

9. 狭隘な施工条件を克服した高速道路ランプトンネルの施工実績

特殊工法を使用した矩形シールドの施工実績

鹿島建設(株) ○加藤 淳司
 鹿島建設(株) 真鍋 智
 鹿島建設(株) 沼宮内克己
 阪神高速道路(株) 松川 直史

1. はじめに

本工事は、大阪府堺市内の住宅地において堺市が事業を行う府道高速大和川常磐西出入口の本線トンネル 350m とランプ 376m を開削工法で構築する工事である。本線から出口ランプに分岐する区間では近隣住民の環境負担軽減策として地上の工事占用幅を縮小し、生活道路を確保する目的で開削工法から矩形シールド工法に変更した。施工上の課題としては、小土被り発進、開削土留めとの近接併走掘進、線形管理、シールド機姿勢制御、急勾配施工等をあげ、これらに対する各種対策と成果について報告する。

2. 工事概要

2.1 事業概要

大阪中心部の慢性的な渋滞の緩和と沿道環境の改善のために「大阪都市再生環状道路」の整備が進められている。大阪府道高速大和川線は、この環状道路の一部を形成する路線であり、堺市三宝から松原市三宅に至る延長約 9.9km の自動車専用道路である。同路線は、大阪府、堺市、阪神高速道路(株)の三者が共同で事業を行う路線であり、その大部分は地下構造となっている(図-1 参照)。

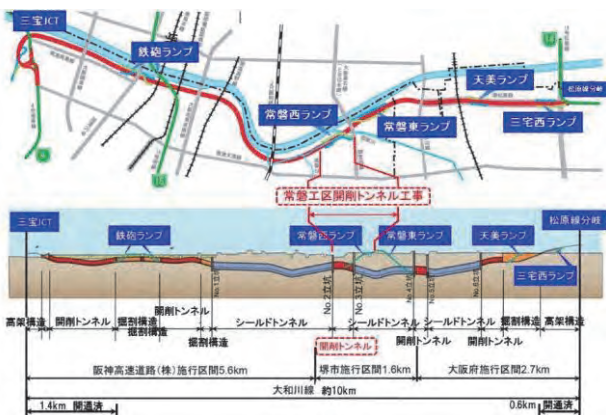


図-1 トンネル構造と事業区分(ランプ名は仮称)

常磐工区開削トンネル工事は、堺市に位置し、阪神高速道路(株)が同市から受託して施工している。本工区は、工区両端に本線シールドが転回する立坑、また、両立坑間にランプ分合流部(常磐西ランプ(仮称))を有するため、開削トンネル構造を採用している。

2.2 矩形シールドへの変更

当初の計画では、本線と出口ランプを同時に開削工法で施工する計画であった。特に、近隣家屋の官民境界が土留めから 4m まで近接する出口ランプの分岐部分における土留め施工時の杭打機を設置する工事占用帯では、沿道民家からの車両の出入りに必要な生活道路が長期間使用できない状況となるなど周囲に及ぼす影響が大きいためから施工法を再検討した。その結果、ランプ分岐部分は、地中切り開き工法で路下施工による躯体拡幅を行い、ランプ単独部については、シールドトンネルによる非開削工法をそれぞれ採用した。さらに、シールドでは、事業認可幅の制約から円形に比べ、最小限の掘削幅で構築できる矩形断面構造を採用することとした(図-2 参照)。

