

営業線直下における小土被りシールドの 施工と品質管理

QUALITY CONTROL ON SHIELD TUNNELS BORED BENEATH OPERATIVE RAILWAYS UNDER A SHALLOW COVER

岩村 忠之¹・手塚 洋平²・西井 成実³・磯部 哲⁴

Tadayuki Iwamura¹, Youhei Tezuka², Narumi Nishii³, Satoru Isobe⁴

The project is to construct railway tunnels by an EPB shield machine(ϕ 6700mm), from Chofu Station toward the west, as parts of Keio Line and Sagami-hara Line. It is very challenging construction and is featured in the following points: 1) Three times of U-turns of a shield tunneling machine, 2) Tunnel boring beneath operative railways with shallow overburden for the entire tunnel sections, 3) Two tunnels bored in super-close distance, 4) A small radius curve alignment and 5) Tunnel boring through gravel layers ($D=300$ mm). The paper reports the planning, with anticipated difficulties and countermeasures, and the records of construction, including the quality control under the above circumstances.

Key Words : earth pressure balanced shield tunneling, railway, just under train operating, shallow overburden, quality control

1. はじめに

東京都，調布市および京王電鉄㈱では，京王線の柴崎駅～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の区間とを地下化する立体交差化事業を2004年9月より行っている．この事業により，合計18箇所の踏切道，および8箇所の都市計画道路の立体化が図られる．地下構造物築造工法としては，調布駅を含む3か所の駅部および3か所の掘割り部には開削工法，駅間にはシールド工法を採用されている．図-1に事業全体平面図，表-1に事業概要を示す．

表-1 事業概要

事業名称	調布駅付近連続立体交差工事
事業区間	京王線 2.8km (柴崎駅～西調布駅間)
	相模原線 0.9km (調布駅～京王多摩川駅間)
	合 計 3.7km
構造形式	地下方式 (駅施設：国領，布田，調布の3駅)
事業者	東京都，調布市，京王電鉄㈱
発注者	京王電鉄㈱
事業期間	2004年9月～2015年3月



図-1 事業全体平面図

キーワード：泥土圧シールド，鉄道，営業線直下，小土被り，品質管理

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

³正会員 清水建設株式会社 土木東京支店 (〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1)

⁴正会員 清水建設・京王・間建設共同企業体 (〒182-0026 東京都調布市小島町 2-28-5)

2. 工事概要

本事業のうち、第4工区は、調布駅から京王線と相模原線の分岐区間を、泥土圧式シールド工法によりシールドトンネルを構築する工事である。京王線の上下線2本(379m)と相模原線の上下線2本(424m)、合計4本(総延長1606m)のシールドトンネルを1台のシールドを用いて構築する(図-2参照)。

シールドは鶴川立坑より発進し、京王線上り線、相模原線上り線、相模原線下り線、京王線下り線の順序で掘進し鶴川立坑に到達する。調布西立坑 B3F、品川立坑、調布西立坑 B2F で、合計3回のシールドのUターンを行う。京王線、相模原線ともに2本のシールドトンネルが横並列から縦並列へと変化する線形であり、調布西立坑部では4本のシールドトンネルが併設される。

(1) 地質概要

土質縦断面図を図-3に示す。シールド掘削の対象地盤は、立川礫層と上総層群(砂～粘土の互層)であり、土被りが浅いほど立川礫層の比率が大きくなる。立川礫層(Tag)は、玉石状の礫を含む砂礫層であり、玉石の最大径は300mm程度で、この層のいずれの深度においてもφ200mm程度の玉石が3～10個/m³程度存在している。礫率は70%以上、バインダー分は6%以下であり、透水係数は10⁻³～10⁻⁹cm/s、N値は50以上である。上総層群は砂質土層(Ks1)と粘性土層(Ksc)の互層であり、砂質土層(Ks1)は比較的均質な細砂～粗砂、粘性土層(Ksc)は固結シルトでN値は概ね50以上の硬い地層である。

