

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

真鍋 智¹・吉田 潔²・渡辺 幹広³・戸川 敬⁴
馬目 広幸⁵・吉迫 和生⁶・牛垣 勝⁷・志村 敦⁸

¹正会員 鹿島建設(株) 関西支店 常磐工区 J V 工事事務所 (〒591-8001 大阪府堺市北区常磐町2-11)
E-mail: manabest@kajima.com

²正会員 鹿島建設(株) 関西支店 常磐工区 J V 工事事務所 (〒591-8001 大阪府堺市北区常磐町2-11)
E-mail: ykiyoshi@kajima.com

³正会員 鹿島建設(株) 関西支店 常磐工区 J V 工事事務所 (〒591-8001 大阪府堺市北区常磐町2-11)
E-mail: mikihiro@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設(株) 関西支店 常磐工区 J V 工事事務所 (〒591-8001 大阪府堺市北区常磐町2-11)
E-mail: togawa@kajima.com

⁵正会員 鹿島建設(株) 関西支店 常磐工区 J V 工事事務所 (〒591-8001 大阪府堺市北区常磐町2-11)
E-mail: manome@kajima.com

⁶正会員 鹿島建設(株) 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail: yoshizako@kajima.com

⁷正会員 鹿島建設(株) 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)
E-mail: ushigaki@kajima.com

⁸正会員 阪神高速道路(株)建設・更新事業本部大阪建設部設計課 (〒552-0007 大阪市港区弁天1-2-1 -1900)
E-mail: atsushi-shimura@hanshin-exp.co.jp

地下に高速道路を構築する阪神高速道路大和川線建設事業のうち, 出入口ランプと本線トンネルの分岐合流部を建設する常磐工区開削トンネル工事では, ランプ拡幅部の施工にあたり, 地上の工事占用幅縮小による近隣住民の負担軽減を目的として, 出口ランプ側を開削工法から矩形シールド工法に変更した。

矩形シールド工事は, 小土被り発進, 本線開削土留め壁近接併走掘進, 下り8%急勾配掘進といった厳しい施工条件となり, これに対し厳格な切羽土圧管理による地表面沈下抑止対策やシールド機の姿勢制御, 合成セグメントの採用による断面精度の向上等の各種対策を行った。今般, 延長225mの矩形シールドの掘進を無事終えたので, その対策と成果について報告する。

Key Words : *rectangular-shaped shield tunnel, grouting materials, shallow overburden excavation*

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線常磐西出入口付近の本線トンネル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。シールド線形は, 延長225m, 発進立坑から8%の下

り勾配で, 土被りは発進部で約1.5m, 到達部で約17mである。セグメントと本線開削部の土留め壁芯材との離隔は500mmで, 約150mに渡って近接併走掘進となる。トンネル覆工は, 断面が大きい上に用地条件等の制約から覆工厚を極力小さくする必要があり, 六面鋼殻合成セグメントを採用した。本報告では, 計画段階での矩形シールド工法変更に際しての構造検討と, 施工における小土被り発進, 本線開削部の土留め壁近接の併走掘進から到達までの各種対策と実績, 評価を報告する。

2. 工事概要

(1) 事業概要

阪神高速道路大和川線は、大阪府、堺市、阪神高速道路(株)の三者が共同で事業を行う延長9.9kmの路線であり、その大部分は地下構造となっている(図-1参照)。このうち常磐工区開削トンネル工事は、堺市施行区間に位置し、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、工区両端に本線施工のシールドが転回する立坑を有し、また、両立坑間にはランプ分岐合流部(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) 矩形シールド工法への変更

ランプ出口部分については、開削トンネル構造で構築する場合、沿道民家の生活道路を長期間車両通行止めにする必要があるなど、周囲に及ぼす影響が大きいこと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、ランプ単独部分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、シールドトンネル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)。

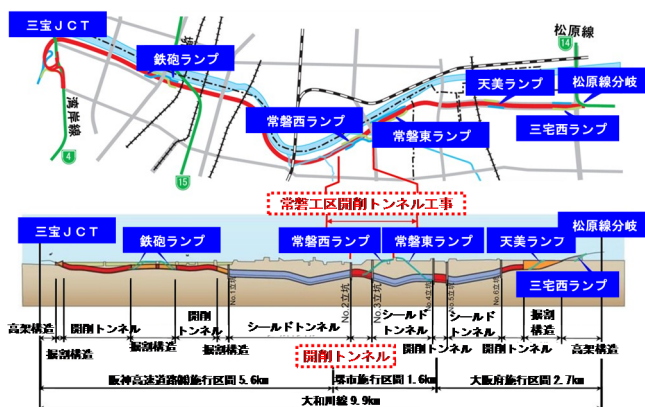


図-1 トンネル構造と事業区分（ランプ名称は仮称）

(3) シールド施工条件

矩形シールドのトンネル線形は、延長225m、発進立坑から8%の下り勾配で、土被りは発進部で1.5m、到達部で17mである。セグメントと土留め壁（芯材）との離隔は500mmを標準に計画した。トンネル平面図と断面図を図-3に示す。

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 $c=20\sim 30\text{kN/m}^2$ ）が互層で構成される硬質地盤である。図-4に土層縦断面図を示す。

(4) アポロカッター工法の導入

地盤条件や断面形状を考慮し、矩形断面の泥土圧式シールド工法で地盤改良体を含め硬質地盤掘進に実績のあるアポロカッター工法^{1)・2)}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に工場仮組立検査時のシールドマシン全景写真、次頁の図-5にシールドマシン概要図、表-1に同機の諸元表を示す。