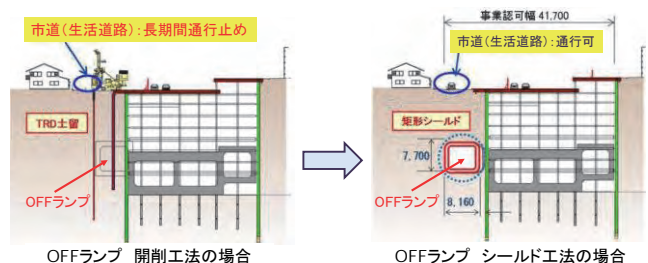


図-2 矩形シールド工法への変更

3. 矩形シールドの工事概要

3.1 シールド施工条件

出口ランプの工法変更にあたり、当初設計の道路線形をもとにトンネル線形を計画、構造物の建築限界を確保できるシールド断面形状を検

討し、事業認可幅内で構造物の必要最小断面を確保すること、ならびに本線開削部との離隔を確保する必要から矩形断面に決定した。

シールドトンネルは、地上の発進立坑から西に向かって225m掘進し、本線躯体に到達する。

トンネル線形は、発進直後の右カーブ $R=600\text{m}$ と連続した左カーブ $R=600\text{m}$ で掘進し、その後、約150mに渡って本線開削区間の土留め壁と併走する。縦断線形は発進立坑から8%の下り勾配であり、到達部手前で縦断曲線 $R=730\text{m}$ で上り1.37%に転じる。発進部は、1.5mの小土被りで、到達部で土被り17mとなる(図-3参照)。

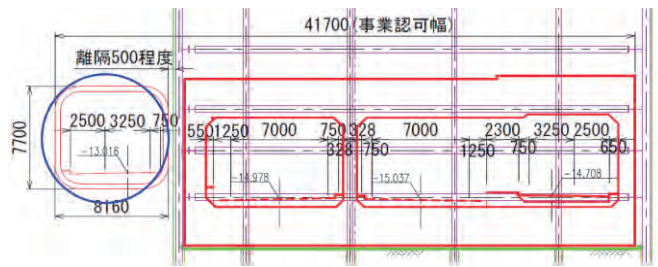


図-4 本線開削土留め併走区間断面図

掘進範囲の土質条件は、地表面付近2~5mの埋土層以深に洪積地盤の砂礫土層(N値50以上)と粘性土層(粘着力 $c=20\sim30\text{kN/m}^2$)が互層で構成される硬質地盤である(図-5参照)。

3.2 アポロカッター工法の導入

矩形シールドの工法選定に際しては、断面形状の多様性、洪積地盤や改良体掘進といった硬質地盤掘削への適応性^{1),2)}から、アポロカッター工法を採用した。アポロカッター工法は、小径のカッターヘッドによる自転と公転を組み合わせた掘削機構で、矩形をはじめ多様な断面形状に対応でき、硬質地盤掘削にも優れる。写真-1に工場仮組検査時のシールド機全景写真を示す。

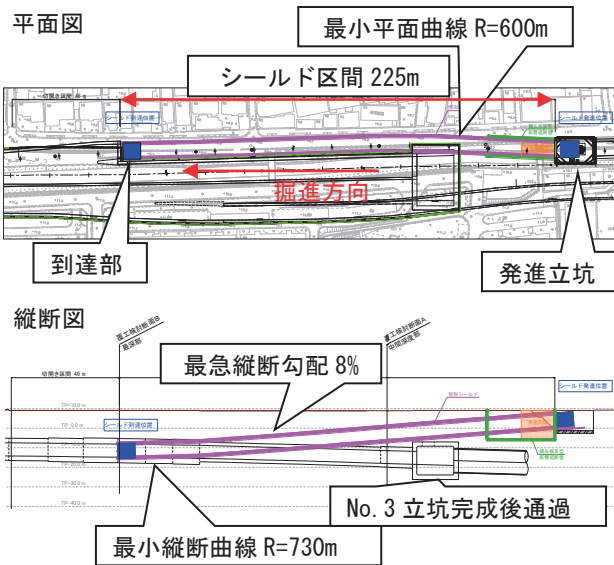


図-3 シールドトンネル線形概略図

シールドトンネルと土留め壁芯材との離隔は、既往の施工実績の最小である500mmを標準として計画した。トンネル断面は、都市計画の事業認可幅に収めることが前提条件であるため、シールドの蛇行余裕50mm、耐火被覆余裕25mm、内装設備余裕80mmを考慮すると矩形形状とする必要があった(図-4参照)。