なお、地下水位はGL-8.2～-9.3m程度であり、土被りの浅い場所ではトンネル横断面の上半が不飽和土層となっている。

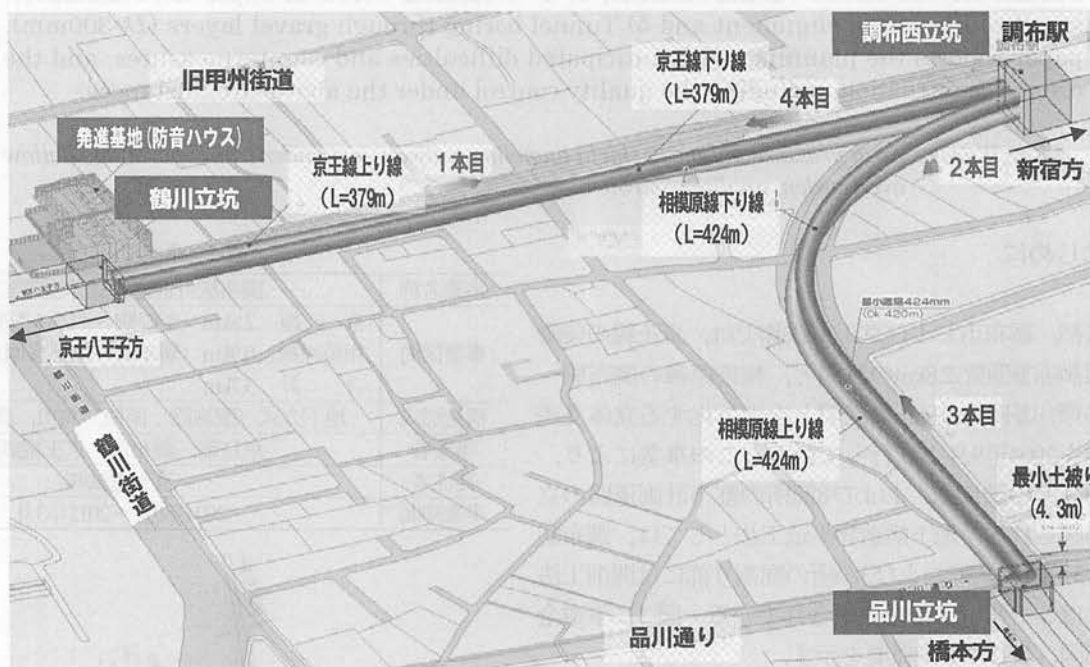


図-2 第4工区シールド概要図

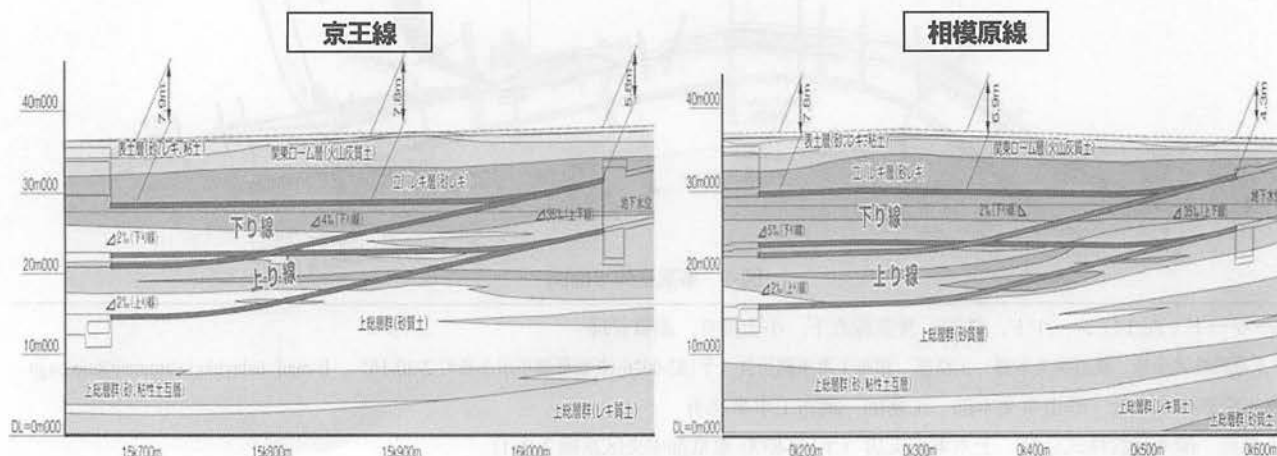


図-3 土質縦断面図

(2) 本工事の特徴

本シールド工事の特徴を以下に示す。

- ① 営業線直下，小土被り施工
(最小被り $4.3\text{m}=0.64D$)
- ② 超近接併設シールド (最小離隔 424mm)
- ③ 急曲線施工 ($R=160\text{m}$)
- ④ 3回のUターン施工
- ⑤ 立川礫層の掘進 (礫径 $\phi 300\text{mm}$ 程度)

本シールド工事は，上記のとおりこれまで例をみない技術的難易度の高い工事であった。本稿ではこのような条件下における泥土圧式シールドの施工について，品質確保および営業線の安全確保のための対策と施工実績を中心に報告する。

3. シールド工事の課題

本工事は全線にわたり営業線直下を小土被りで掘進するため，掘進中に営業線の輸送障害を発生させないことが施工計画立案時の最優先事項であった。そこで，シールド工事を行うにあたり，抽出された課題を下述する。

(1) 掘削地盤に合ったシールドの設計

シールド掘進をトラブルなく円滑に進め，高精度な掘進を行うためには，掘削地盤および線形条件に合ったシールドの設計が重要である。

(2) 掘進条件に合ったセグメントの設計

併設施工，急曲線施工などの難条件で，高品質なトンネルを築造するためには，各掘進条件に合ったセグメントの設計が重要である。

(3) 地表面沈下防止対策

安定したシールド掘進を実施し，掘進中の土砂の急激

な取込みによる地盤沈下を回避するためには，適正な掘削土砂性状管理，切羽土圧管理，排土量管理が必要である。また，3回の立坑でのUターン，小土被り部でのシールド発進，到達を周辺環境に影響を与えずに行う必要がある。

(4) 営業線直下の施工対策

シールド直上を運行する営業線の安全確保のためには，シールド通過に伴う軌道変状をリアルタイムに計測し，計測結果を遅滞なく掘進管理にフィードバックすることが重要である。