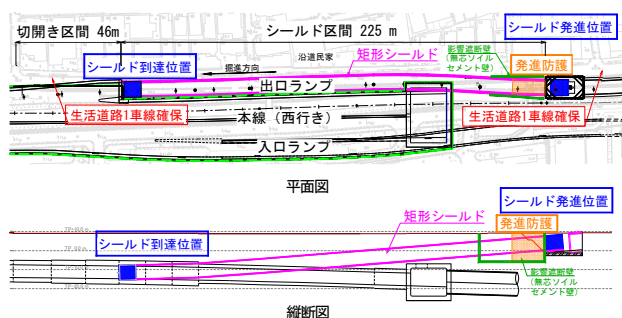


図-3 非開削工法の採用区間

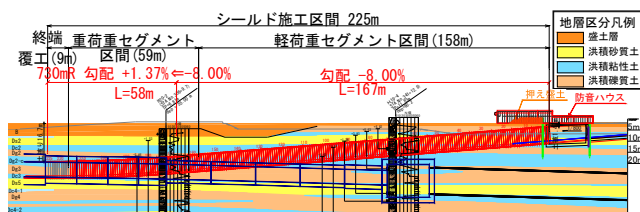


図-4 シールド掘進区間土層縦断図

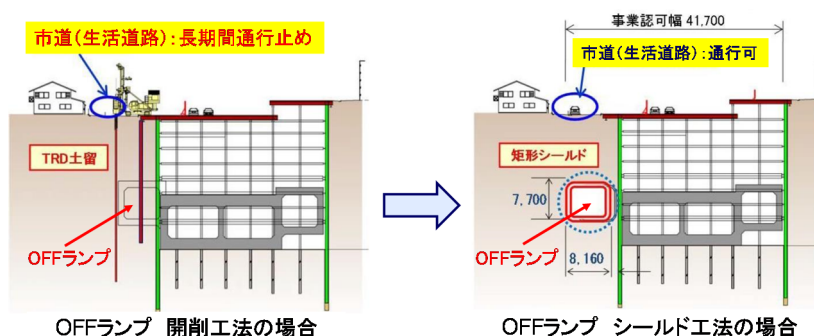


図-2 矩形シールド工法への変更

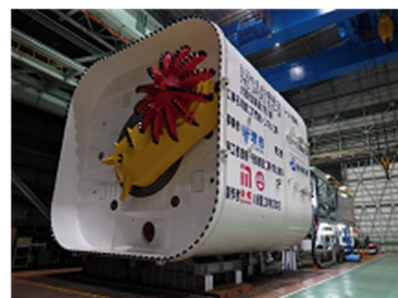


写真-1 アポロカッターシールド機

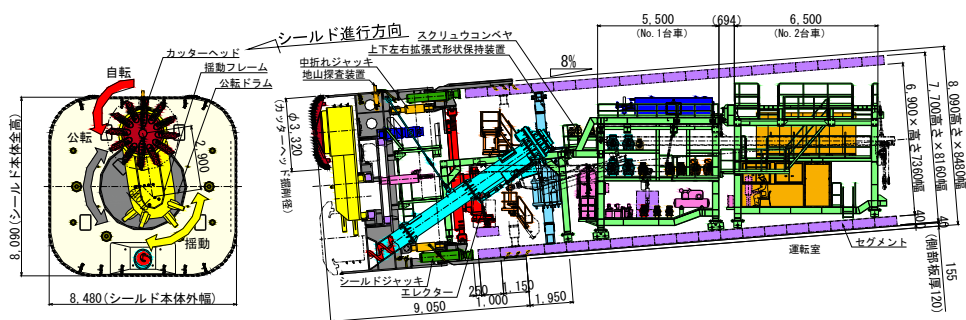


図-5 シールドマシン概要図

表-1 シールドマシン諸元表

シールド本体諸元	
外 寸 法	高さ8,090mm × 幅8,480mm
機 長	9,050mm
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
中 折 れ 角 度	左右1deg 上下1deg
総 推 力	83,500kN
カッターヘッド諸元	
形 式	アポロカッター方式
公 転 周 期	4 min/rev (0.25rpm)
カッターヘッド	回転数 4.7min ⁻¹ トルク 720kN-m
揺動フレーム	回転数 Max0.9min ⁻¹ トルク 1,900kN-m
公転ドラム	回転数 Max0.9min ⁻¹ トルク 2,200kN-m
コピーカットストローク	Max 70mm

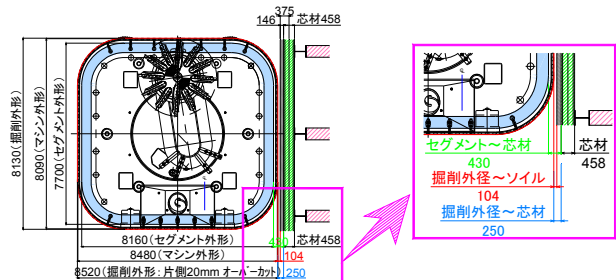


図-6 シールドと土留め壁の離隔

3. 施工上の課題

(1) 矩形断面の構造成立性

トンネルの構造設計では、事業認可幅や本線開削土留め壁との離隔確保のための幅員に対する制約や、小土被り発進といった施工条件や経済性を考慮した。

(2) 小土被り発進への対応

発進時はシールドマシン後端が地表面に近く、前述のとおりマシン先端部の土被りは1.5mである。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の沈下が想定されており、沈下防止対策が必要となった。

(3) 本線開削土留め壁との近接併走掘進

本線開削部の土留め壁併走区間では、図-6に示すように掘進時のシールド掘削外径と土留め壁芯材との実際の離隔は、さらに最小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。

(4) 到達時の既設土留め壁への影響抑制

図-7に示すように開削側の躯体を地中切開き工法によって拡幅していることから、到達掘進は土留め壁の手前で停止する。到達側の既設土留めの一部には欠損防護工が施されている。このため、到達反力支保工を設置し、到達掘進時のシールド推力や切羽土圧の作用による土留め変位や出水に留意する必要があった。

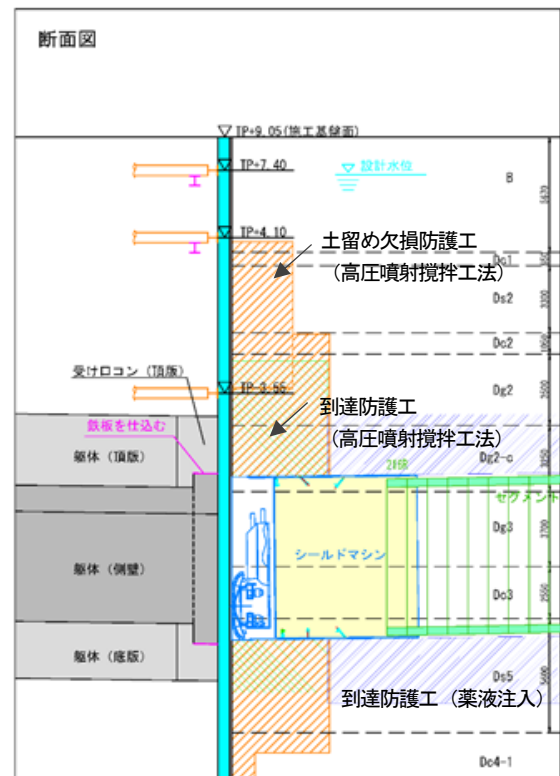
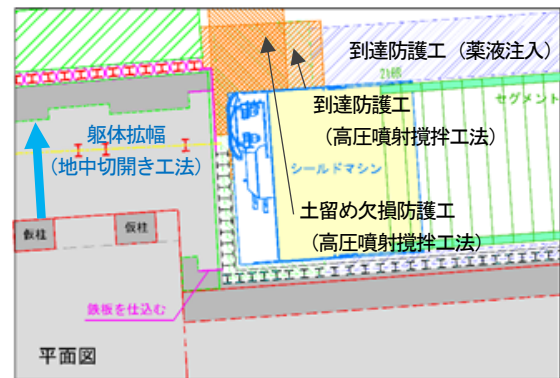


