

営業線直下における小土被り，超近接シールドトンネルの計測管理と施工

寺田 雄一郎¹・手塚 洋平²・沼澤 憲二郎³・水上 博之⁴・久末 賢一⁵

¹正会員 京王電鉄株式会社 鉄道事業本部 工務部長 (〒206-8502 東京都多摩市関戸 1-9-1)

E-mail:yuichiro.terada@keio.co.jp

²京王電鉄株式会社 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)

³東京地下鉄株式会社 鉄道本部 改良建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)

⁴パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通技術本部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿 2-7-1)

⁵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)

「調布駅付近連続立体交差工事第2工区シールド工事」は、国領駅～調布駅間の上下線、延長861m×2本を泥土圧シールドにて築造する工事である。本工事の特徴は、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く、最大礫径が300mmオーバーであること、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）し季節により変動すること、④上下線トンネルの最小離隔が400mmと超近接シールドであること、⑤営業線直下の立坑で、約300tのシールドを回転、扛上し、Uターン施工を行うことである。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。

Key Words : Earth pressure balanced TBM, settlement, shallow earth cover, parallel tunnel, monitoring

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。

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本であり、延長1,722m（L=861m×2本）であり、1台のシールドを調布駅の立坑で回転、扛上し、Uターン施工する。シールドトンネルの配置は、国領駅～布田駅間では横並びであるが、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（上り線ホームが地下3階、

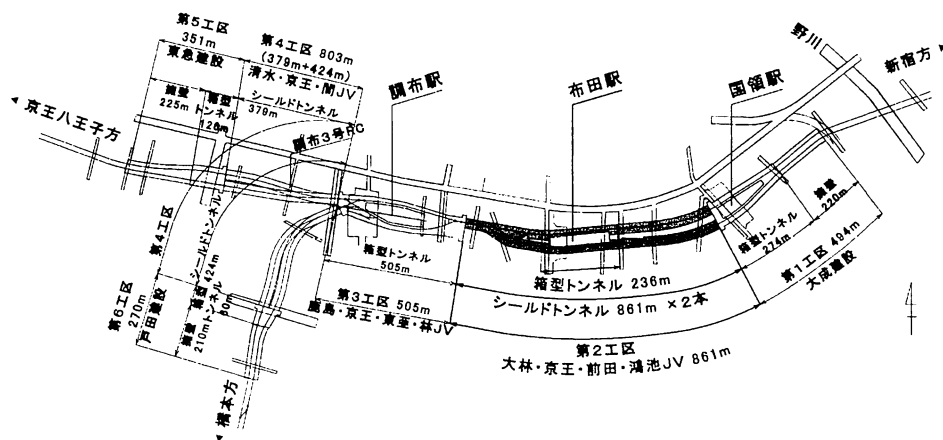


図-1 事業概要図

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	京王電鉄株式会社
事業期間	2004年9月～2013年3月		

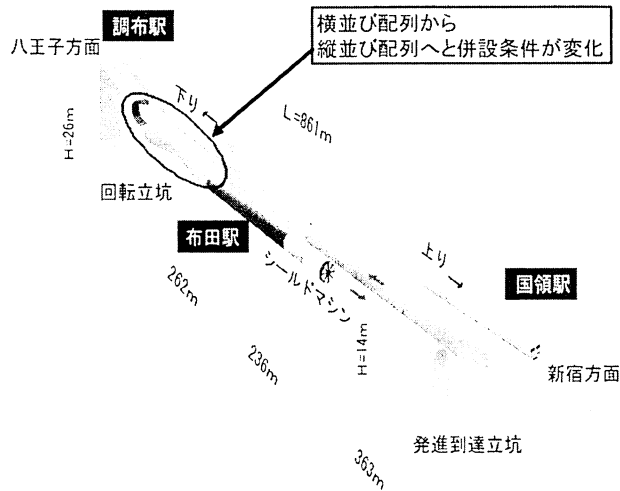


図-2 第2工区シールド概要図

下り線ホームが地下2階)となる。そのため、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程度の玉石が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10⁻²～10⁻¹cm/s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、所々に薄い粘性土層を介在する。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-5.5m～-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。