(5) 超併設トンネルの施工対策

本工事では，併設トンネル間の離隔が極めて小さいため，後行トンネル通過時の切羽土圧，裏込注入圧などが先行トンネルに影響を及ぼすことが懸念される。またトンネル設計時と施工時の条件の相違により，予期しない変位，応力がセグメントに発生することが考えられるため，後行トンネル掘進時の先行トンネルの挙動を把握することが重要である。

(6) 排土方法の改良による工期短縮

本工事では，掘削土砂の運搬は必ず鋼車により行うが，鋼車の入替などで発生する時間ロスを少なくし，掘進サイクルタイムを短縮することは，迅速かつ安定した掘進，ひいては工事の早期完成にとって重要である。

4. 課題への対策，施工結果

(1) シールドの設計

本工事で使用した泥土圧式シールドの仕様および構造図を表-2，図-4に示す。

カッターヘッドの形状は掘削土の塑性流動化と土圧の保

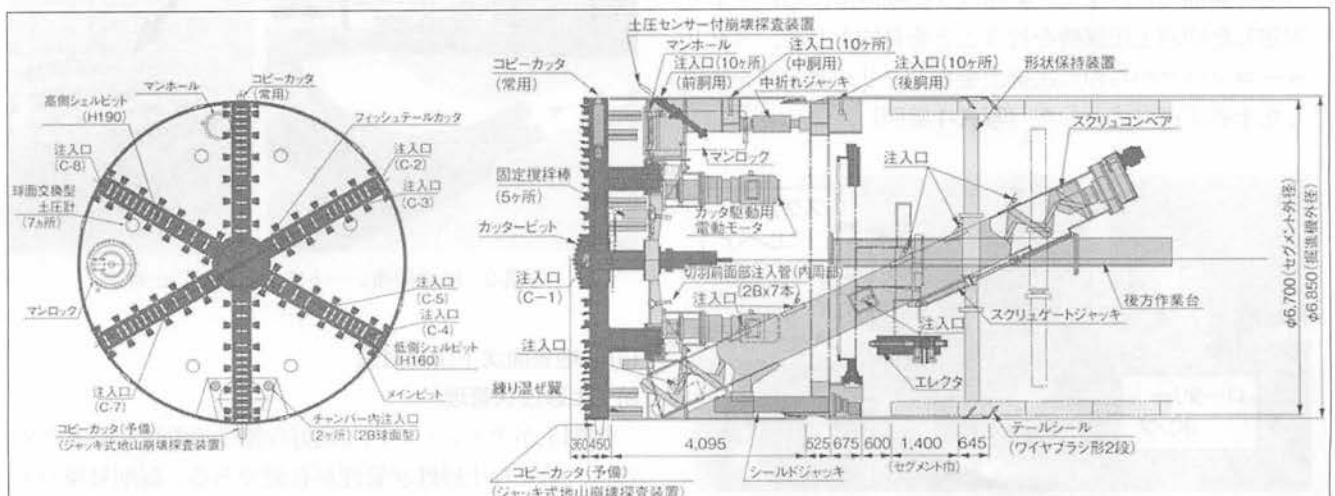


図4 泥土圧式シールド構造図

表-2 泥土圧式シールドの仕様

シールド本体	外径	φ 6 850mm
	機長	8 750mm
	テール板厚	45mm
	テールクリアランス	30mm
カッタ装置	カッタトルク	8 154kN・m $\alpha=25.4$ (高トルク)
	カッタ回転数	インバータ制御 0.8rpm (高速)
	支持方式	中間支持方式
	開口率	75%
	余掘り装置	コピーカッタ2基
推進機	シールドジャッキ	2 000kN×21本
	総推力	42 000kN
	ジャッキストローク	2 050mm
	ジャッキ速度	40mm/min 微速推進回路付き
中折れ装置	中折れジャッキ	2 000kN×16本
	総推力	32 000kN
	中折れ角度	左右：1.6° 上下：0.5°
土砂攪拌装置	練り混ぜ翼	7箇所
	固定攪拌翼	5箇所
土砂搬出装置	形式	リボン式スクリーコンベア
	内径	φ 850mm
	排土可能礫径	608mm
	排土能力	196m ³ /h

持を容易にするため6本スポーク形式とし、立川礫層での切削性の向上を図り強化型先行ビット（シェルビット）を3条、30mm段差配列とした。また1台のシールドで4本のシールドトンネルを構築することから、回転立坑においてビットの摩耗量を測定し、状況に応じてビット交換を行う計画とした。カッタの回転速度は可変速式（インバータ方式）とし、礫層や固結シルト層のビットの切込み深さ（トルクの増減）に適應できるものとした。

排土装置は、巨礫の出現に対しても取込み可能にするため、内径の大きい（850mm）リボン式スクリーコンベアを装備した。また、4回行う初期掘進においてより安定した切羽土圧保持を行うことを目的として、スクリーコンベヤからの二次排土をロータリーポンプを使用した土砂圧送方式とした（写真-1 参照）。