図-7 シールド到達部計画図

(5) 線形管理とシールド姿勢制御

土留め壁との近接併走掘進にあたり離隔を保ちながらの掘進が必要である。また、下り勾配8%での掘進と到達付近での+1.37%までの引起しを伴うことから、線形管理がより重要となる。さらに矩形シールドの場合、ローリング発生により、マシンとセグメントの隙間（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組立が困難になることが懸念された。これらのことから、マシン、セグメントともに方位とローリングを含めた姿勢制御が必要であった。

4. 各種対策と計画

前述の5項目の課題への対策を以下で述べる。

(1) 六面鋼殻合成セグメントの採用

a) セグメント桁高に関する制約条件

本線開削土留め壁併走区間の断面を図-8に示す。前述のとおりシールドマシンは本線開削土留め壁と約150mに渡って併走するが、シールドセグメントと土留め壁芯材との離隔は既往実績の最小値から約500mmとした。トンネルを事業認可幅に収めることが設計の前提条件であり、シールドの蛇行余裕50mm、耐火被覆代25mm、内装余裕80mmを考慮すると、トンネル形状を非円形とし、かつセグメント桁高を400mm以下にする必要があった。

セグメント設計は、小土被り区間は緩み土圧を用いて計算しているが、土留め壁併走区間の深度の大きい到達付近では、図-9に示す検討モデルで計算した。出口ランプは本線トンネル側の大規模開削工事近傍を通過することから、鉛直土圧については土のアーチング効果は期待できないと判断し、全土被り荷重を考慮した。また、本線トンネル側の埋め戻し材である軽量盛土（単位体積重量11kN/m³）は自立性も高いことから、この区間の本線トンネル側の側方土圧は作用しないものとし、地盤反力も低減して詳細設計を行った。

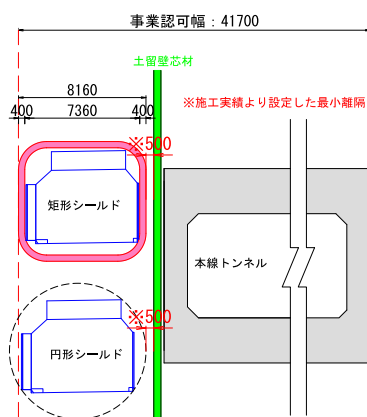


図-8 土留め壁併走区間断面図

b) セグメント種別の選定

セグメントの選定は表-2に示す内容で各種セグメントを比較選定した。RCセグメントは桁高400mm以下に収まらないこと、鋼製セグメントは経済性で劣ることから除外した。一方、桁高を小さくしながら、耐火仕上げ方法との取合いと経済性を考慮すると合成セグメントが今回の工事には適している。このうち、五面鋼殻合成セグメントは、矩形構造であることから内面側に作用する引張り応力が大きく、コンクリートのひび割れが発生する恐れがあり、耐久性と耐火性の低下が懸念されることから不適と考えた。そこで、内面側も鋼殻で覆われ、ひび割れの恐れのない六面鋼殻合成セグメントを採用した。

六面鋼殻合成セグメントは、六面全てを鋼殻で覆い、スキンプレートに溶植したスタッドジベルによりコンクリートと一体化した構造の合成セグメントである。このセグメントは、五面鋼殻構造のセグメントよりも縁端部に継手ボルトを配置できることから、継手応力に対しても有利である。耐火仕上げは、同種工事の実績をもとに被覆厚25mmの耐火モルタルの吹付を行う計画とした。

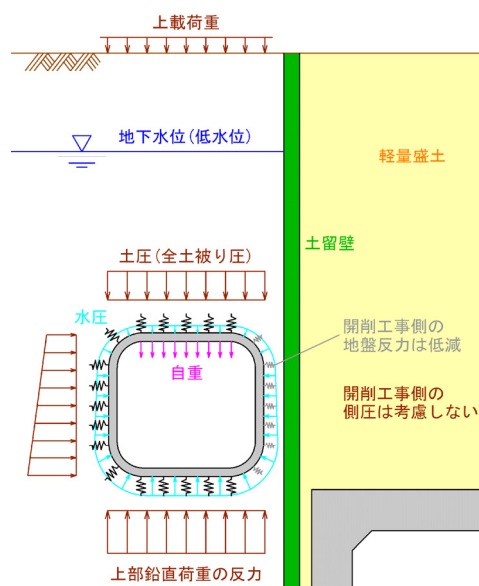


図-9 セグメント設計荷重モデル図

表-2 セグメント種別の比較選定

項目	RCセグメント	鋼製セグメント	六面鋼殻合成セグメント
構造概要			
事業認可幅	・桁高が750mm必要 ×(事業認可幅に収まらない)	・問題なし ○	・問題なし ○
経済性	・セグメント単体では最も安価 ・掘削断面は最も大きくなる。 ○	・鋼材重量が多くコスト増 ・耐火パネルが高価 △	・STセグメントより優位 ・耐火吹付で対応でき安価 ○
品質	・ひび割れの懸念あり ・矩形の実績あり △	・ひび割れの懸念なし ・矩形の実績あり ○	・ひび割れの懸念なし ・矩形の実績あり ○
評価	×	△	○(採用)

c) トンネル断面形状の設計

トンネル断面形状は、円形に近いほどトンネルのアーチ効果が期待できるので、セグメントに生じる応力が低減し、桁高を小さくすることができる。今回工事では、表-3に示す内容で断面形状の比較検討を行い、浮上り、施工性と、地表面離隔（土被り）の観点から、トンネル上下左右の面が平坦形状の矩形案に決定した。他の複合円形形状案（上下左右にライズを配置）は、事業認可幅に収まらないことから除外した。なお、選定した矩形案では、発進直後の小土被り区間では完成時の浮上り安全率1.2を満足していないため、路盤施工段階で、防錆塗装した鋼板をインバートに設置する計画とした。

d) セグメントの分割（ピース割）

セグメント幅は、既往の矩形シールド実績と線形管理への適応性、そして経済性を考慮し、1.0m幅とした。

セグメントの分割は、曲げモーメントと継手配置を考慮し、8分割とした（図-10参照）。Kセグメントについては、甲組タイプと乙組タイプを同種構成のセグメントで兼用するために上下に配置することにした（上下反転することで甲乙を兼用）。これにより、セグメントのピースごとの製作種別を半数程度に減らすことができる。Kセグメントは軸方向挿入としており、挿入角度は類似の実績と組立作業性を考慮して 3.5° とした。継手角度は、断面力の伝達を考慮すると角度を有する場合には軸力作用時の分力によるせん断力で滑動する恐れや、製作精度確保が難しいことから、 0° とした。写真-2に水平仮組検査時のセグメント組立状況を示す。