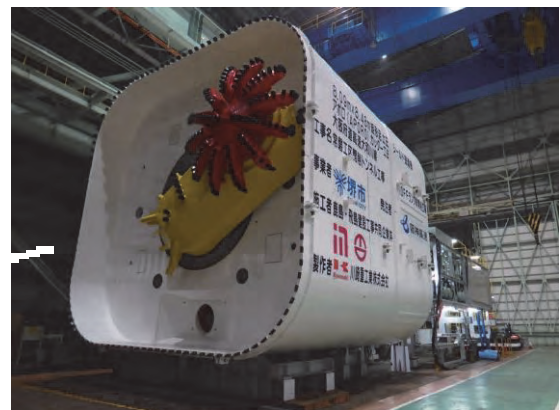


写真-1 アポロカッターシールド機

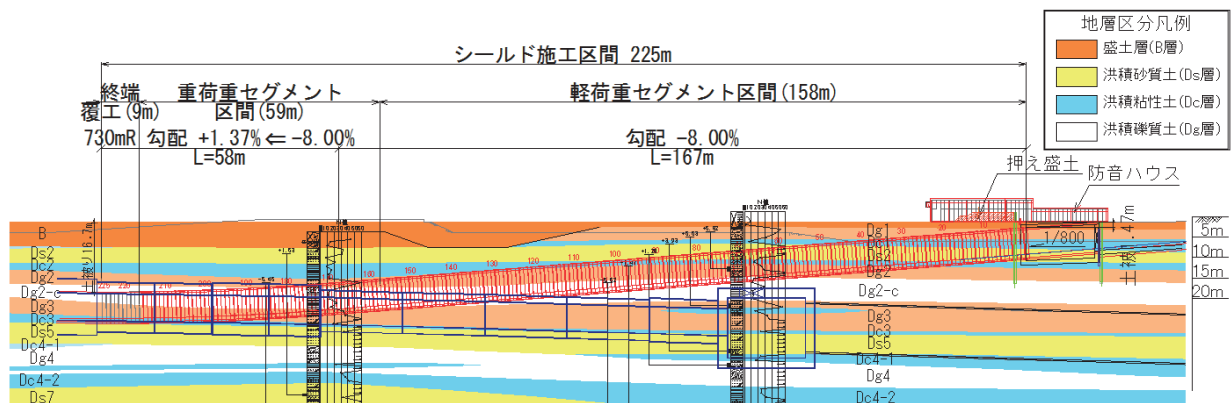


図-5 シールド機掘進区間土層縦断図

4. シールド機の仕様

矩形シールド機の掘削機構や装備仕様は、以下に挙げる施工条件を考慮した計画とした。

- ・小土被り発進
- ・地中障害物
(旧護岸間知石等、想定範囲は事前に撤去)
- ・到達部での全土被り圧の作用
(開削土留め背面であるため)
- ・土留め壁との掘削離隔が小さい
(セグメントと土留め壁芯材との離隔約500mm)

これらを勘案し、地表面影響を抑制するための同時裏込め注入装置、セグメント組立形状の精度を確保するための形状保持装置(上下左右拡張式)が、標準装備として採用された。

中折れ装置に関しては、曲線半径への対応には比較的余裕があるが、曲線施工時の余掘り量を極力小さくすること、到達時にシールド機方位の引上げ、そしてローリング修正を含め土留め壁併走に伴う姿勢制御への活用が期待できることから、標準で装備されることとなった。

図-6にシールド機概形図、表-1にシールド機諸元表を示す。

5. 施工上の課題

5.1 小土被り発進への対応

発進時のシールド機は、後端がほぼ地表面に位置しており、シールド機先端での土被りが1.5mである。発進立坑が近隣官民境界にも隔離4mと接近していることもあり、事前のFEM解析では、発進直後の土被り4m地点で、シールド直上21mm、官民境界0.9mmの沈下が予想されており、沈下防止対策が必要であった。