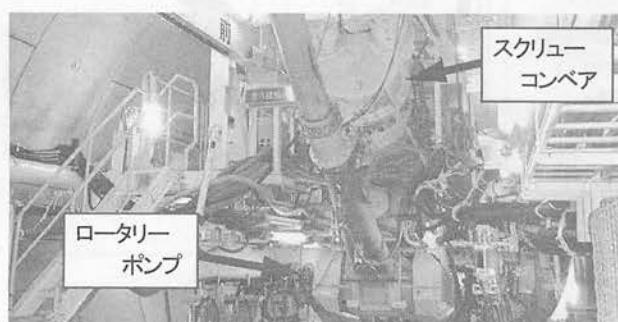


写真-1 ロータリーポンプによる二次排土

また、相模原線での急曲線（ $R=160m$ ）部の掘進に対応するため、中折れ装置を装備し余掘量を低減させ、地山崩壊の防止を図った。さらに地山崩壊探査装置をシールド前胴部の上半に3基装備し、各リングの地山崩落状況を確認しながら掘進を行うこととした。また、発進、到達掘進において、安定した仮壁（SEW）切削を可能にするため、微速推進回路を装備した。

(2) セグメントの設計

セグメントにはRCセグメントを主に用いるが、相模原線上り線（2本目）の急曲線区間については合成セグメントを採用した（図-5 参照）。この区間では、後行トンネルである3本目のシールド施工が、先行トンネルである相模原線上り線（2本目）のセグメントに、併設施工や急曲線施工による影響を与えることが懸念されたため、RCセグメントに比較して耐荷性、耐衝撃性に優れた合成セグメントの採用が適切であると判断した。

また、RCセグメントについては、共用時のコンクリート剥落防止のため、上半部の内表面に繊維補強シートを設置した（写真-2 参照）。

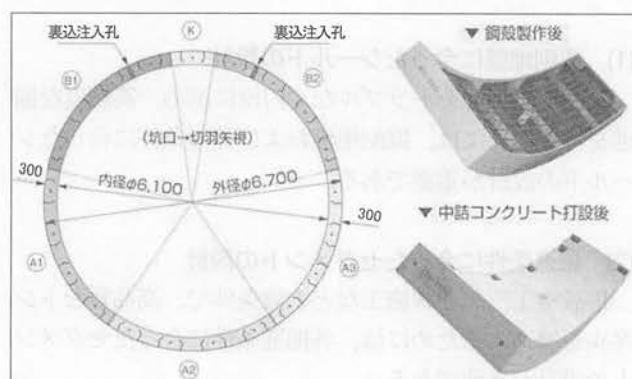


図-5 合成セグメント



写真-2 繊維補強シートによる剥落防止対策

(3) 地表面沈下防止対策

a) 土砂性状管理

掘削土がチャンパー内で良好な塑性流動性を得るためには、適正な土砂性状管理が必要である。掘削対象の主要な土層である立川礫層は微細粒子分が少ないため、こ

れを補充する粘土鉱物系（ベントナイト）の加泥材を使用した。またチャンバーにおける流動性の確保と、カッタートルクおよび推力低減のため、界面活性剤系の気泡を使用した。各添加材の使用実績は概ね下記の通りである。

- ①ベントナイト溶液 濃度： 4～8%
注入率：10～15%（地山体積比）
- ②気泡（Aタイプ） 濃度： 1～2 倍
注入率： 5～15%（地山体積比）

排土性状の確認方法は、スランプ試験、触感による排土性状の管理、チャンバー内の土圧計（7 箇所）で計測した土圧の線形分布等があり、これらにより排土性状の良否の判断を行った。

b) 切羽土圧管理

泥土圧シールドの管理土圧は、土被り土圧に静止土圧係数（ K_0 ）を乗じて求められる静止土圧を標準とするが、最小 0.64D の小土被り条件下では、土被り土圧（上部地山の重量、 $K_0=1$ ）を評価して、土砂取込みに伴うリスクを低減する必要がある。沈下、隆起ともに発生せず、地盤が最も安定する管理土圧は、静止土圧と土被り土圧との間であると判断し、式（1）を管理土圧の設定値とした。実施工においては、排土状況、軌道計測結果から、設定した管理土圧の妥当性を確認しながら掘進を実施した。

$$\begin{aligned} \text{管理土圧} &= \text{上載荷重} + \text{静止土圧} + \text{地下水圧} + \text{予備圧} \quad (1) \\ \text{上載荷重} &: 20\text{kPa} \text{ (列車荷重を考慮)} \\ \text{静止土圧係数} &: 0.45 \\ \text{予備圧} &: 35\text{kPa} \pm 10\text{kPa} \text{ (上限, 下限)} \end{aligned}$$

また、切羽土圧の管理誤差を少なくするために、土圧計を 7 箇所（最上部 1 箇所、上部、中央、下部各 2 箇所）配置して精度の高い土圧管理を実施した。

c) 排土量管理

掘進中、土砂の急激な取込過多による地盤沈下を回避するため、排土量の管理を以下の 3 方法により実施した。

- ① ロードセルによる重量計測（写真-3 参照）
- ② 超音波センサーによる体積計測
- ③ 配管流量計による流量計測

計測精度においては重量計測結果（①）が良好であったが、リアルタイムでの排土状況の判断は流量計測結果（③）により行った。また機器のトラブルや土質の急激な変化などに備え、体積計測（②）も実施した。

