

矩形シールド工法による高速道路ランプ部の施工実績

アポロカッター工法による小土被り・既設土留め壁近接併走掘進 阪神高速道路大和川線 常磐工区開削トンネル工事

真 鍋 智・加 藤 淳 司・浅 川 剛

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へ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。

キーワード：開削工法、泥土圧式シールド工法、矩形シールド工法、アポロカッター工法、切羽土圧管理、沈下抑止特殊充填材

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、近隣住民へ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ことを目的に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、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にわた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への変更の際の構造検討と、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

府道高速大和川線は、大阪府、堺市、阪神高速道路(株)の三者共同事業による延長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)。

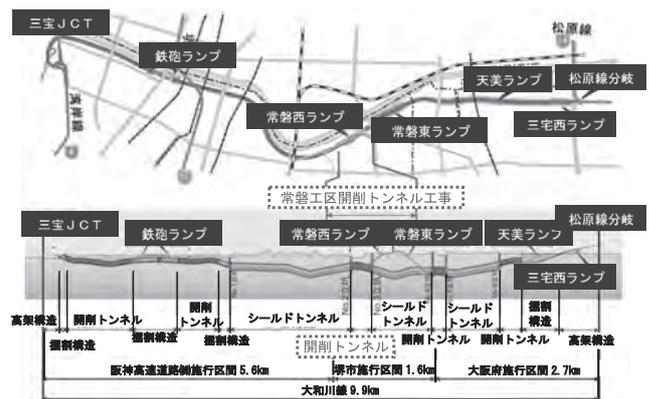


図-1 トンネル構造と事業区分 (ランプ名称は仮称)

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を転回させる立坑を有し、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)。

(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%の下り勾配となり、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。

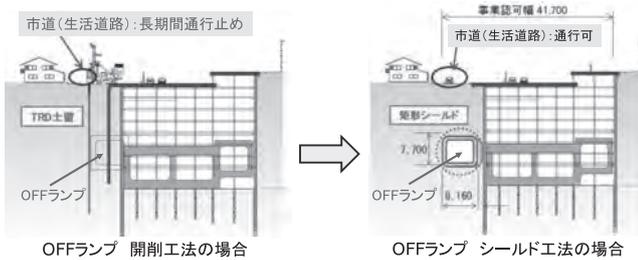


図-2 矩形シールド工法への変更

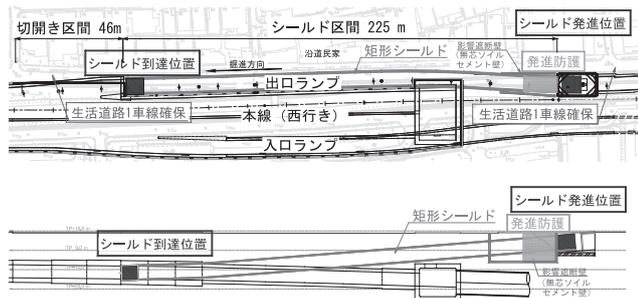


図-3 非開削工法の採用区間

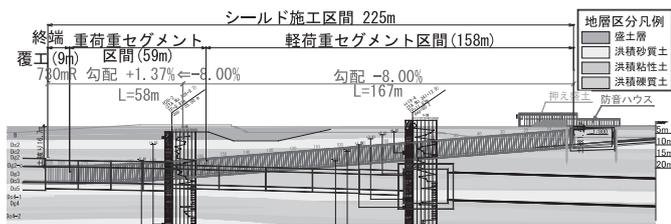


図-4 シールド掘進区間土層縦断面図

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=20~30kN/m²)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のうち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により、矩形をはじめ多様な断面形状に対応可能であり、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。

3. 施工上の課題

(1) 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、沈下防止対策を必要とした。



写真-1 アポロカッターシールド機

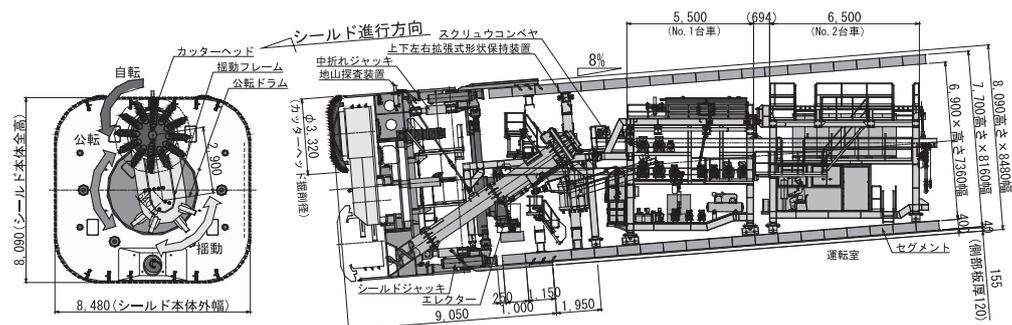
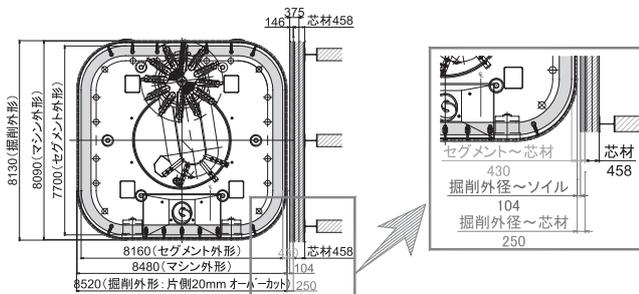