表-3 トンネル断面形状の比較検討

項目	矩形案	低ライズ案（上下）	高ライズ案（上下）
断面形状 （六面鋼殻 合成セグメント）			
特徴	・必要最小限の内空を確保	・ライズを設けることで発生応力を抑制した断面	
構 造 性	発生断面力 (曲げモーメント) 	発生断面力 (曲げモーメント) 	発生断面力 (曲げモーメント)
浮上りに対する 安定性	・安全率 $F_s=1.11$ ○	・安全率 $F_s=1.07$ △	・安全率 $F_s=1.05$ △
施 工 性	下部が水平であり作業性に優れる ○	下部が湾曲しているため施工性と組立精度確保に時間を要する △	△
評 価	○（採用）	△	△

(2) 小土被り発進の各種対策

発進に際しては、近隣民家にも接近しており、以下にあげる要件から沈下抑止対策と地盤崩壊防止策を施した。

- ・小土被り（押え盛土造成前の最小土被り1.5m）
- ・矩形断面の上部が平坦

表-4の内容で、押え盛土と影響遮断壁（無芯ソイルモルタル壁）を配置し、水平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、シールドマシン前胴からは掘進中に沈下抑止特殊充填材を使用した。裏込め注入もシールドマシンからの掘進同時裏込め注入方式を採用した。写真-3に発進状況を示す。各種の小土被り発進対策について次頁で述べる。

表-4 小土被り発進対策

対 策	内 容
(1) 押え盛土	・範囲・・・発進直後 $L=16.5\text{m}$ （機長程度）、 $h=2.5\text{m}$ ・盛土材・・・セメント改良土（ $50\text{kg}/\text{m}^3$ 添加） ・目的・・・①切羽圧への上載圧 $30\text{kN}/\text{m}^2$ 付加 ②加圧材、裏込材の噴出防止
(2) 影響遮断壁	・範囲・・・発進直後 $L=30\text{m}$ 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	・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加圧材、裏込め材の噴出防止
(4) 地表面 沈下計測	・範囲・・・発進直後 $L=22\text{m}$ （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	・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

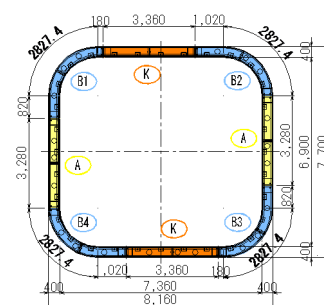


図-10 セグメント分割計画図



写真-2 セグメント水平仮組検査状況

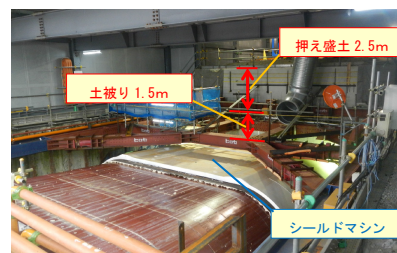


写真-3 シールド発進状況

a) 押え盛土

シールド発進時の小土被り部分に対し、加圧注入する添加材や裏込め注入材が地上に噴出するのを防ぐために、シールド機長（約9m）、幅（約8.5m）を考慮し、長さ16.5m、幅10m、高さ2.5mの盛土を設置した。これにより、上載圧30kN/m²を付加することができた。盛土材は、セメント添加量50kg/m³の改良土を用いた。

b) 影響遮断壁

発進直後の小土被り区間約30m（シールド高さ約8m（1.0D）の半分相当の0.5Dの区間）の範囲で、シールドの両側に、無芯ソイルモルタル壁を築造した。これにより、シールド周辺の道路や家屋への沈下影響を抑止した。

c) 浅層改良

土被り約8m（1.0D）までの区間に対し、地表面沈下の影響を極力小さくする目的で、セメント混合改良を施した。また、深さ2m以深からシールド直上までの範囲は、薬液注入を行った。

d) 地表面沈下計測

シールド掘進中は進捗に応じて、シールド直上（中心線上）と左右端部で地表面沈下計測を実施した。特に発進直後の22m区間では、掘進中の連続計測が可能な自動計測を行うこととした。自動計測方法は、上述の押え盛土造成時に地表面に分割したさや管を設置し、中に2mピッチの水平傾斜計を挿入する方式のもので、各点の傾斜測定値から始端の固定点を基準に変位量を演算する。自動計測の精度確認と補間の目的でレベル測量による監視を行った。

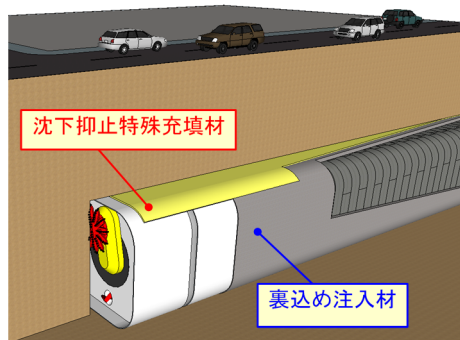


図-11 シールド余掘り部への充填注入概念図

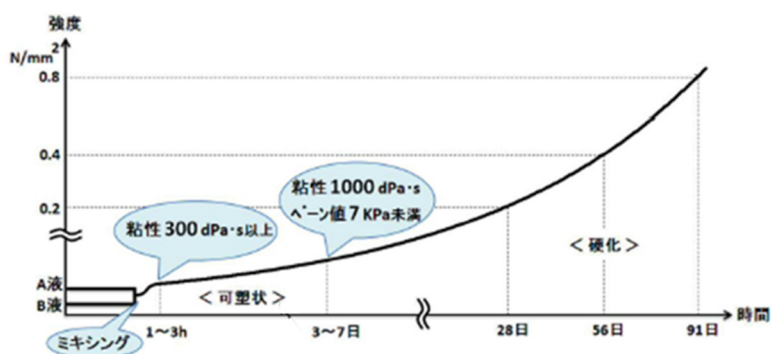


図-12 沈下抑止特殊充填材の強度発現曲線

e) 沈下抑止特殊充填材

シールド掘進では、掘進に伴ってシールド機後端（テール）通過後のセグメントと地山の空隙に裏込め注入を行う工程が沈下抑制に重要である。シールド掘進時のカッターの余掘りがマシン前面の切羽で発生し、掘進中のマシン外周に空隙が残る。今回の矩形シールド工法では、マシン上部が平坦であることから、マシン外周部で発生する空隙20mmも地表面沈下の要因となると考え、掘進中のマシン前面から外周部に沈下抑止特殊充填材（ボイドキーパー）を注入することにした（図-11参照）。なお、テールからのマシン内蔵の注入管による同時裏込め注入も併せて行った。