地山体積との比率で算出する排土率は、①～③のいずれの方法においても概ね 90%～100%の間で推移し、安定した土砂取込を確認しながら掘進を進めた¹⁾（図-6 参照）。

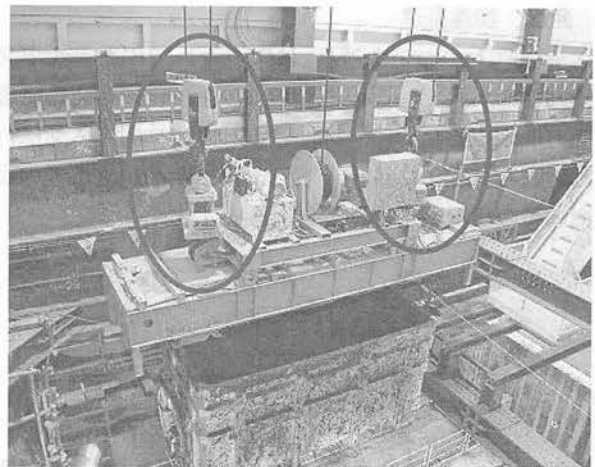


写真-3 ロードセルによる重量計測状況

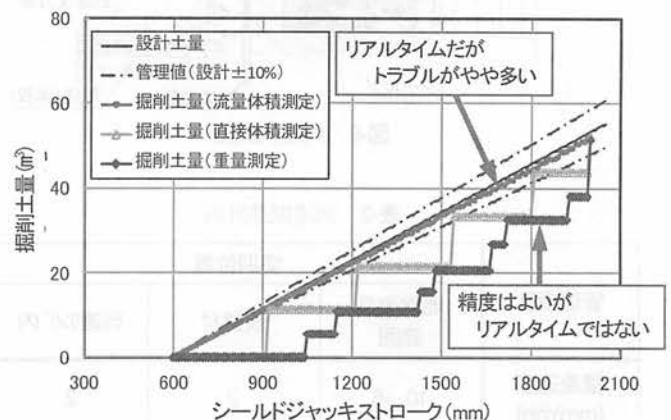


図-6 排土率計測の一例

d) 裏込め注入管理

裏込め注入は 3 回のシールド引抜と地盤への影響を考慮してセグメントからの同時注入方式とした。注入材料は充填性と強度発現に優れる二液可塑性固結型注入材とし、営業線直下での後続沈下を防止するため、注入圧の上限値を設定した上で注入率 100%以上の確実な充填を目標として施工を行った。注入率の実績は概ね 110%～120%であり、小土被り部においても地表面の沈下および隆起は発生しなかった。

セグメントに設けた裏込め注入孔は掘進開始と同時に注入開始できる位置とし、逆止弁を二重止水方式にすることで注入孔からの漏水防止を図った（図-7 参照）。

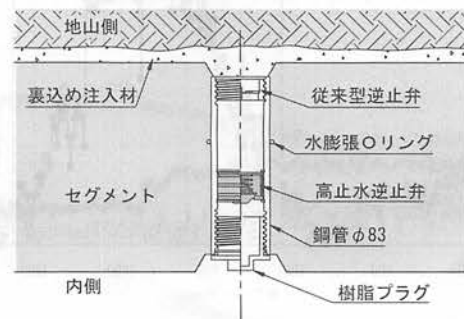


図-7 二重止水方式による逆止弁

e) 発進、到達掘進

営業線直下かつ小土被り（1D 以下）でのシールド発進、到達において、周辺地盤および土留壁に与える影響を極力抑制するために、掘進管理計画の検討を入念に行った。図-8、表-3 に最小土被りであった品川立坑での到達掘進時の状況図と掘進管理計画を示す。

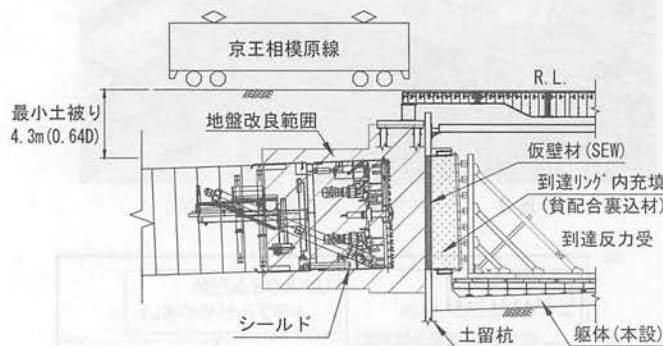


図-8 到達状況図

表-3 到達掘進計画

管理項目	切羽位置		
	地盤改良範囲	仮壁材	到達リング内
掘進速度 (mm/min)	10→5	2	2
切羽土圧 (MPa)	静止土圧 + 地下水圧	漸減※	地下水圧
到達リング内充填材	貧配合裏込注入材 ($\sigma_{28}=1.2\text{N/mm}^2$)		