図-5 シールドマシン概要図

表一 シールドマシン諸元表

シールド本体諸元	
外 寸 法	高さ 8,090 mm × 幅 8,480 mm
機 長	9,050 mm
シールド	上部 2,500 kN × 1,300 st × 34.3 MPa × 25 本
ジャッキ	下部 3,000 kN × 1,300 st × 34.3 MPa × 7 本
中 折 れ 角 度	左右 1 deg 上下 1 deg
総 推 力	83,500 kN
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 (0.25 rpm)
カッターヘッド	回転数 4.7 min ⁻¹ トルク 720 kN-m
揺動フレーム	回転数 Max 0.9 min ⁻¹ トルク 1,900 kN-m
公 転 ド ラ ム	回転数 Max 0.9 min ⁻¹ トルク 2,200 kN-m
コピーカットストローク	Max 70 mm



図一六 シールドと土留め壁の離隔

(2) 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、図一六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 250 mm 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。

(3) 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間隙（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を必要とした。

(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、セグメントや各種資材の坑内搬送においても、逸

走等による作業員との接触防止をはじめとする安全対策が必要である。また、切羽を含め坑内作業員の転倒を防ぐことや搬送設備の滑動防止といった対策も事前に計画する必要があった。

4. 各種対策と計画

(1) 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小土被り 1.5 m）
- ・矩形断面の上部が平坦

表一 2 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。写真一 2 に発進状況を示す。

(2) 土留め壁近接併走掘進の切羽土圧管理

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 10 m ごとに切羽土

表一 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=16.5 m（機長程度）、h=2.5 m ・盛土材…セメント改良土（50 kg/m³ 添加） ・目的…①切羽圧への上載圧 30 kN/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=30 m 区間（深さ 15 m） ・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 8 m）程度までの区間 ・表層…セメント混合改良（2 m 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=22 m（押え盛土区間含む）2 m 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掘り部分に充填（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 ヶ月で地盤強度相当に硬化

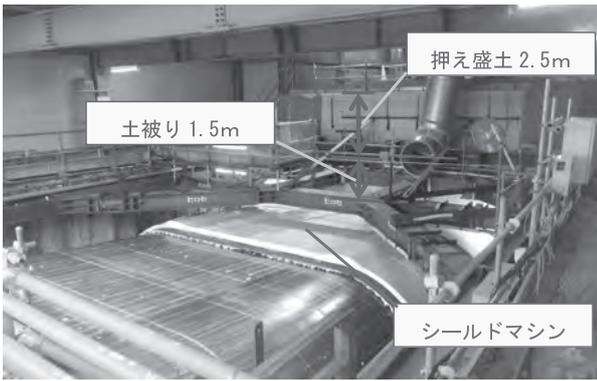


写真-2 シールド発進状況

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、主動土圧、静水圧を図-7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み監視する計画とした。図-8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-3参照）にコンター図として可視化しながらの切羽土圧管理を行うこととした。