5.2 土留め壁併走掘進

本線開削部の土留め壁併走区間では、セグメントと土留め壁芯材との離隔は500mmの設計であるが、図-7に示すように掘進時には、カッター掘削部と土留め壁ソイルモルタル部分との離隔は最小250mmまで接近する。このため、慎重な線形管理と同時に、土留め壁への影響に配慮した切羽土圧の管理が要求された。

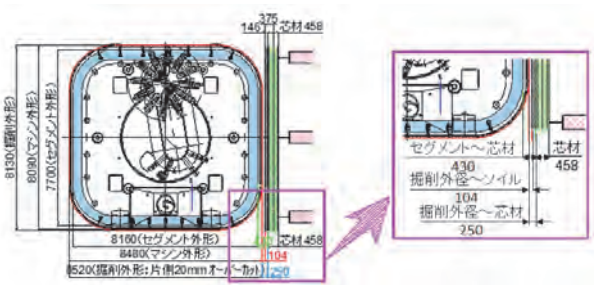


図-7 シールドと土留め壁の離隔

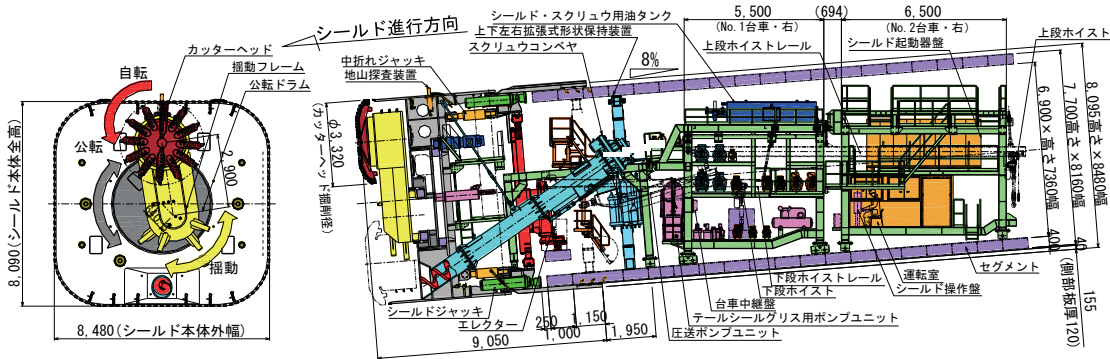


図-6 シールド機概形図

表-1 シールド機諸元表

シールド本体要目		カッターヘッド要目	
外 寸 法	▶ 高さ8,090mm × 幅8,480mm	形 式	▶ アポロカッター方式
機 長	▶ 9,050mm	公 転 周 期	▶ 4 min/rev (0.25rpm)
スキムプレート厚 (テール部)	▶ 上下155mm、左右120mm (SM490A)	カッターヘッド	▶ 回転数 4.7min ⁻¹ トルク 720kN-m
シールドジャッキ	上部 ▶ 2,500kN × 1,300st × 34.3MPa × 25本 下部 ▶ 3,000kN × 1,300st × 34.3MPa × 7本	揺動フレーム	▶ 回転数 Max0.9min ⁻¹ トルク 1,900kN-m
中折れジャッキ	▶ 2,500kN × 200st × 34.3MPa × 24本	公転ドラム	▶ 回転数 Max0.9min ⁻¹ トルク 2,200kN-m
中折れ角度	▶ 左右1deg 上下1deg	コピークットストローク	▶ Max 70mm
総 推 力	▶ 83,500kN	スクリーコンベア要目	
本 体 重 量	▶ 6,500kN (後続台車1,000kN含む)	羽 径 × ピ ッ チ	▶ φ700mm × @600mm
		回 転 数	▶ Max12min ⁻¹
		ト ル ク	▶ 常用70.3kN-m
		排 土 量	▶ 141m ³ /h