※排土、軌道変状を監視しながら土圧を漸減

上記の掘進計画に基づき施工した到達掘進時の計測データを図-9 に示す。掘進速度、切羽土圧の調整により、装備能力の 30%前後のカッタートルクで安定した仮壁材の切削を行うことができた²⁾。

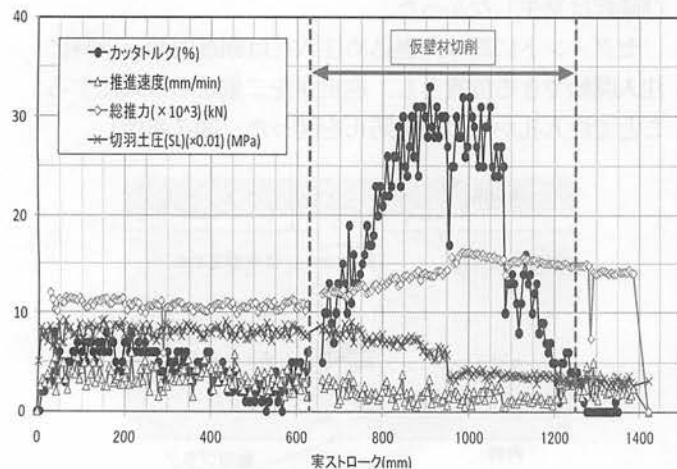


図-9 到達掘進データ (品川立坑)

(4) 営業線直下の施工対策

本工事では、シールド掘進時の営業線の安全運行確保を目的として、全線にわたり営業線の軌道計測を実施した。シールド通過に伴う軌道変状をリアルタイムで計測し、計測結果を掘進管理にフィードバックすることにより、情報化施工の一役を担った。計測方法はトータルステーションによる 24 時間自動計測とし、データを常時モニタ出力し、基準値を超えた場合には携帯端末等で情報を工事関係者に迅速に伝達させるようにした。

測定箇所は上下線のレールとシールド直上路盤（施工基面に沈下棒を設置）とし、設置間隔はトンネル進行方向に対し 5.0m または 10.0m とした（図-10、写真4 参照）。

基準値（一次管理値）は、軌道整備限界値の 50%を基準に一般部で 14mm、小土被り区域ではさらに小さい 7mm とした。

実際に計測された沈下量は、先行トンネルで 0～2mm、後行トンネルで 1～4mm 程度であった（図-11 参照）。先行トンネル通過の影響が残る地山の近傍を掘削する後行トンネルの沈下量の方がやや大きいものの、1 次管理値の 30%程度であり、1.0D 以下の小土被り条件下で良好な掘進が実施できたと考える。