沈下抑止特殊充填材は、シールド機の通過と外周部への充填に必要な流動性を1週間程度保ち、その後2〜3ヵ月程度かけて強度が漸増し地山相当の一軸圧縮強さ600〜900kN/m²となる材料である。図-12に強度発現状況を示す。この材料は、シールド裏込め注入材と同様に2液性であり、主材のA液と硬化促進剤のB液を注入孔の直前で混合させ直ちにゲル化してシールド機通過時の地山保持に必要な硬さを発揮する。写真-4は2液混合前のA液の流動性を示す状況、写真-5は2液混合直後の可塑性状態、そして写真-6は固化後の状況である。



写真-4 沈下抑止特殊充填材（A液）の流動性

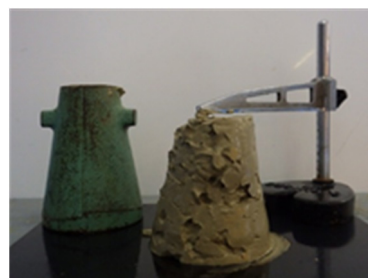


写真-5 2液混合直後の沈下抑止特殊充填材



写真-6 固化後の沈下抑止特殊充填材

(3) 土留め壁近接併走掘進の切羽土圧管理値

掘進時の切羽土圧管理では、今回の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位も勘案し段階的に設定した。掘進距離、深度に応じた静止土圧、主働土圧、静水圧を図-13に示す。

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んで監視する計画とした。図-14に開削部の計測配置図を示す。掘進時は、実測の地下水位に基づく土水圧を再計算し、矩形シールド通過時の土留め変位と切梁軸力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-7参照）にコンター図で可視化しながらの切羽土圧管理を行うこととした。

土留め支保工は静止土水圧に耐える設計であるが、土留め壁ソイルモルタル部分のひび割れや抜け出しによる出水防止のための補強鋼板を本線開削側の土留め壁内面に設置した（写真-8参照）。

掘進は15mm/min程度の速度で平均日進量2m（昼方のみ）である。以上の対策を表-5に整理する。

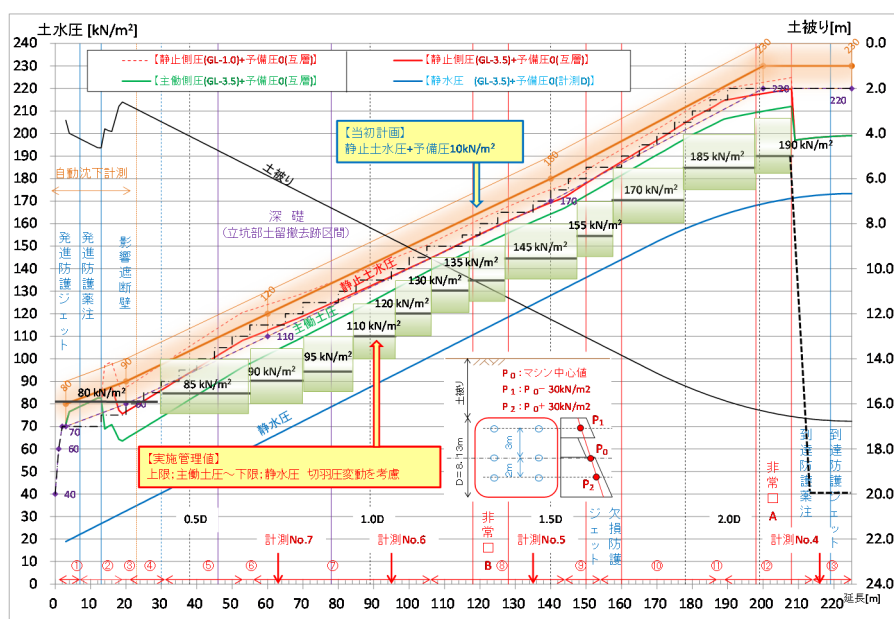


図-13 掘進深度に応じた切羽土圧管理値の設定

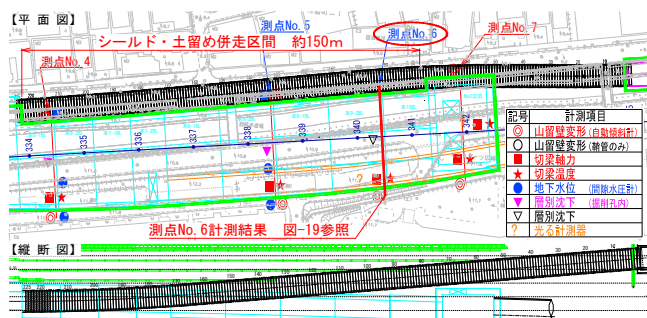


図-14 シールド併走部の土留め計測断面配置図



写真-8 土留め壁内面鋼板補強状況

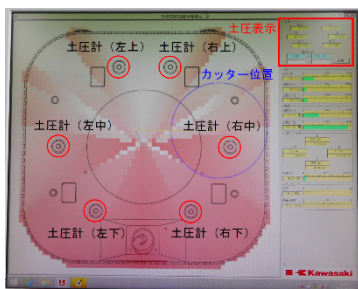


写真-7 土圧分布監視モニターにおけるコンター図

表-5 土留め壁併走掘進の対策

対 策	内 容
(1) 計測関係	・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	・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	・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、 - カッター余振制御、中折れ、シールドジャッキパターンで調整
(4) 線形管理	・シールド掘削外径と土留め壁間隔；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

(4) 到達掘進における止水確保と反力支保工の管理

シールドの到達防護区間への進入時には、周辺地盤からの止水を確認しながら極力低い切羽土圧、推力で掘進するよう速度を抑えることとした。到達掘進に際しての止水性を高めるために、図-15に示すように到達防護工の薬液注入区間を以下にあげる計画条件を考慮して4.7m拡大した。

