

# 営業線直下における小土被り,超近接シールドの計測管理と施工実績

寺田 雄一郎<sup>1</sup>・磯部 哲<sup>2</sup>・西田 充<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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

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

「調布駅付近連続立体交差工事(土木)第4工区」は、京王電鉄京王線および相模原線の、調布駅から八王子方、橋本方への分岐区間の単線トンネル(φ6 700mm)を泥土圧シールド工法にて築造する工事を担当している。本工事の特徴は、①全線にわたる営業線直下の小土被り掘進(最小4.3m/0.64D)、②超近接併設シールド施工(最小離隔424mm)、③急曲線施工(R=160m)、④3回のUターン施工、⑤礫層(径300mm程度)の掘進であり、非常に技術的難易度の高い工事である。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計画、課題と対策、施工実績について報告する。

**Key Words :** earth pressure balanced shield tunneling, just under train operating, shallow overburden, monitoring

## 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。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し、現在、早期完成に向けて工事を進めている。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～2013年3月         |       |               |

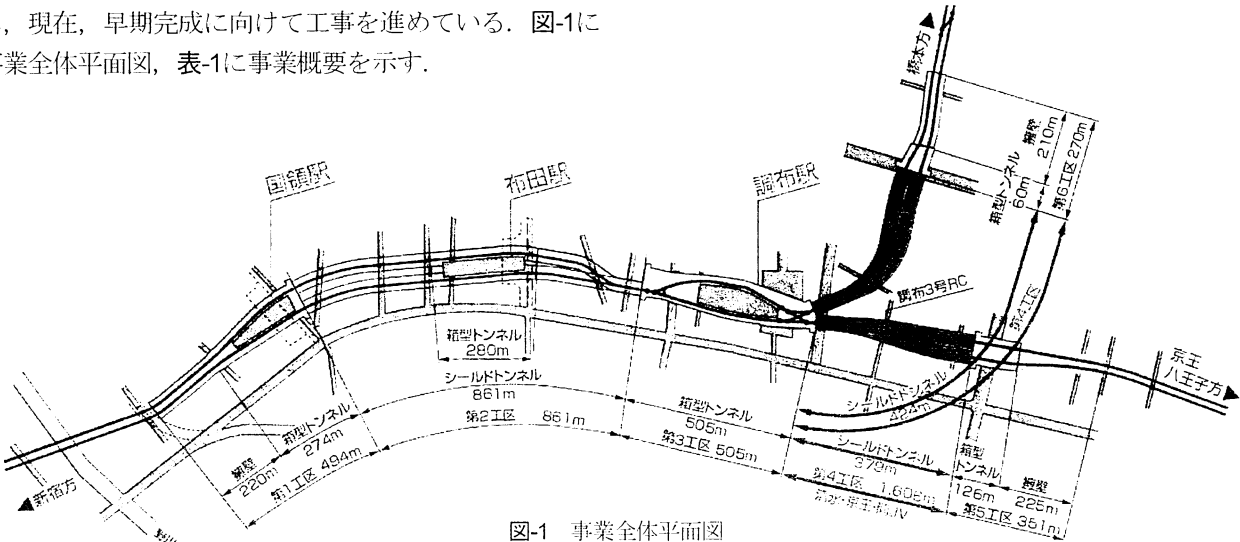


図-1 事業全体平面図

## 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/m<sup>3</sup>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 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/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。