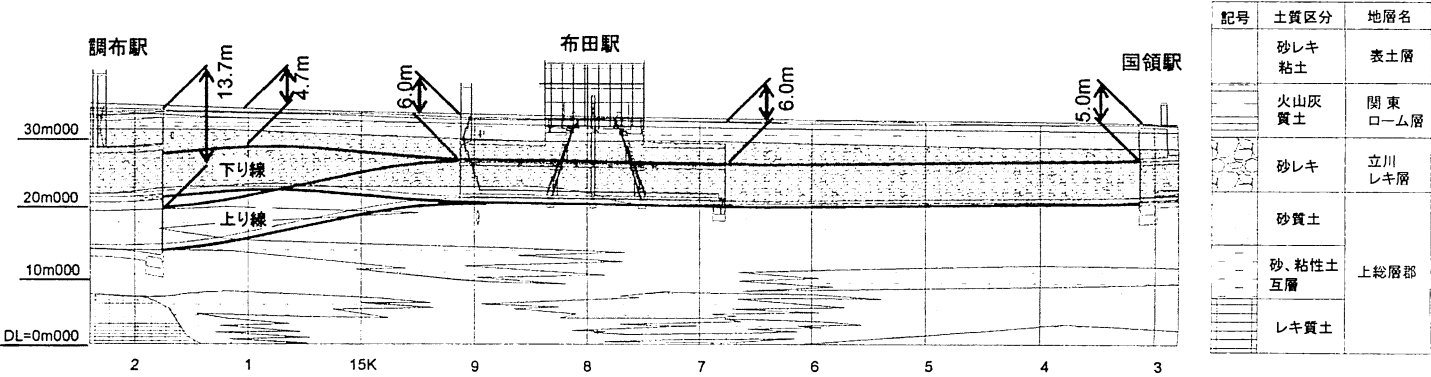
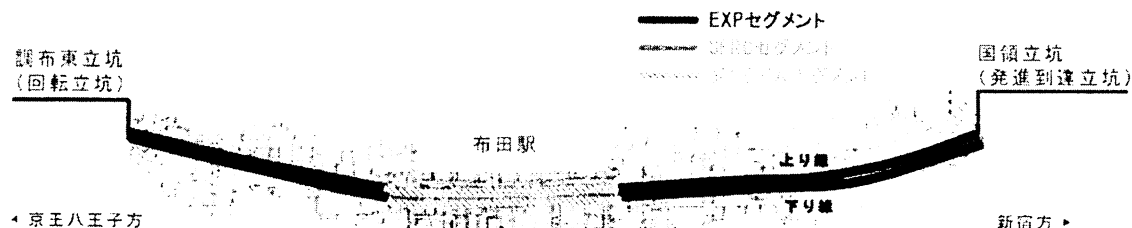
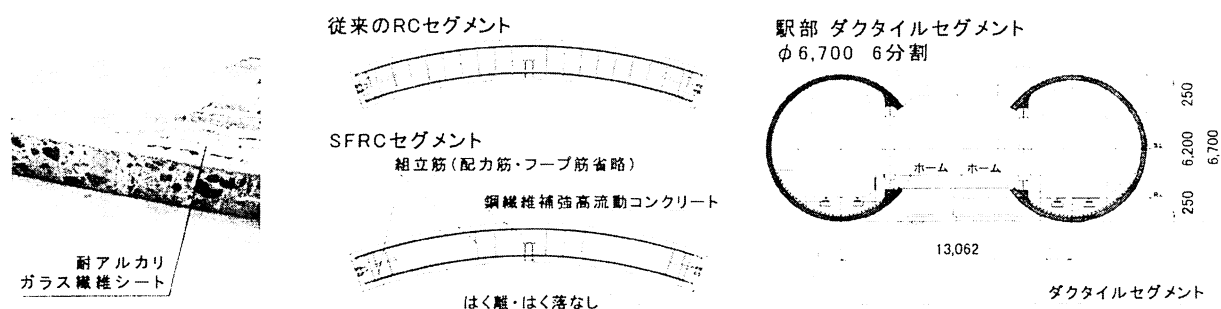