- ・ 到達の受け口が躯体構築前の仮設状態で到達するため、到達側への防護隔壁等の設置ができないため、より確実な止水が必要不可欠である。
- ・ 到達部の薬液注入範囲を4.7m拡大して12.05mとすることで、地盤改良体（高圧噴射攪拌工法）に進入する時点でシールドマシン全体が止水区間に入るようにする（シールド機長+3m確保）。

到達時のシールド推力や切羽土圧の作用による土留め壁への影響を把握するために、図-16に示す計画で到達部側土留め壁に反力支保工を設置し、支保工の軸力の自動計測を行った。到達時の土留め壁と反力支保工は、主働土圧+予備圧（20kN/m²）に耐える設計とした。次頁の写真-9に到達部の状況を示す。

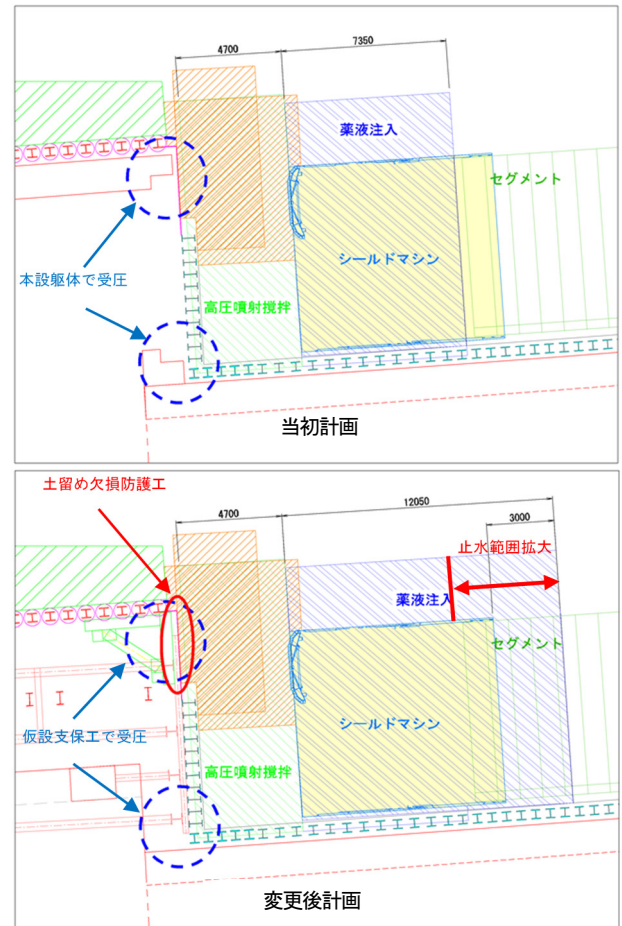


図-15 到達防護工における薬液注入範囲の拡大

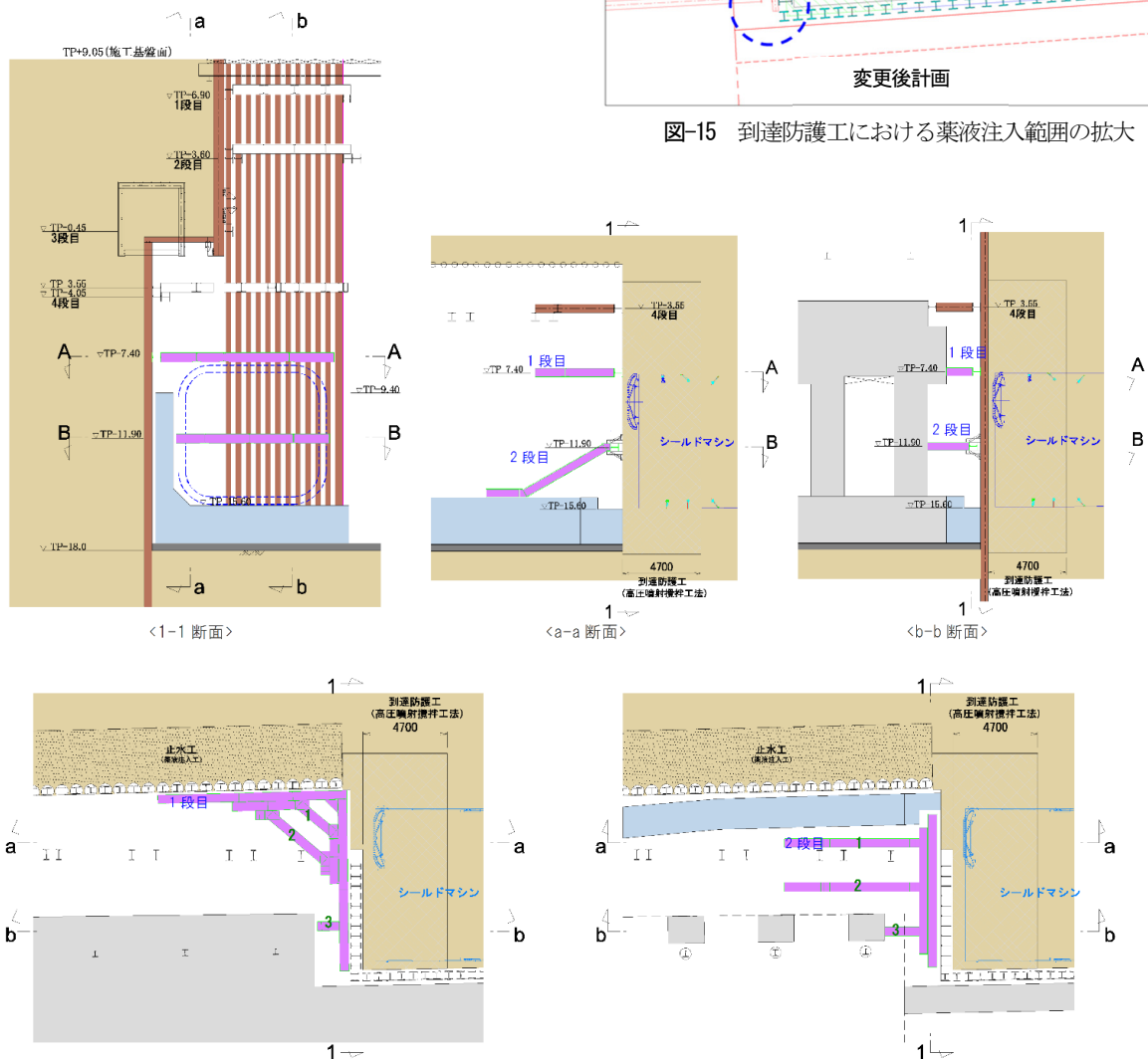


図-16 シールド到達部反力支保工計画図

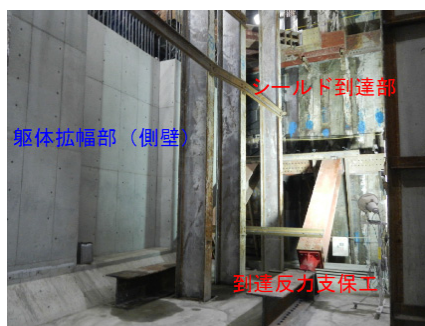


写真-9 シールド到達部

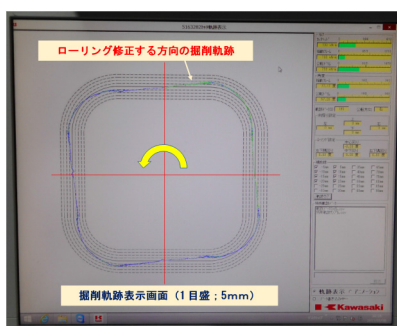


写真-10 ローリング修正掘削システム（操作画面）



写真-11 坑内全景

表-6 セグメント組立精度・線形精度（実績）

		管理値	発進部（土被り4m） （軽荷重仕様セグメント）	到達部（土被り17m） （重荷重仕様セグメント）
組立精度 （最大値）	内空変位（水平）[mm]	±50	-12	+8
	内空変位（鉛直）[mm]	±50	-10	-15
	目開き[mm]	2	0	0
	目違い[mm]	4	1.0	1.5
線形精度 （最大値）	左右方向[mm]	±50	-25	-30
	上下方向[mm]	±50	-15	+30
	ローリング[deg]	±0.50	+0.30	+0.13

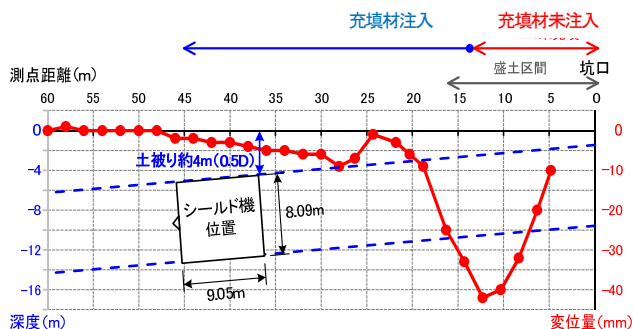


図-17 発進時の地表面沈下測量結果（土被り0.5D掘進時）

(5) 姿勢制御システムの導入（線形・姿勢管理）

本線開削土留め壁との小離隔の掘進に際し、カッター余掘り制御によるローリング修正対策も施すこととした。

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。マシンがローリングする場合は、写真-10のカッター操作画面に示すように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。