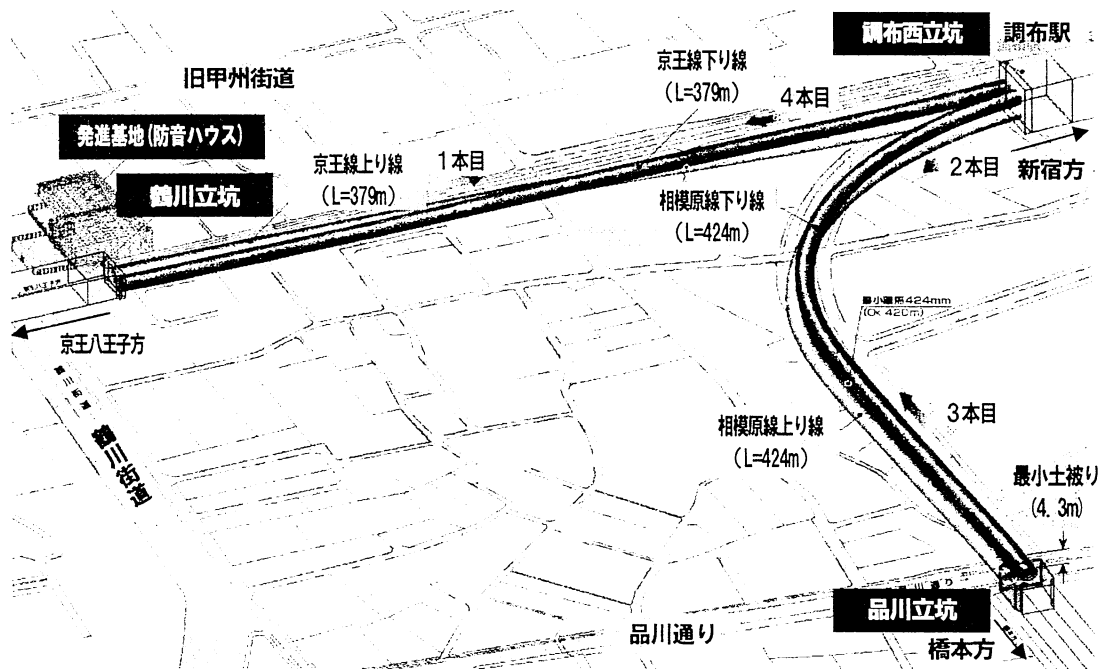


図-2 第4工区シールド概要図

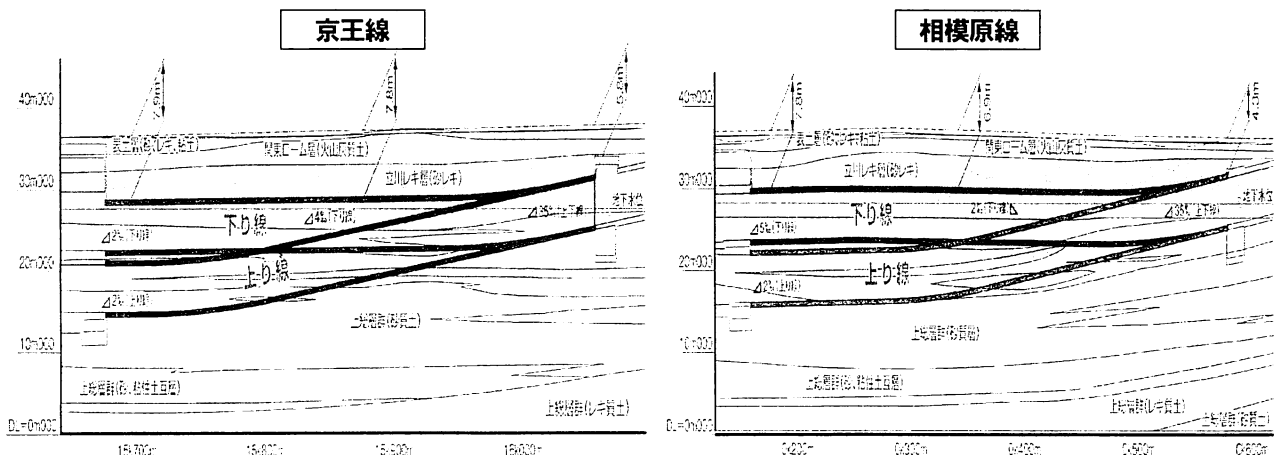


図-3 土質縦断面図

## (2) セグメントの構造

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-4 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、耐衝撃性に優れる合成セグメントの採用が適切であると判断した。