図-3 土質縦断図



種別	桁高 (mm)	幅 (mm)	継手構造
EXP 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：先付け水平コッター
SFRC セグメント			
ダクティルセグメント	250	1,250	ボルト

図-4 セグメント割付図



EXP セグメント

SFRC セグメント

ダクティルセグメント

図-5 セグメント構造

(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駅舎を築造する布田駅部ではダクティルセグメントを、国領駅ー布田駅間および布田駅ー調布駅間では内面平滑型のRCセグメントを用い、二次覆工は施さない。

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)¹⁾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ある。

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」²⁾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。

- 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
- 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

- 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
- 上下線のシールドトンネルの最小離隔が400mmと超近接
- 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
- 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。図-6にシールド構造概要図を示す。

a) 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、小土被り掘進における地上への泥水の噴出への懸念、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した。

b) スポークタイプの採用

立川礫層の最大300mmの礫を破碎する掘進方法では、

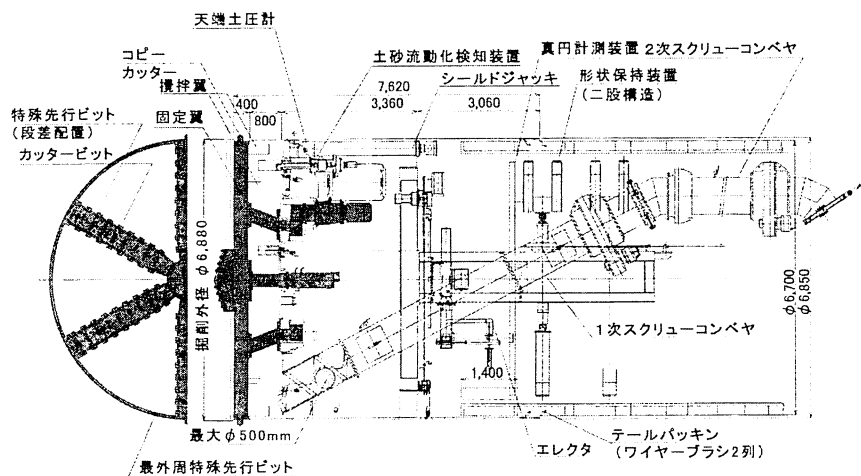


図-6 シールド構造概要図

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した。

c) 大口径リボン式スクリーコンベヤの採用

最大径 300mm 以上の礫に対して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 $\phi 500\text{mm}$ のリボン式を採用した。

d) 2 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した。

e) 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、地表面への影響（沈下）が懸念されるためセグメントからの同時裏込め注入方式を採用した。

(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一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させると同時に連続ベルトコンベヤでの排出に適した排土性状を確保し、合わせてカッタートルクの低減を図ることとした。また、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。

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評価、把握するため、リアルタイ

良い例 (良好な掘進状態) (閉塞気味の状態) 現在(掘進中の状態)

流速



ずり
速度



粘度



図-7 土砂流動管理技術

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」③を導入した (図-7 参照)。

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。したがって、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。また、営業線直下を掘進するため沈下および隆起両方向に対して高い精度での掘進管理が要求された。そのため、従来とは異なり、今回は上部土圧計を正とし、上限値を有効土被り圧、下限値を静止土圧＋地下水圧＋予備圧＋列車動的荷重として切羽土圧の管理を行った。

さらに、緻密な切羽土圧の管理が必要となるため、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。

表-2 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	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	上限値，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	