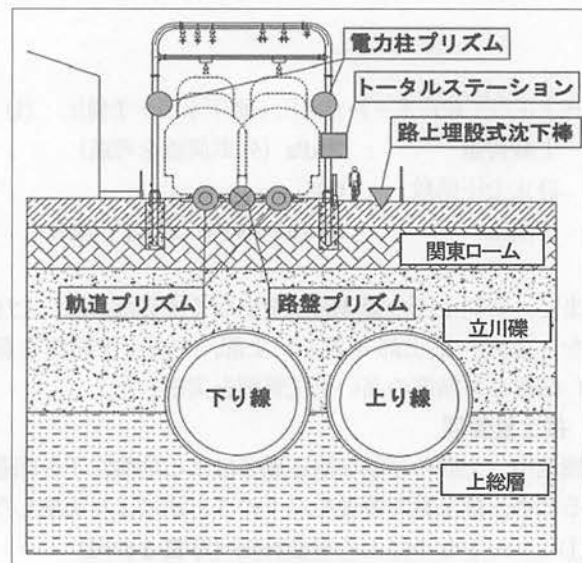


図-10 軌道計測断面図

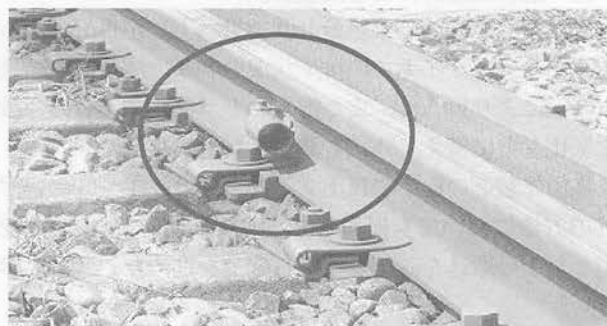


写真4 軌道計測プリズム

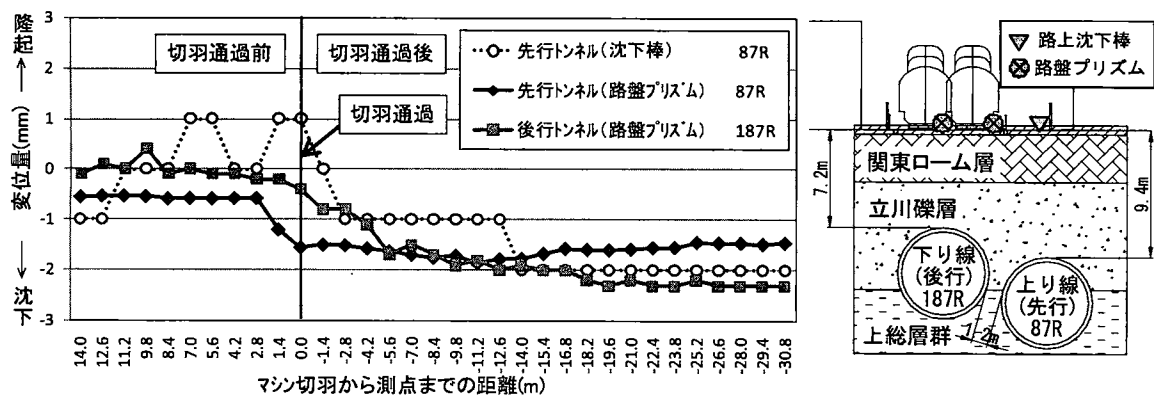


図-11 地表面変状計測結果の一例

(5) 併設トンネルの施工対策

a) セグメントの応力計測

先行トンネルである相模原線上り線のセグメントに計測機器（ひずみ計，鉄筋計，土圧計，水圧計）を設置し，後行トンネルである相模原線下り線掘進時の先行トンネルへの影響を計測した。計測は合成セグメント（急曲線部），RCセグメント（直線部）各1箇所にて行った。

図-12，13 にRCセグメント部における周方向内側鉄筋計の計測結果を示す。後行シールド機通過時に応力の変化が見られるものの，応力の変化量は $0 \sim 10 \text{ N/mm}^2$ と小さい。通過後は後行トンネルの影響が残留した応力状態のまま収束している。

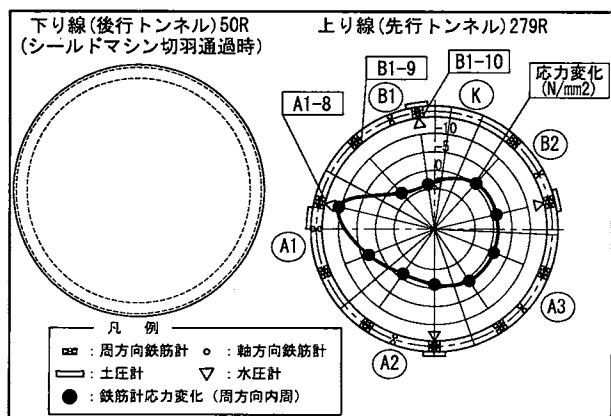


図-12 鉄筋計応力発生図

b) セグメントの変位計測

後行トンネル通過時の先行トンネルの挙動を定量的に把握するため，先行シールド坑内にトータルステーションを設置し，3次元計測によって後行シールド通過時のセグメントの挙動を計測した。

図-14，図-15 に，相模原線での併設トンネル最近接部における，先行トンネルの変位測定結果を示す。後行シールドのテールが通過した直後，地山の応力解放により，最近接の部位が地山側（後行トンネルに向かって）に 1.8 mm 程度変位している。この結果は，前述の鉄筋計による応力計測結果と同一の変位傾向を示すものであった。