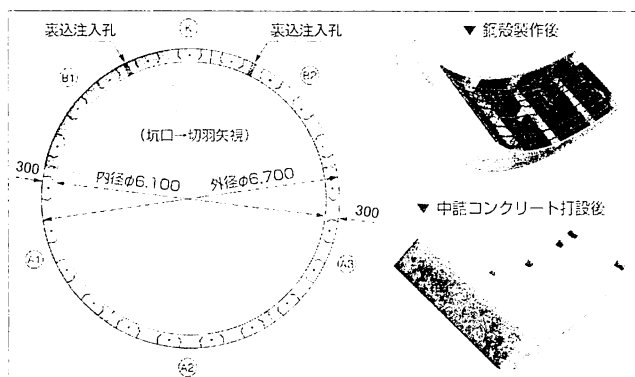


図-4 合成セグメント

## (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 $424\text{mm}$ ）
- 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る。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計画，計測管理計画および施工実績について報告する。

## 3. 技術的問題点

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ことになるため、シールド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る。そのためには、安定した管理状態の下、迅速に掘進を進めることが重要である。そこで、本工事の施工計画にあたり、抽出された技術的問題点を以下に示す。

### (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るためには、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) 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。

## (3) 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必要がある。また、小土被りかつ急曲線区間である相模原線の掘進においては、万一地表面沈下が発生した場合でも列車運行への支障を最小限に抑える必要がある。

## (4) 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。

## (5) 掘進サイクルタイムの短縮による工期短縮

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、迅速な掘進，ひいては工事の早期完成にとって重要である。

## 4. 技術的問題点への対策，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-5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、 $30\text{mm}$  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。カッター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（ $850\text{mm}$ ）リボン式スクレーンコンベアを装備した。

相模原線での急曲線（ $R=160\text{m}$ ）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

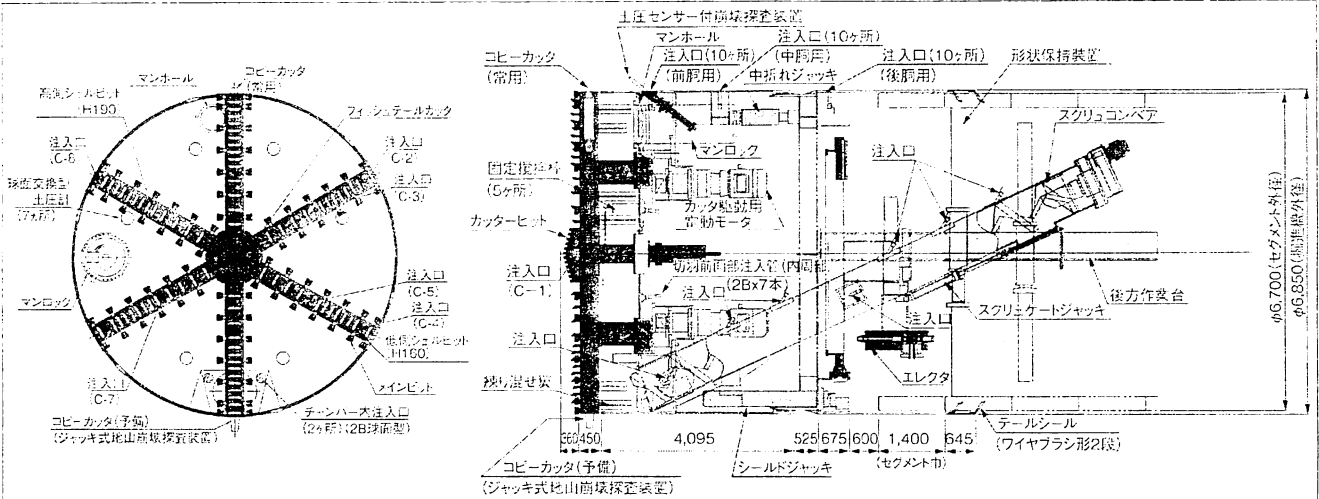


図-5 泥土圧シールド構造図

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。

4回の発進、到達において切削壁（SEW）を切削するため、推進系統には微速推進回路を設けた。

表-2 泥土圧シールドの仕様

|        |           |                                   |
|--------|-----------|-----------------------------------|
| シールド本  | 外径        | φ6 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<br>$\alpha=25.4$ （高トルク） |
|        | カッタ回転数    | インバータ制御<br>0.8rpm（高速）             |
|        | 支持方式      | 中間支持方式                            |
|        | 開口率       | 75%                               |
| 推進機    | 余掘り装置     | コビーカッタ2基                          |
|        | 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                           |
| 中折れ装置  | ジャッキ速度    | 40mm/min<br>微速推進回路付き              |
|        | 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°<br>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                           |
|        | 排土可能口径    | 608mm                             |
|        | 排土能力      | 196m <sup>3</sup> /h              |