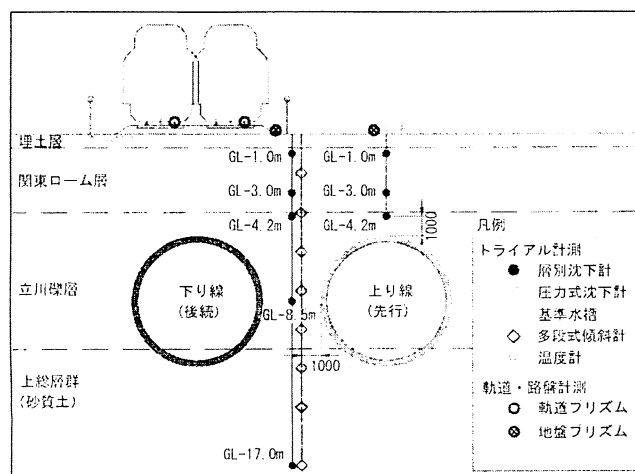


図-8 トライアル計測断面

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-8）。

b) 本掘進区間における軌道・地盤計測

軌道の安全確認と、地盤の変状を掘進管理へ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ため、切羽の安定が困難となったため、ベントナイト系添加材を主体（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、「チャンバ内の土砂流動管理技術」のリアルタイムシミュレーション結果に基づき調整した。

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の管理を行った。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±5mm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。

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距離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、11に示す位置（以下、計測断面①～③）の先行トンネルのセグメントにあらかじめ鉄筋のひずみゲージを設置し、先行トンネルに作用する断面力を計測した。また、その計測結果を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