5.3 線形管理とシールド機姿勢制御

土留め壁との近接併走掘進にあたり、隔離を保ちながらの掘進が必要であった。また、下り勾配 8%での掘進と到達付近での+1.37%までの引きを伴うことから、線形管理がより重要となる。さらに、矩形シールドの場合、ローリングの発生により、テールクリアランスが著しく減少することで、セグメントの組立が困難になることが懸念された。これらのことから、シールド機、セグメントともに、方位とローリングを含めた姿勢制御を必要とした。

5.4 急勾配施工における安全確保

シールド掘進は、下り 8%の急勾配施工であることから、掘進時のセグメントをはじめとする坑内の資材搬送では、逸走防止、接触防止といった安全確保が必要であった。

6. 各種対策と計画

6.1 小土被り発進対策

発進に際しては、近隣民家にも近接しており、最小土被り 1.5m（押え盛土造成前）、矩形断面の上部が平坦であることから、沈下防止対策と地盤崩壊防止対策を施した。表-2、図-8 の内容で、押え盛土、影響遮断壁（無芯ソイルモルタル壁）、浅層改良を施し、水平挿入式傾斜計を利用した地表面沈下の自動計測を押え盛土造成時に設置した。また、シールド機前胴からは、掘進中に沈下抑制特殊充填材（ボイドキーパー）^{3),4)}を注入した。裏込め注入もシールド機からの掘進同時裏込め注入方式を採用した。発進時の立坑の状況を写真-2 に示す。

表-2 小土被り発進対策

対策	内容
(1) 押え盛土	<ul style="list-style-type: none"> 範囲・・・発進直後L=16.5m（機長程度），h=2.5m 盛土材・・・セメント改良土（50kg/m³添加） 目的・・・①切羽圧への上載圧30kN/m²付加 ②加泥材、裏込め材の噴出防止
(2) 影響遮断壁	<ul style="list-style-type: none"> 範囲・・・発進直後L=30m区間（深さ15m） 立坑土留TRD施工時に無芯ソイルモルタル壁施工（南北2面） 目的・・・周辺道路、家屋への沈下影響防止
(3) 浅層改良	<ul style="list-style-type: none"> 範囲・・・土被り1D相当（深さ8m）程度までの区間 表層・・・セメント混合改良（2m以深は薬液注入） 目的・・・①地表面沈下の抑止 ②加泥材、裏込め材の噴出防止
(4) 地表面沈下計測	<ul style="list-style-type: none"> 範囲・・・発進直後L=22m（押え盛土区間含む） 2mピッチで水平挿入式傾斜計設置（沈下量演算） 目的・・・①掘進時のリアルタイム計測 ②掘進時の設定切羽土圧の妥当性検証
(5) 沈下抑止特殊充填材	<ul style="list-style-type: none"> 範囲・・・掘進中のマシン周囲のカッター余り部分に充填（マシン前胴から掘進中に充填） 材料・・・流動性（充填性）を有し、1ヵ月で地盤強度相当に硬化