(2) 地表面沈下防止対策

a) 土砂性状管理

掘削土がチャンバ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（写真-1参照）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

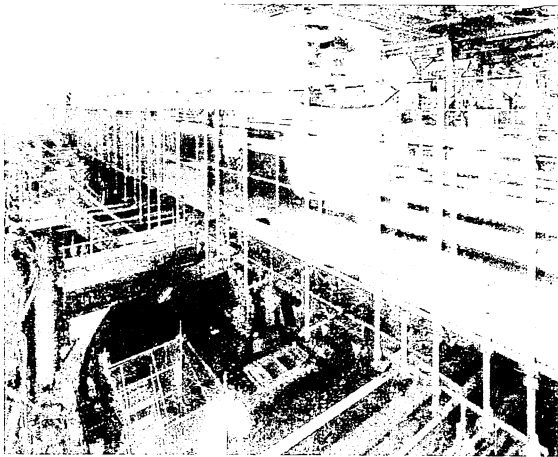


写真-1 最小土被り部（品川立坑）

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。

管理土圧＝上載荷重＋静止土圧＋地下水圧＋予備圧（1）

|        |                      |
|--------|----------------------|
| 上載荷重   | : 20kPa（列車荷重を考慮）     |
| 静止土圧係数 | : 0.45               |
| 予備圧    | : 35kPa±10kPa（上限、下限） |

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-2 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。

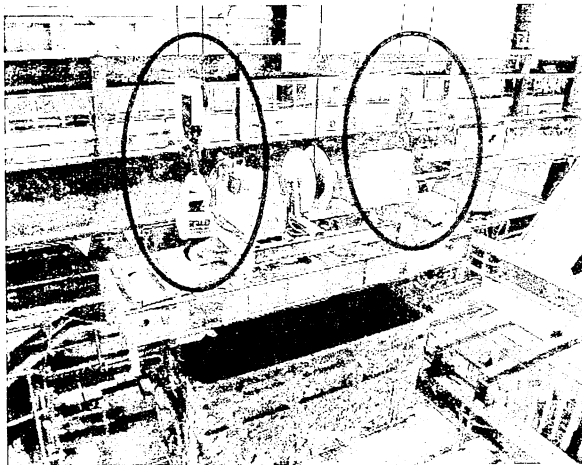


写真-2 ロードセルによる重量計測状況

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、高止水逆止弁を使用して注入孔からの漏水防止を図った。

(3) 営業線直下の施工対策

a) 軌道計測工

軌道計測は、営業線の安全運行確保を目的として、シールド通過に伴う軌道変状をリアルタイムで計測し、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。相模原線の最小土被り区域ではシールド直上のみ2.5mの間隔で変位計測を行った（図-6、写真-3参照）。