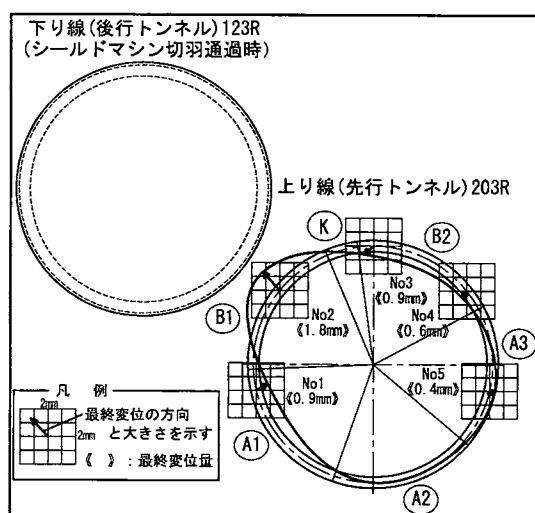


図-14 先行セグメント変位図

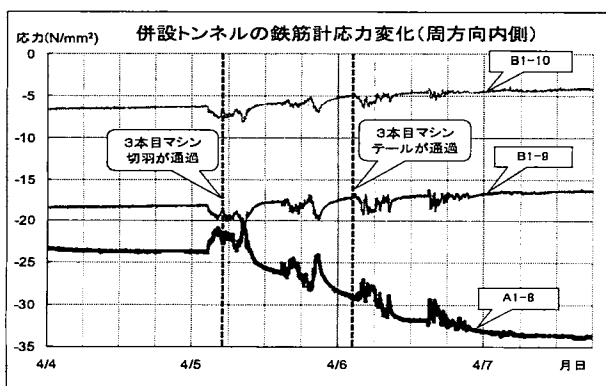


図-13 鉄筋計経時変化図

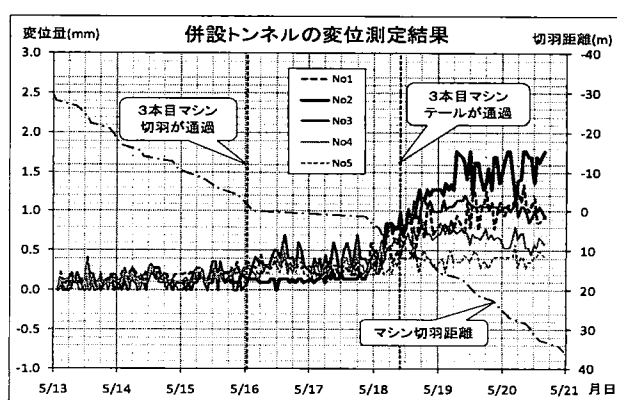


図-15 先行セグメント変位経時変化図

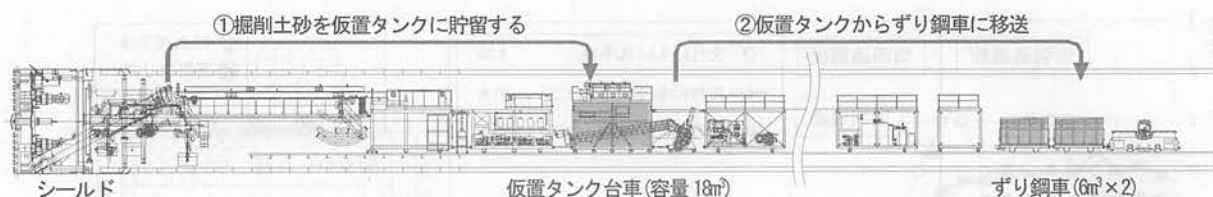


図-16 掘削土砂仮置きタンク台車を用いた土砂搬出方法

表4 サイクルタイムの比較

		1リング当り サイクルタイム 126分													
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
仮置きタンクなし	シールド掘進	※ずり鋼車入替時は掘進中断													
	セグメント組立	セグメント組立、配管延長など													
	掘削土積込	鋼車①	鋼車②	鋼車③		鋼車④		鋼車⑤							
仮置きタンク使用	シールド掘進	掘削土砂は一旦仮置きタンクに移送後、鋼車に移送 ※連続掘進が可能													
	セグメント組立	セグメント組立、配管延長など													
	掘削土積込	鋼車①	鋼車②	鋼車③		鋼車④		鋼車⑤							
		経過時間(分)													

(6) 掘進サイクルタイムの短縮による工期短縮

本工事では、トンネル1本当りの延長が約400mと短く、かつ立坑での折返しが複数回発生するため、掘削土砂搬出方法としてずり鋼車(6m³積×2台/1編成)を用いた軌道方式を採用した。今回の掘進では、掘進サイクルタイムの短縮を目的として、後続台車内に掘削土砂仮置きタンクを設置し、ずり鋼車が不在であっても掘進を中断せず、掘削土を仮置きタンクに排出できるようにした(図-16参照)。タンク容量は18m³で、ずり鋼車約3台に相当する。表4に仮置きタンク台車使用時の掘進サイクル比較を示す。仮置きタンク台車の採用により、施工サイクルは1リング当り約25分短縮された。また、ずり鋼車入替時に掘進を停止する必要が無いため、切羽土圧の変動を抑制することができ、良好な切羽土圧管理および地山の変状抑制にも繋がった。

5. おわりに

本工事は、これまでに例のない技術的難易度の極めて高いシールド工事であったが、平成21年2月に鶴川立坑を1本目が発進し、平成22年12月に4本目が無事鶴川立坑に到達し掘進を終了した(写真-5参照)。先述の技術的対策が奏功し、大きな掘進トラブル発生もなく、

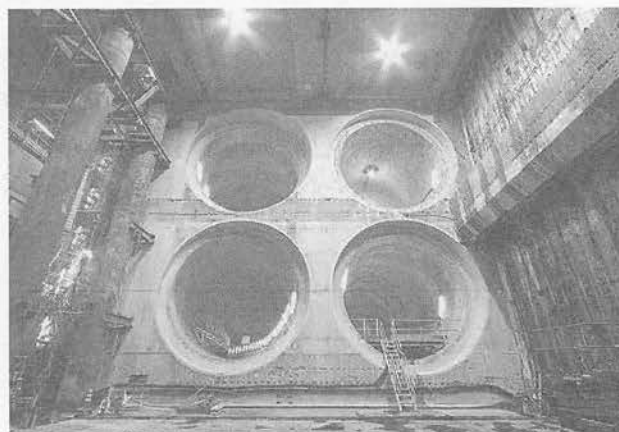


写真-5 4坑口施工完了状況(調布西立坑)

また施工前に懸念された営業線への影響もなく、高品質なシールドトンネル築造を実施することができた。なお、平成24年8月に地下化切替が無事に完了している。

本稿が、同様な施工条件下での施工計画の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 寺田雄一郎, 岩村忠之, 石井克茂, 西田充: シールド掘進における掘削土管理について, 第66回年次学術講演会講演概要集, 6-18, 2011.
- 2) 寺田雄一郎, 岩村忠之, 石坂真二, 磯部哲: 小土被り, 営業線直下の泥土圧シールド到達掘進について, 第66回年次学術講演会講演概要集, 6-11, 2011.