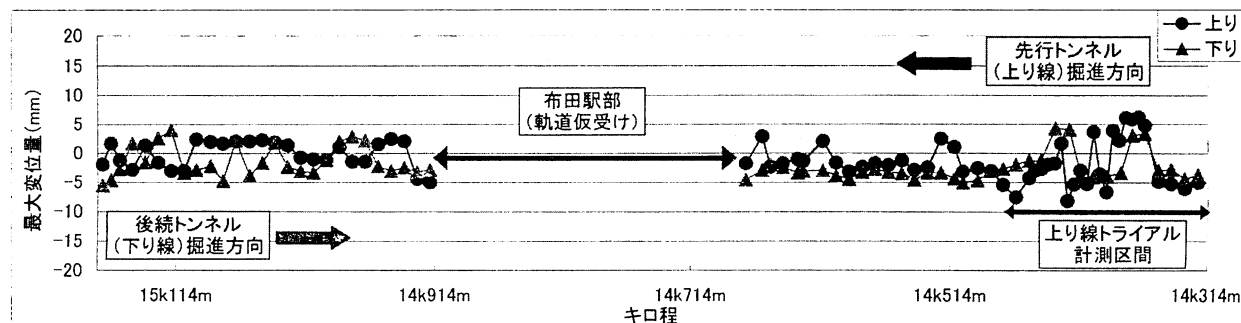


図-9 地盤変状管理結果

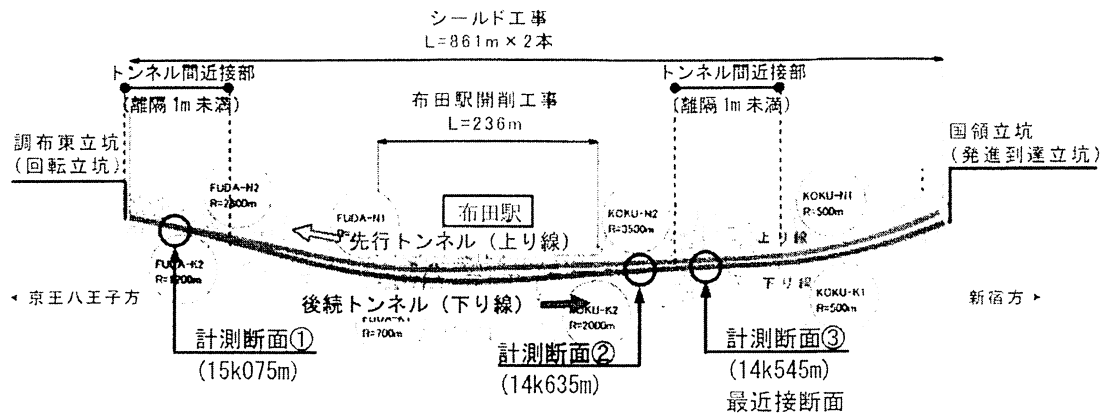


図-10 セグメント計測位置平面図

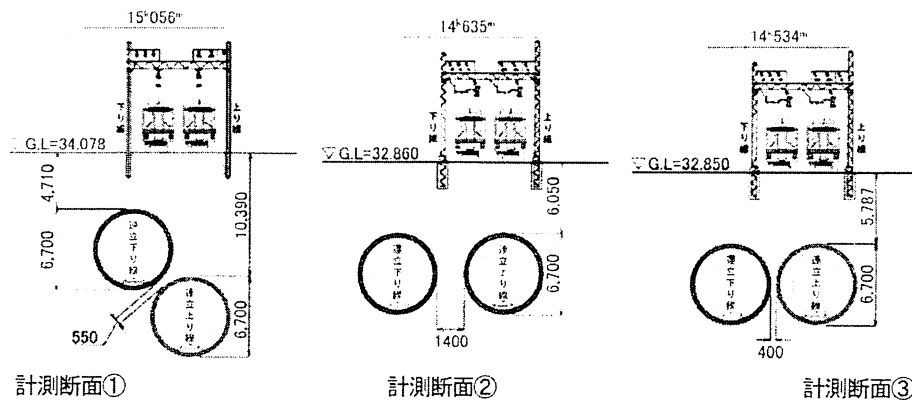


図-11 近接状況説明図

保工の設置など、先行トンネルの追加補強を検討することとした。

(2) 近接施工結果

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、当該箇所を施工できた。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-12 参照）。

(3) トンネル相互作用の考察

併設条件の異なる計測断面①～③において、シールド通過時の施工時荷重による断面力の増分で比較検討を行い、近接施工による先行トンネルへの影響を確認した。ここに、シールド通過時の断面力の増分は、先行トンネルに土水圧のみが作用している時に計測された断面力と、シールド通過時に計測された断面力との差分から求めた。

a) 位置関係による影響（計測断面①、③の比較）

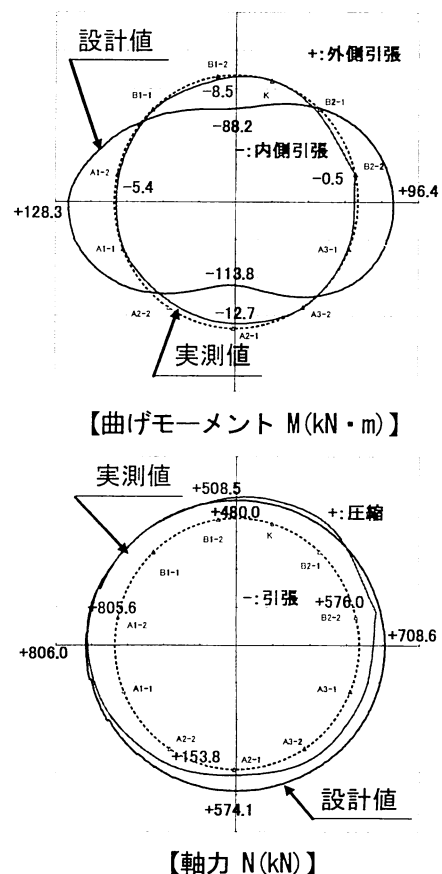
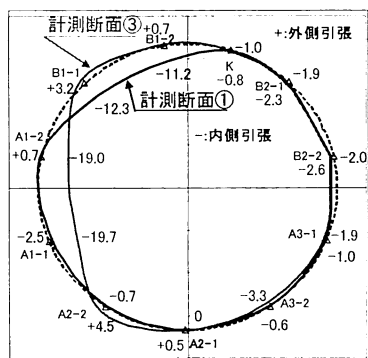