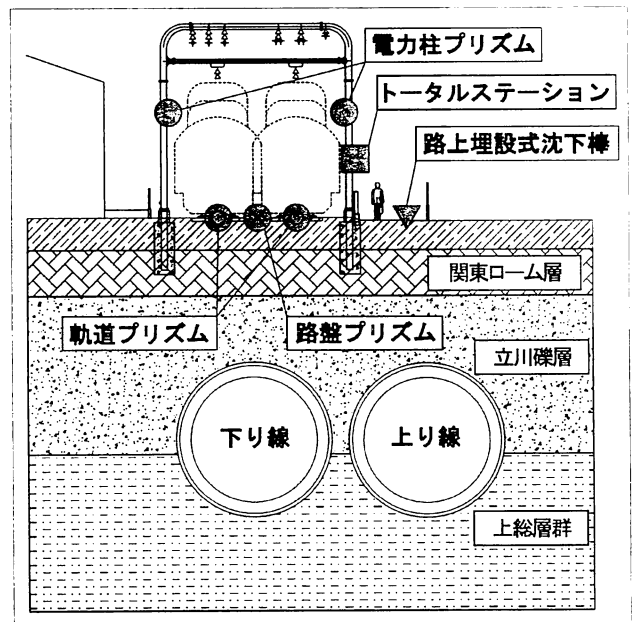


図-6 軌道計測断面図

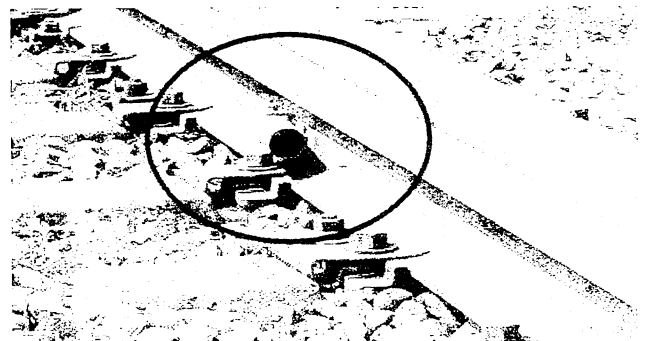


写真-3 軌道計測プリズム

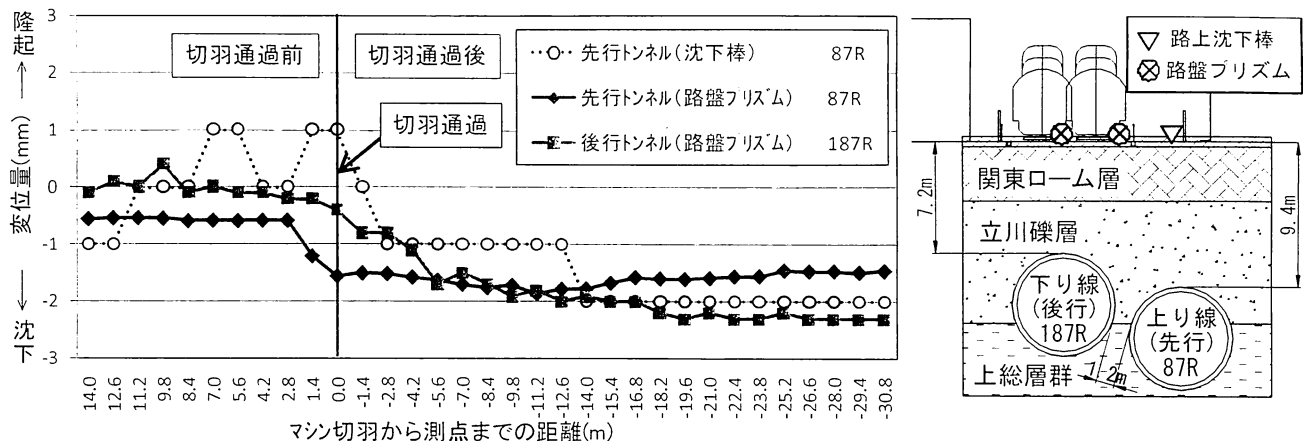


図-7 地表面変状計測結果の一例

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-7参照）。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。

#### b) 簡易工事桁

相模原線の掘進では、小土被りかつシールド上部のローム層が薄いため、掘進に伴う地表面の沈下が即時かつ局部的に発生し、営業線の輸送障害を引き起こす恐れがある。さらに急曲線（R=160m）区間の掘進では、余掘りを行うため地表面沈下が発生しやすい状況と言える。よって、万一掘進中に急激な沈下が発生した場合でも、列車運行に支障を来さぬよう、簡易工事桁により既設軌道を補強した（図-8参照）。レール中央に鋼材 H-150 を5本抱き合わせ、U型バンドで枕木と固定することで軌框の剛性を約3倍に増加させた。