写真-2 シールド機発進状況

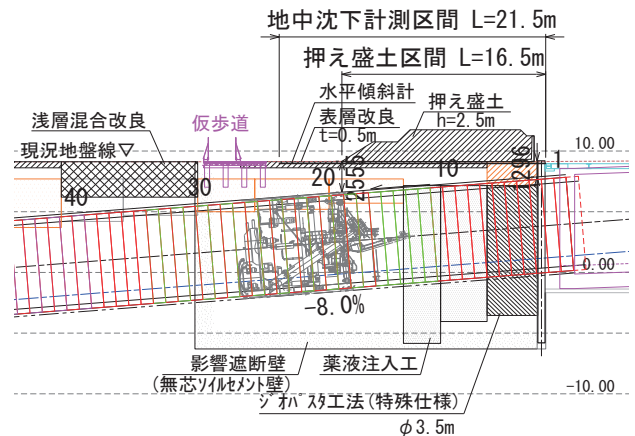


図-8 小土被り発進計画断面図

6.2 土留め壁併走掘進の対策

掘進時の切羽土圧管理では、掘進に伴い深度が連続的に増えることから、掘進 10m ごとに切羽土圧管理値を地下水水位も勘案し、段階的に設定した。掘進深度に応じた静止土圧、主動土圧、静水圧を図-9 に示す。通常のシールド工法の管理土圧は、ある程度土被りがある場合は、静止土圧に予備圧 20kN/m²を加えた値を用いるが、今回は小土被りであることと、土留め壁への影響を考慮する必要があり、予備圧は 10 kN/m²とした。

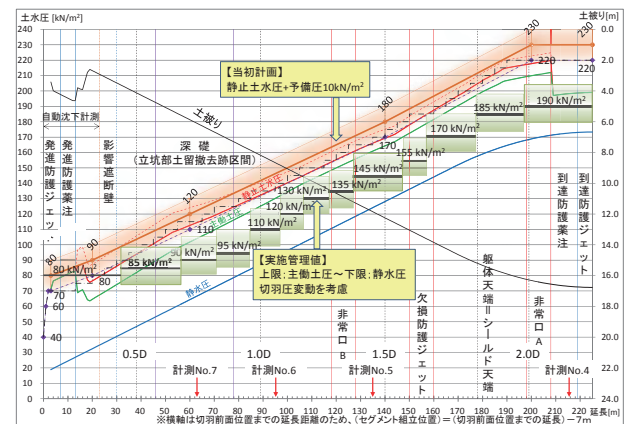


図-9 掘進深度ごとの切羽土圧管理値の設定

掘進管理に際しては、開削側の土留め計測管理データも同時に取り込み監視する計画とした。掘進時は、実測の地下水水位に基づく土水圧を再計算し、矩形シールド機通過時の土留め変位と切梁軸力、地表面沈下を計測しながら、早い段階で最適な管理値を決定し掘進管理に反映した。

アポロカッター工法における切羽土圧管理は、泥土圧式シールド工法と同様の考え方に基づいて、噴発や閉塞を防ぎ、切羽土圧を安定させるために、添加材調整によるチャンバー内での掘削土砂の均質な混合攪拌と流動性確保が

求められる。本工法では、カッターヘッドが小径で、シールド機フードから露出しているため、特に慎重な切羽安定確保が必要である。そこで、チャンバーには上下3段、左右対称で合計6点の土圧計を配置し、カッター回転に伴う土圧分布を運転室内の土圧分布監視モニター(写真-3参照)にコンター図として可視化しながら切羽土圧管理を行うこととした。掘進は、15mm/min程度の速度で、平均日進量2m(昼方のみ)で計画した。以上の対策を表-3に整理する。



写真-3 土圧分布監視モニター

表-3 土留め壁併走掘進の対策

対策	内容
(1) 計測関係	<ul style="list-style-type: none"> 本線開削部土留め計測との連携 土留め変位、土留め支保工軸力、間隙水圧等 掘進データと同じ時系列でデータ監視、整理
(2) 切羽圧管理	<ul style="list-style-type: none"> 本線開削部土留め壁の監視(目視、カメラ設置) 地表面への影響と合わせ、切羽管理土圧設定を事前に検討 静止土水圧+予備圧(10kN/m²)を基準に最適な管理値を設定 →発進時の沈下計測実績から、主働土圧+予備圧での設定に変更
(3) 姿勢制御	<ul style="list-style-type: none"> 土留め壁併走区間では土留め壁側の緩みでシールド左右不均衡の恐れ マシン姿勢制御、ローリング制御の影響が想定されるため、 カッター余掘り制御、中折れ、シールドジャッキパターンで調整
(4) 線形管理	<ul style="list-style-type: none"> シールド掘削外径と土留め壁離隔:最小250mm→慎重な線形管理が必要 セグメント幅を1.0mとし、蛇行修正セグメントを計画的に準備