図-12 セグメント計測結果

併設位置関係の異なる計測断面①、③でのシールド通過時の断面力の増分を比較することによって、併設位置関係の違いによる施工時における先行トンネルの挙動の差異を確認した。計測断面①は先行トンネルとの離隔が550mm、計測断面③は400mmであり、ともに上り線との離隔の距離が1m未満の超近接区間であるが、計測断面①では先行トンネルに対してシールドが斜め上を通過し、計測断面③では横並びに通過する条件であり、併設位置関係が異なっている（図-11 参照）。図-13に計測断面①、③において施工時の断面力の増分を比較した結果を示す。計測断面①では先行トンネルの左上側に正曲げが発生しているのに対して、計測断面③では先行トンネルの左側部に正曲げが発生しており、それぞれ最も近接した箇所で大きな影響を受けていることがわかる。このことから、併設位置関係の違いによる施工時における先行トンネルの挙動には差異があることが確認できた。また、正曲げが発生した箇所は異なるが、シールドの施工時荷重が地盤を介して伝達し、シールドとの併設する方向との反対へ先行トンネルが押される傾向があることが分かった。ただし、シールドの通過によって先行トンネルに作用する断面力は僅かであり、いずれも先行トンネルに損傷が生じるレベルとはならなかった。



【曲げモーメント M(kN・m)】

図-13 併設位置の関係による比較 (①-③)

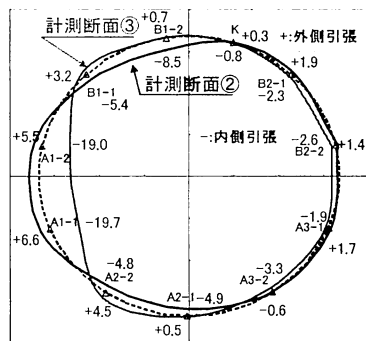
b) 離隔の距離による影響 (計測断面②、③の比較)

計測断面②、③でのシールド通過時の断面力の増分を比較することによって、離隔の距離が先行トンネルに与える影響の比較を行った。計測断面②、③はともにシールドが先行トンネルに対して横並びで通過するため、併設位置の関係は同じ条件であるが、計測断面②では1400mm、計測断面③では400mmで、先行トンネルとシールドとの離隔の距離が異なる（図-11 参照）。

図-14に計測断面②、③において施工時の断面力の増分を比較した結果を示す。計測断面②においても先行トンネルの左側部に曲げが発生しており、計測断面①、③で得られた結果と同様に最もシールドと近接する箇所で大きな影響を受けていることが分かる。しかし、計測断

面②ではシールドと併設する先行トンネルの左側部が引っ張られる傾向であり、計測断面①、③とは逆の結果が得られた。計測断面②では、計測断面①、③と比較して離隔の距離が長いので、シールド通過時の施工時荷重が緩和されたと考えられる。そのため、地山が掘削されたことによって減少した先行トンネルの周囲の地盤応力が、施工時荷重よりも上回り、計測断面②において先行トンネルの左側部に負曲げが発生したと想定される。

以上の結果から、シールド通過による先行トンネルへの影響は従来考えられている地盤応力の減少だけではなく、施工時荷重も大きく影響するが、併設位置の関係と離隔の距離によってその影響が異なるため、適切に評価する必要があることが分かった。



【曲げモーメント M(kN・m)】

図-14 離隔の距離による比較 (②-③)

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。これは、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材を使用した。これにより、シールド引上げ作業の際に湿式のグリスのように落下することがなく、現場環境の悪化が生じなかった。

回転架台は、下部より敷衍、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-15 参照）。回転中心に移動式センターピンを設け、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300tであり、回転作業に必要な牽引力はおおよそ15t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