なお、シールド機には曲線施工時の余掘り量低減と、到達付近での掘進勾配変化（シールド機の引起し）に対応するために中折れ装置を装備した。

5. 掘進実績と評価

これまでに述べた5項目の課題と対策に対する施工実績と評価を以下にまとめる。

(1) 六面鋼殻合成セグメントの組立・線形精度（品質）

今回工事で採用した六面鋼殻合成セグメントは、継手剛性が高くて他種のセグメントに比べて大きく取れ、桁高を小さくするのに有効なセグメントである。今回の施工でのセグメントの組立精度に関する実績を表-6にまとめる。到達後の坑内状況を写真-11に示す。

組立精度は、内空変位の最大量が管理値±50mmに対し、土被りの小さい軽荷重設計セグメントの範囲では、水平変位-12mm、鉛直変位-10mmであった。全土被り圧

で設計した重荷重設計セグメントの範囲では、水平変位+8mm、鉛直変位-15mmであった。扁平な矩形セグメントで懸念された内空変位の発生は、シールド機に装備の上下左右拡張式の形状保持装置の効果もあり、管理値以内で収まった。また、セグメントピース間の目開きの発生もなく、目違い量も最大1.5mmと微量であった。

線形精度も、左右方向、上下方向ともに最大変位量、到達精度ともに±30mmで管理値±50mm以内を満足した。

(2) 小土被り発進の評価

図-17、図-18（次頁）に地表面沈下計測結果（シールド機が図中の位置まで来た時点でのシールド中心線上での地表面沈下量）を示す。裏込め材と沈下抑止特殊充填材は、シールド機全長（9.05m）が発進立坑エントランス内（地盤内）に入ってから坑口止水注入が完了してから充填した。発進直後の未充填区間（工事占用帯の発進基地内）では、カッター余掘り分に相当する沈下が最大40mm発生した。しかし、充填開始後は沈下量が5～10mm以下に抑制され、沈下抑止特殊充填材の効果が発揮されたと考える。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土圧を保つこともできた。シールド周辺地盤への沈下影響、緩み影響の抑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。

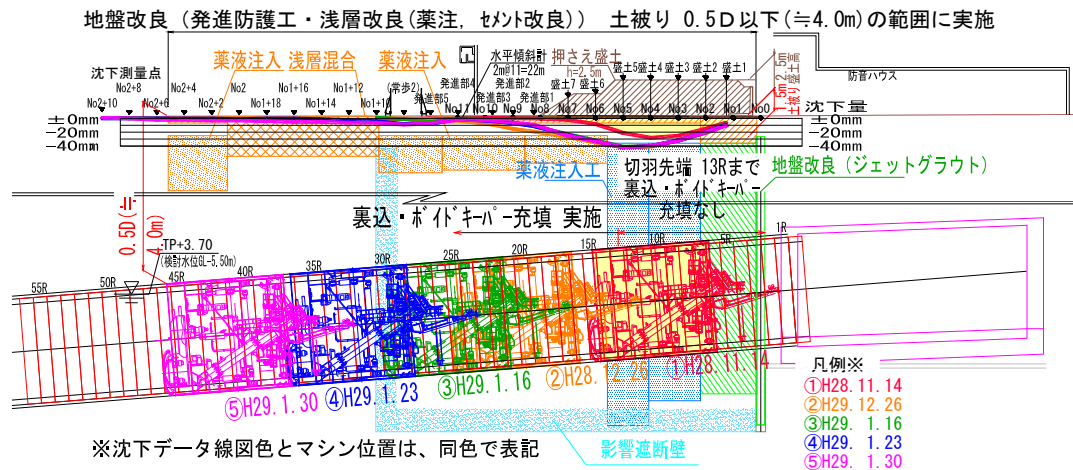


図-18 発進時の各種対策と地表面沈下測量結果 (シールド中心線上の経時変化)