6.3 線形管理とシールド機姿勢制御の対策

姿勢制御システムを導入することで、本線開削土留め壁との小離隔での掘進に際し、カッター余掘り制御によるローリング修正対策も施した。

アポロカッター工法のシールド機は、カッターの切削精度(カッター回転軌跡)±3mmで掘進する。シールド機がローリングする場合は、写真-4のカッター操作画面に示すような目標軌跡をある座標軸で回転させたような軌跡として、余掘り修正掘削する制御が可能である。



写真-4 ローリング修正掘削システム

6.4 急勾配施工における安全対策

本施工では専用の搬送台車を導入し、事前には制動確認の試験も行った。掘進中の坑内運搬状況を写真-5に示す。また、切羽でのセグメント組立に際しては、勾配の影響を考慮し、エレクター周辺の可動足場や、後部作業デッキを水平に保てるよう作業性も配慮した。



写真-5 セグメント坑内運搬状況

7. 掘進実績と評価

7.1 小土被り発進の評価

図-10に地表面沈下測量結果を示す。裏込め材と沈下抑制特殊充填材は、シールド機全長(9.05m)が発進エントランス内(地盤内)に入って坑口の止水注入が完了してから注入した。施工ヤード内でシールド機全長が地山内に入るまでは沈下抑制特殊充填材を注入できず、余掘り量に相当する沈下が発生した。しかし、注入開始以降は沈下量を5~10mmに抑制でき、注入効果があったと考える。

また、発進後の押え盛土の効果により、切羽土圧を作用させた際の添加材の地表面への噴出もなく、安定した設定圧を保つことができた。

シールド周辺地盤への沈下影響、緩み影響の防止のために築造した影響遮断壁の効果も発揮され、遮断壁外側の官民境界(歩道縁石)での地表面沈下量は1mm以下に抑えられた。

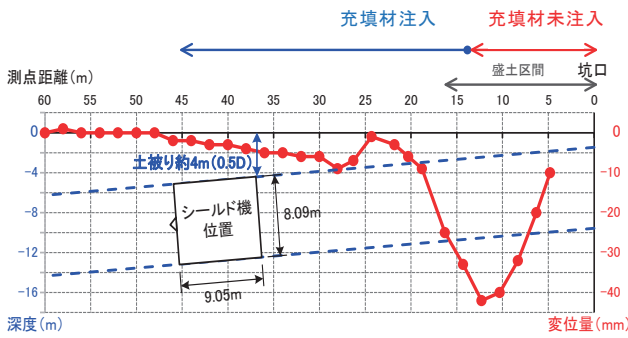


図-10 地表面沈下測量結果

7.2 土留め壁近接併走掘進の評価

掘進時は、地表面沈下抑制と、土留め壁に過剰な影響を与えないよう切羽土圧管理値を極力低く設定した。当初は、静止土水圧 (+予備圧 10kN/m^2) の設定としたが、発進時の地表面測量の結果と土留め壁への影響に配慮し、主働土圧+予備圧 10kN/m^2 まで抑えた設定に変更した。初期掘進から本掘進まで、延長225mを本線開削土留め壁からの漏水、出水を誘発せず無事終えた。

計測断面4ヵ所(図-11参照)のうち、掘進前後の影響の最も現れた測点No.6での土留め計測結果を図-12に示す。シールド機通過前後に軸力がやや減少傾向にあったが、土留め壁の変位はほとんど変化なく影響を抑えられた。