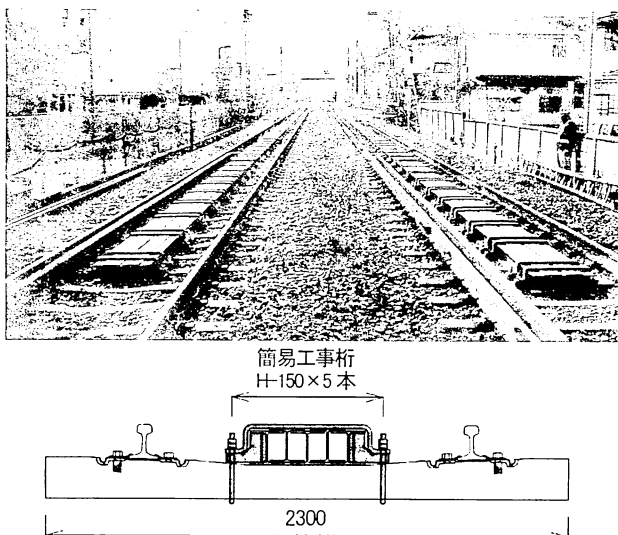


図-8 簡易工事桁

#### (4) 超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（2本目）のセグメントに計測機器を設置し、後行トンネルである相模原線下り線（3本目）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1リング、RCセグメント2リングに対して実施し、ひずみ計、鉄筋計、土圧計、水圧計を表-3、図-9に示すように設置した<sup>1)</sup>。

図-10は、先行トンネル279リングの周方向内側鉄筋計の経時変化図である。後行シールド機通過時に応力の変化が顕著であるが、応力の変化量は0～10N/mm<sup>2</sup>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。

表-3 セグメント計測機器種別

| 合成セグメント<br>計測箇所 | ひずみ計 |     |     |     |
|-----------------|------|-----|-----|-----|
|                 | 周方向  | 軸方向 |     |     |
| 160リング（急曲線部）    | 20   |     |     |     |
| RCセグメント<br>計測箇所 | 鉄筋計  |     | 土圧計 | 水圧計 |
|                 | 周方向  | 軸方向 |     |     |
| 279リング 乙組（直線部）  | 20   | 10  | 4   | 4   |
| 280リング 甲組（直線部）  | 20   |     |     |     |