(3) 土留め壁近接併走掘進の評価

掘進時は地表面沈下を抑制すると同時に、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) で設定したが、発進時の実績で沈下が抑えられたことから、主働土圧+予備圧 (10kN/m²) 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、出水を誘発することなく無事終えた。

計測断面4ヵ所のうち、土留め壁への作用土圧が大きい深度をシールドが通過するため、掘進前後の影響が最も現れた測点No.6での土留め計測結果を図-19に示す。シールド通過前後で軸力がやや減少傾向にあったが、土留め壁変位はほとんど変化なく影響を抑えられた。

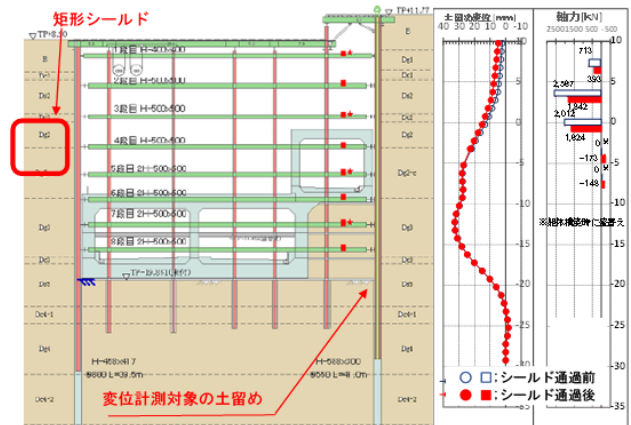


図-19 掘進前後の土留め計測結果 (測点 No.6)

(4) 到達掘進の実績

到達掘進に際し、到達防護区間への進入前に到達棲部の土留め壁面の上下左右の4ヵ所で止水確認の削孔を行い、漏水状態が微量 (0.1ℓ/min) であることを確認した。掘進中は、漏水状態の監視と併せ自動計測による反力支保工の軸力を見ながら掘進速度、推力を調整した。設計強度3,000kN/m²の高圧噴射攪拌工法による地盤改良体掘進時には、軸力が1次管理値 (土留め支保工の設計許容耐力の70%) に設定) まで上昇した。そこで、掘進速度を3mm/minに抑え、周辺地盤からの地下水の浸入がないことと、地表面沈下が抑えられていることを確認した上で切羽土圧をさらに静水圧相当まで下げ、シールド機カッター先端が到達部土留め壁の手前10cmの位置で掘進を無事終了した。

(5) 姿勢制御の実績

矩形シールド機の姿勢制御では、到達付近での下り8%から+1.37%まで引き起こす線形であったが、中折れ装置を上方向に効かせることにより、セグメントに過剰な推力をかけることなく、目標の方位に掘進できた。

ローリング修正に対しては、掘進中の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た修正を行った。

・中折れ装置によるマシン方位角変更による修正

中折れ装置により、マシン前胴の方向を傾け、重心位置が移動することによる修正方法を用いた。

・余掘り修正掘削システムによる修正

前述の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修正を行った。

ローリング修正実績として、セグメント組立に必要なテールクリアランスの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、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機長相当の約9mの修正掘進を継続して基準の0°までのローリング修正に成功した。今回工事で採用したアポロカッター工法の掘削機構が、矩形シールドの姿勢制御にも有効であることが確認できた。

6. 結論

今回の工事では、厳しい施工条件下での矩形シールド施工で以下にあげる成果が得られた。

(1) 六面鋼殻合成セグメントの適用性

掘削断面縮小を図るべく採用した合成セグメントの組立精度は、扁平な矩形断面トンネルにおいても管理値内に収め、品質を満たした。

(2) 矩形シールド小土被り発進の各種対策

小土被り発進では、地表面沈下の影響が最も懸念されたが、押え盛土、影響遮断壁、浅層改良、そして、沈下抑止特殊充填材の各種対策が有効に働き、管理値内で無事に発進させることができた。

(3) 既設土留め壁との近接併走掘進の切羽土圧管理

掘進深度に応じた切羽土圧管理値の設定により、地表面沈下をシールド直上10mm以下、官民境界1mm以下に抑え、既設土留め壁への影響もなく掘進を無事終えた。特に実際の地下水圧を勘案しながら、発進時の自動沈下計測の結果をもとに、実施管理値を主働土圧+予備圧(10kN/m²)まで下げた手法が影響抑制に有効であった。

(4) 到達掘進における既設土留め壁への影響抑制

到達掘進に際しては、今回の施工条件を勘案した上で到達防護工の薬液注入範囲を拡大し、周辺地盤からの地下水浸入を防いだ。これにより、到達掘進時の切羽土圧

を静水圧程度まで下げ、到達土留め壁へのシールド推力、切羽土圧の影響を抑えながら無事到達することができた。

(5) 矩形シールド掘進における姿勢制御と線形管理

上下左右の蛇行余裕±50mmに対し、最大30mmで線形を確保できた。また、ローリングも管理値0.5°に対し、余掘り修正掘削システムの活用により最大0.3°に抑え、精度の良いセグメント組立を行うことができた。

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工事の計画、施工に活用されれば幸いである。

謝辞： 今回の工事に際し、矩形シールド工法への変更に伴う計画、設計から施工まで、大和川線トンネル技術委員会（大西有三委員長、建山和由幹事長ら）での審議、ご指導をいただいた。工事遂行にあたりご尽力いただいた関係者に謝意を表する。

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.

(2017.8.11 受付)

RECTANGULAR-SHAPED SHIELD TUNNELING WORKS UNDER DIFFICULT CONDITIONS AS SHALLOW OVERBURDEN AND CLOSE PROXIMITY WITH EXISTING RETAINING WALLS

Satoshi MANABE, Kiyoshi YOSHIDA, Mikihiro WATANABE, Takashi TOGAWA, Hiroyuki MANOME, Kazuo YOSHIZAKO, Masaru USHIGAKI and Atsushi SHIMURA

In Hanshin Expressway Yamato River Line Tokiwa Section Cut and Cover Tunnel project, a couple of ramps and junctions connecting with an underground expressway are built. Regarding the exit ramp, construction method is changed from cut and cover method to rectangular-shaped shield one, to avoid occupation of neighbors' access road.

Related to excavation by the rectangular-shaped shield machine, there exist several difficult conditions as; shallow overburden at starting shaft, close proximity with existing retaining walls for building the main expressway, and steep downward slope of 8% in longitudinal alignment. As countermeasures, protection of surface settlement by strict control of cutting face pressure and steering devices, and enhance accuracy of cross-section alignment by adopting composite segments are executed. In consequence, excavation of the exit ramp 225 meters in length is successfully completed recently. In this paper, the countermeasures and their results are reported.