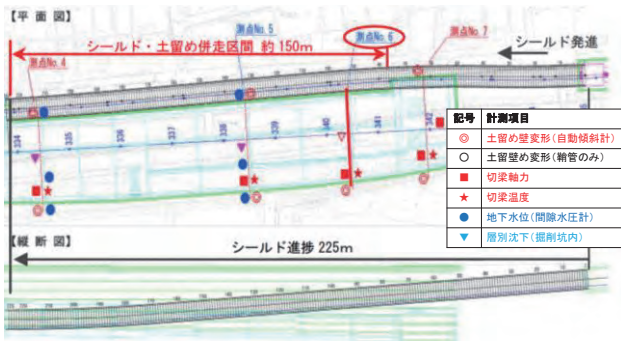


図-11 シールド併走部の土留め計測断面配置図

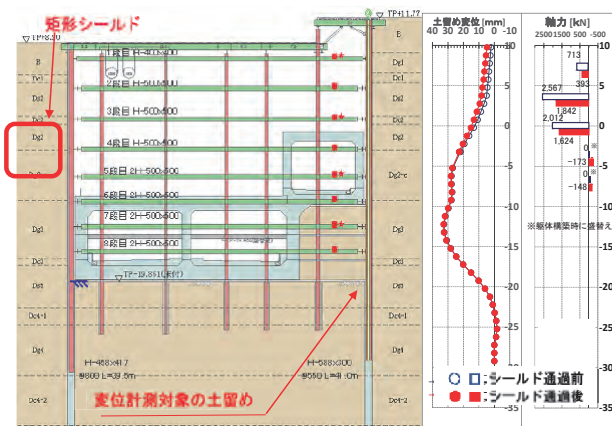


図-12 掘進前後の土留め計測結果 (測点 No.6)

7.3 姿勢制御の実績

姿勢制御では、到達付近での下り8%から1.37%まで引起す線形であったが、中折れ装置を上方向に効かせることで、セグメントに過剰な推力をかけず、目標の方位に掘進できた。

ローリング修正に対しては、ローリング角度やテールクリアランスを監視しながら、発生の程度に応じて、下記の対策を順次施した。

- ・カッター公転方向による修正
ローリング発生方向とカッター公転方向を逆転させ、地盤切削反力を利用して修正した。
- ・中折れ装置によるシールド機方位角修正
中折れ装置により、シールド機前胴の方向を傾け、重心位置が移動することで修正した。
- ・余掘り修正掘削システムによる修正
ローリング修正掘削による余掘りで、掘削軌跡を捻ることによって角度を修正した。

セグメント組立に必要なテールクリアランス確保のための施工上の限界値と、トンネル構造物の建築限界確保のための品質上の限界値から、ローリングの許容値を 0.5° に設定した。これに対し、施工中は最大 0.3° までのローリングが発生したが、上述の余掘り修正掘削システムによる修正掘進により、1機長相当(約9m)の修正掘進を継続して、基準の 0° までローリング修正に成功した。本工事で採用したアポロカッター工法の掘削機構が、矩形シールド機の姿勢制御にも有効であることが確認できた。

8. おわりに

近年、狭隘な都市部において、小土被り施工や構造物近接掘進、非円形断面トンネルの計画など厳しい条件での工事が増えている。本工事で得られた知見が、今後の同種工事の計画、施工に活用されれば幸いである。

参考文献

- 1) 奥平守幸・原田大・吉田潔・真鍋智・永森邦博・小田誠：地下通路工事における矩形シールド工法(アポロカッター工法)について、土木学会第63回年次学術講演会，2008.9
- 2) 鈴木隆文・山崎仁：東急東横線渋谷～代官山駅間地下化工事(シールド工事)，土木学会第64回年次学術講演会，2009.9
- 3) 真鍋智・渡辺幹広・馬目広幸・大嶋昇：高速道路ランプ部における矩形シールド工法の計画と施工，トンネルと地下，第49巻2号，2018.2
- 4) 真鍋智・吉田潔・渡辺幹広・戸川敬・馬目広幸・吉迫和生・牛垣勝・志村敦：矩形シールド工法による小土被り発進・既設土留め壁近接併走掘進の実績，トンネル工学研究発表会，2017.11