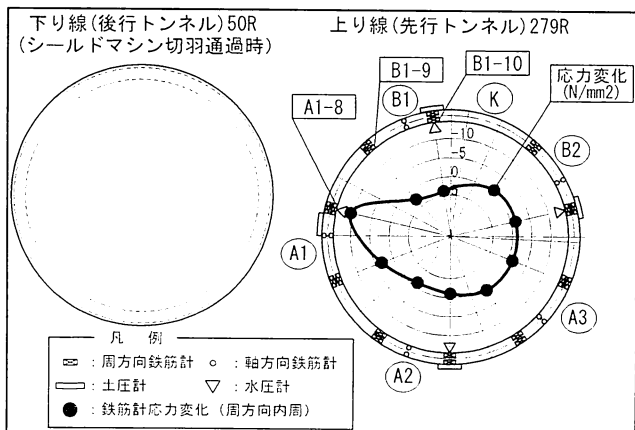


図-9 鉄筋計応力発生図

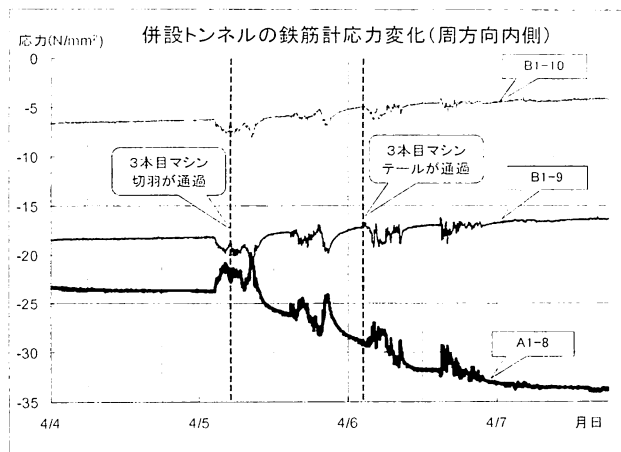


図-10 鉄筋計経時変化図

#### b) セグメントの変位計測

後行トンネルの施工時荷重による先行トンネルの挙動を定量的に把握するため、シールド坑内にトータルステーションを設置し、3次元計測によってシールド通過時

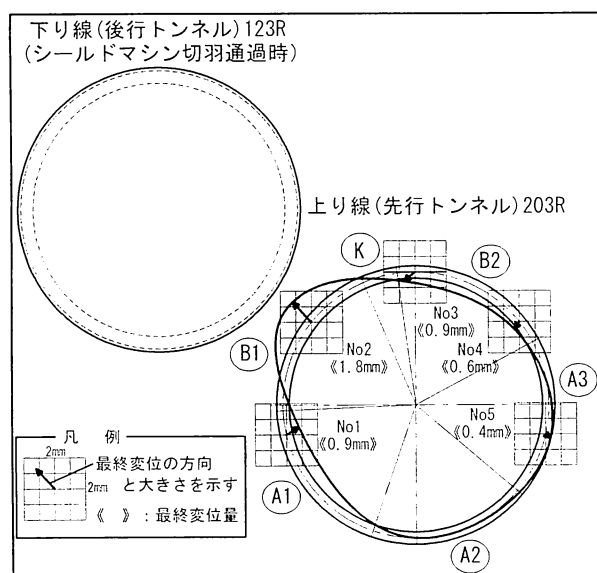


図-11 先行セグメント変位図

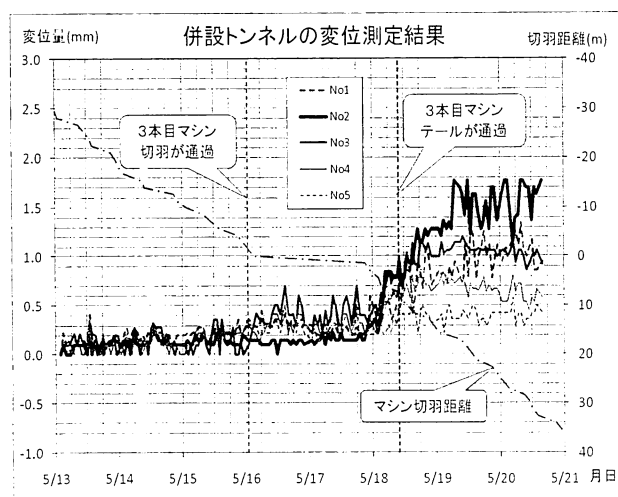


図-12 先行セグメント変位経時変化図

の先行トンネルセグメントの挙動を計測した。

図-11、図-12は、先行トンネル 203 リング（合成セグメント：最近接部）の変位測定の結果である。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変位が発生していることがわかる。変位量としては最大 1.8mm 程度であり、最近接の部位が地山側（後行トンネルに向かって）に変位している。この計測結果は、前項で述べた、鉄筋計によるセグメントの応力計測結果と同一の変位傾向を示すものであった。

#### (5) 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を用いた軌道方式を採用した。掘削土砂はずり鋼車（6m³ 積×2 台/1 編成）により発進立坑まで運搬される。1 リング掘進（延長 1.4m）当り約 60m³ の掘削土が発生するため、1 リングの掘進で約 5 回のずり鋼車入替が必要になる。この入替による時間ロスを少なくすることは掘進サイクルタイムの短縮に大きく貢献する。そこで本工事では、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（写真-4、図-13 参照）。タンク容量は 18m³ で、ずり鋼車約 3 台分に相当する。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。