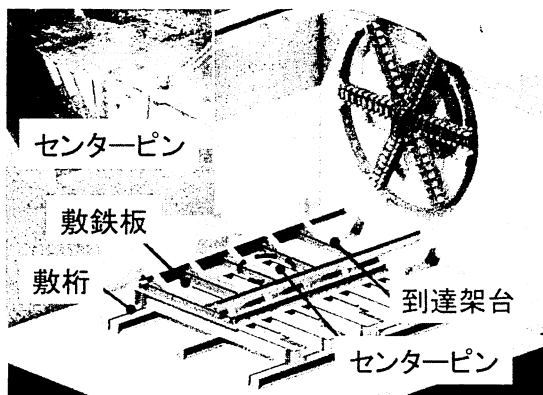


図-15 シールド回転状況

め、シールド上部に吊り桁を設置できない施工条件であった。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-16 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（φ 28.6mm）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。

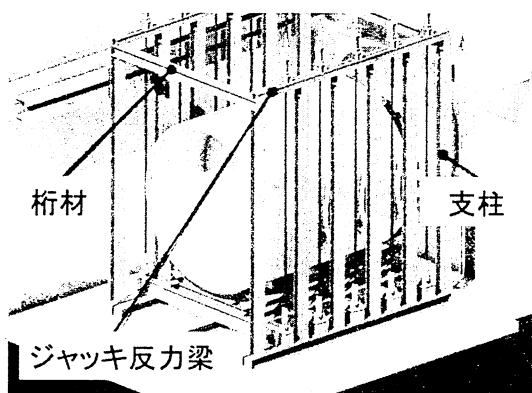


図-16 シールド扛上状況

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、受桁、支柱の変形も抑制できた。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

本工事は、小土被り、営業線直下、掘削対象地盤の大部分が礫層、トンネル相互が超近接という条件に示されるようにシールド工事としては、難工事であった。しかし、シールドや添加材の適切な選定、土砂流動管理技術の適用、切羽土圧の管理手法、計測管理などを検討したうえで慎重に施工を行ったことによって、トンネルの構築を完成させることができたと考えている。

また、近接施工においては離隔の距離や併設位置の関係などの併設条件と施工時荷重が大きく影響することが分かった。今後は、ここで得られた結果について解析を行い、シールドトンネルの近接施工時における挙動について更なる検討を行っていくこととする。

さらに、シールドの回転、扛上においては営業線直下の狭隘な空間の中での難しい施工であったが、施工方法の綿密な計画、十分な監視体制の中で施工を行った結果、計画通り安全に施工することができた。

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。

参考文献

- 1) 吉田公宏ら：鋼繊維補強高流動コンクリートの鉄道トンネルへの適用，第 64 回年次学術講演会講演概要集，6-031
- 2) 清水幸範ら：鉄道トンネルへの剥落防止セグメントの適用，第 62 回年次学術講演会講演概要集，6-104
- 3) 日野義嗣ら：チャンバー内土砂流動管理技術を用いた鉄道営業線直下におけるシールド施工，第 64 回年次学術講演会講演概要集，6-013

Construction of railway tunnel with small earth cover and small clearance between twin tunnels under the existing railway

Yuichiro Terada, Youhei Teduka, Kenjiro Numazawa and Hiroyuki Minakami

The twin tunnels for up and down railway of Keio Line have been excavated by EPB TBM in the grade separation project, which have a length of 1722 meters between Kokuryo and Chofu stations. These twin tunnels were constructed under the following conditions 1) extremely shallow earth cover, 2) directly below the existing railway in service on the ground, 3) excavation of gravel formation with 300mm cobbles in diameter, 4) very small clearance between the twin tunnels and 5) arrival and re-departure of TBM in the vertical shaft under the existing railway. This paper reports the construction method, technical issues, and the results of actual construction of this tunneling work under these severe conditions.