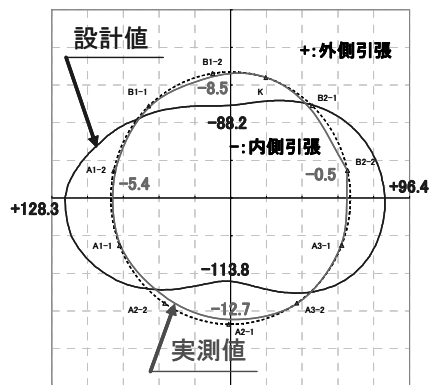
を実施できた。なお、ひずみゲージの測定値から推定した断面力は軸力が卓越しており、セグメントの応力状態は設計値に比べて安全側であることを確認している (図-13 参照)。

5. シールドの回転・扛上

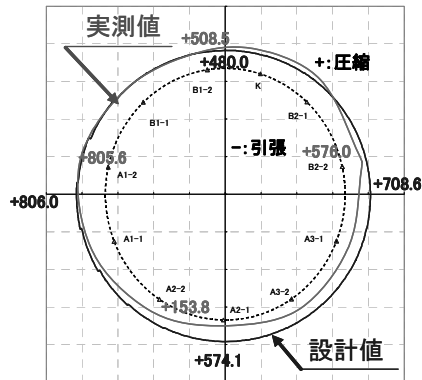
(1) シールドの回転

シールドの回転には、乾性摩擦低減材による工法を採用した。具体的には、回転架台接触面に乾性摩擦低減材を塗布することで、回転時の摩擦力を低減する方法であり、乾性摩擦低減材には二硫化モリブデン (摩擦係数 0.04) を主剤とした乾性被膜潤滑剤を使用した。これにより、湿式のグリスのように落下による現場環境の悪化が生じなかった。

回転架台は、下部より敷桁、受桁、敷鉄板、到達架台から構成され、回転面を受桁と敷鉄板の間に設けた (図-14 参照)。回転中心に移動式センタ



【曲げモーメント M (kN-m)】



【軸力 N (kN)】

図-13 セグメント計測結果

ーピンを設け、容易に回転できる構造とした。

架台を含むシールドの重量は約 300 t であり、回転作業に必要な牽引力はおよそ 15 t であった。本工法での摩擦係数は 0.05 程度と推測され、これは二硫化モリブデンの摩擦係数とほぼ一致し、計画通りに安全に施工することができた。

(2) シールドの扛上

回転立坑が営業線直下であり、加えて空頭が小さいため、シールド上部に吊り桁を設置できない

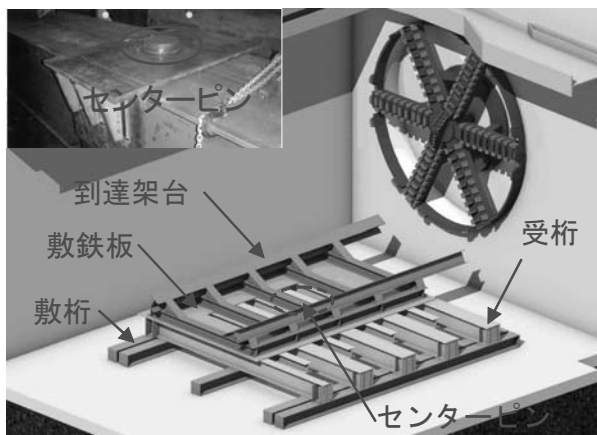


図-14 シールド回転状況

施工条件であった。このため、シールドの側面に支柱・ジャッキ等の反力設備を設置し、これによりシールドを載せた受桁を吊り上げる「吊上げ方式」を採用して、シールドを約 8m 扛上させた (図-15 参照)。

使用した機材は、センターホールジャッキ (揚重能力 700kN, ストローク 200mm) と PC 鋼より線 (φ28.6mm) 10 セットで、各ジャッキにはストローク計を装備した。また、補助ストランドを装備し、ジャッキトラブルや PC 鋼より線の破断による万一の落下に備えることとした。

1 サイクルあたりの扛上量を 200mm, 上昇速度を 100mm/分とし、ジャッキストローク量、ジャッキ荷重のデータを比較演算して吊り上げ量の相対差が 5 mm 以内に収まるよう自動制御を行った。

受桁および支柱の剛性向上と全ジャッキの一元管理により、各受桁・ジャッキの作用荷重が均等になるとともに変形も抑制できた。さらに、ジャッキ操作に伴うシールドの横ぶれも発生せず、懸念されたシールドと支柱材の接触もなく、安全に扛上作業を完了することができた。約 8m の扛上に要した時間は、6.5 時間程度 (段取等を除く) と極めて短時間で安全に施工することができた。

6. おわりに

本シールド工事は、平成 21 年 10 月にシールド掘進工を完了した。本稿が同様な施工条件下での施工計画の一助となれば幸いである。

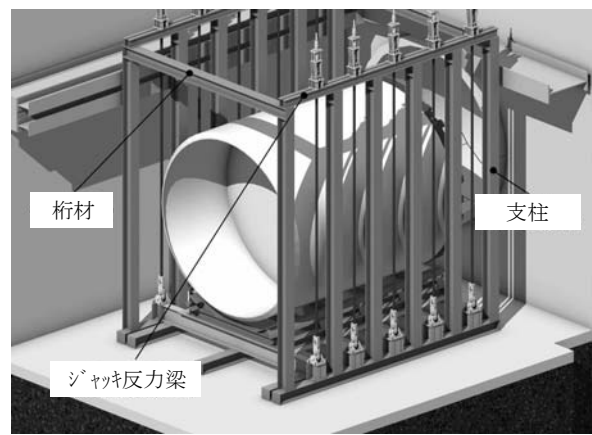


図-15 シールド扛上状況