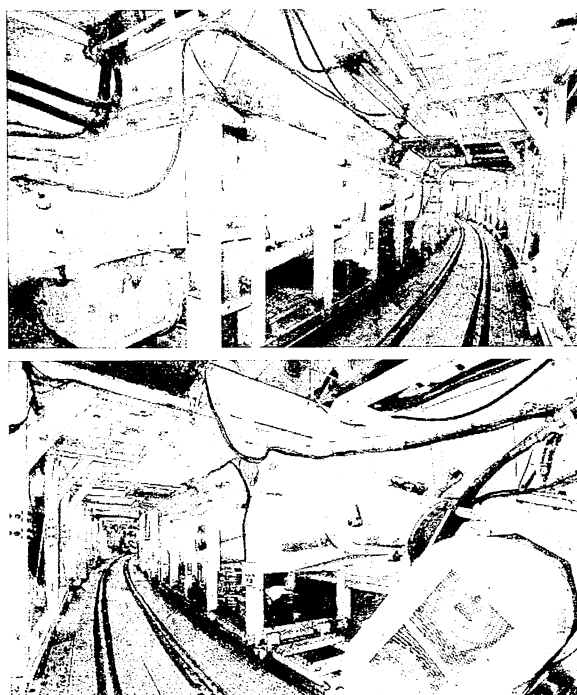


写真-4 掘削土砂仮置きタンク台車

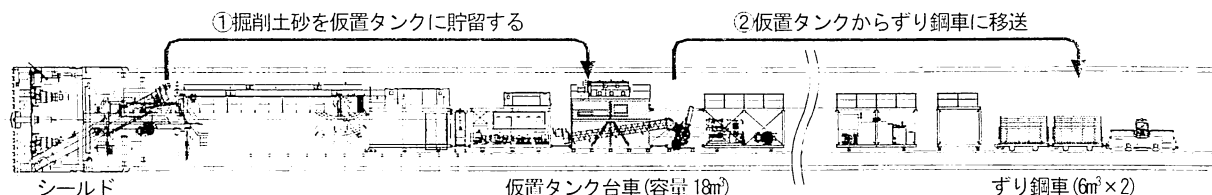
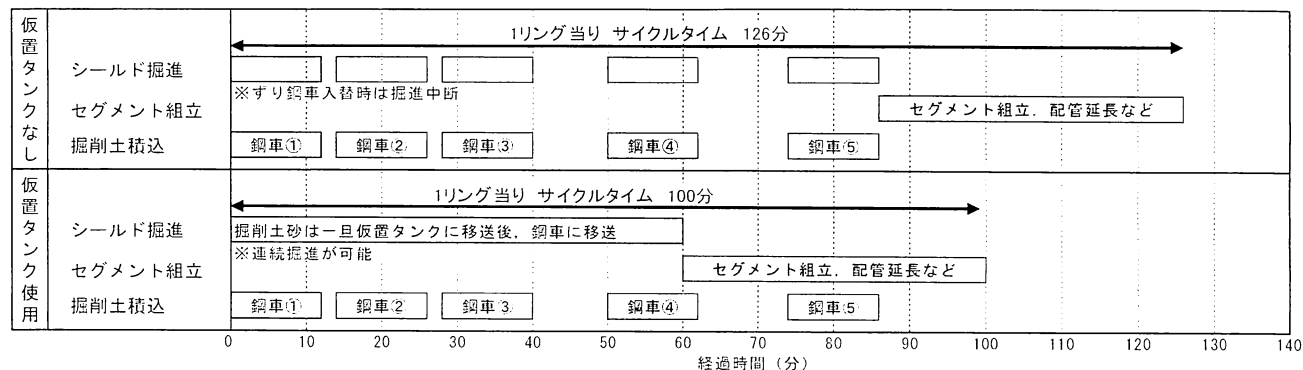


図-13 掘削土砂仮置きタンク台車を用いた土砂搬出方法

表-4 サイクルタイムの比較



## 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、また施工前に懸念された営業線への影響もなく、良好なシールド掘進を実施することができた。工程の面においても、当初の工程より、約6ヶ月工期を短縮して4本目到達を迎えることができた。

本稿が、同様な施工条件下での施工計画の一助になれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 寺田雄一郎, 岩村忠之, 沼澤憲二郎, 入田健一郎, 西井成実: コンクリート中詰め合成セグメントの設計と施工, 第65回年次学術講演会講演概要集, 6-235, 2010.



写真-5 4坑口施工完了状況(調布西立坑)

## MONITORING ON SHIELD TUNNELS BORED IN SUPER-CLOSE DISTANCE AND BENEATH OPERATIVE RAILWAYS UNDER A SHALLOW COVER

Yuichiro TERADA, Satoru ISOBE and Mitsuru NISHIDA

The project is to construct railway tunnels by an EPB shield machine( $\phi$  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 monitoring results under the above circumstances.