掘進は15 mm/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-3に整理する。

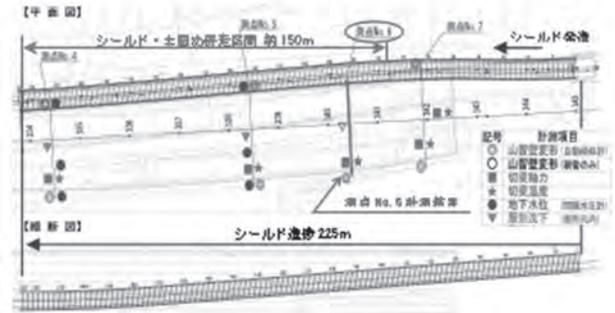


図-8 シールド併走部の土留め計測断面配置図

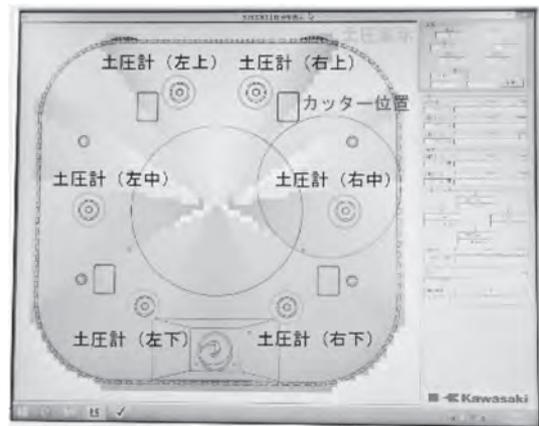


写真-3 土圧分布監視モニターにおけるコンター図

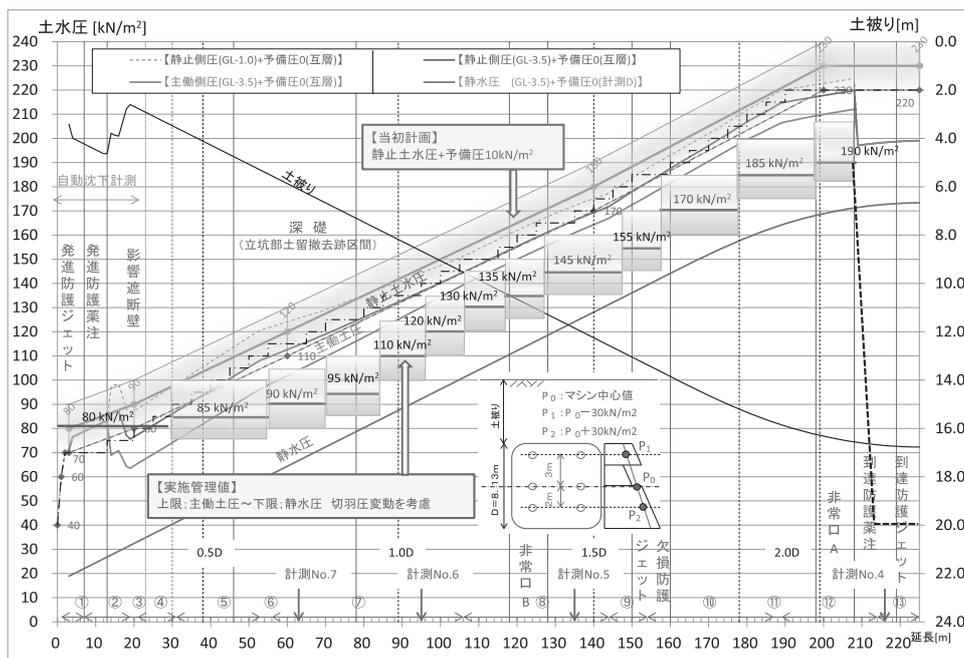
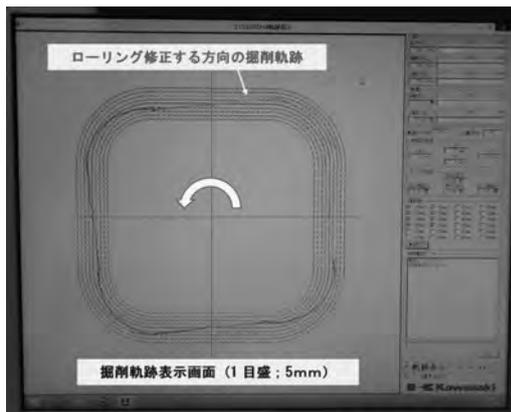


図-7 掘進深度に応じた切羽土圧管理値の設定

表一三 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 (10 kN/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 250 mm → 慎重な線形管理が必要 セグメント幅を 1.0 m とし, 蛇行修正セグメントを計画的に準備



写真一四 ローリング修正掘削システム (操作画面)

(3) 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) ±3 mm で掘進する。マシンがローリングする場合は, 写真一四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。

(4) 坑内搬送設備の工夫・改善

掘進時のセグメント (1ピースあたり重量 4.5 t) をはじめとする坑内の資材搬送は, 逸走防止, 接触防止

といった安全確保が重要である。専用の特殊搬送台車について, 事前の制動確認の実験を行い導入することとした。掘進中の坑内運搬状況を写真一五に示す。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つよう作業性に考慮した。

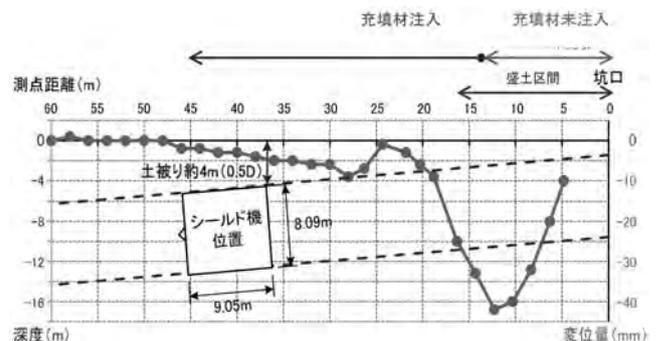


写真一五 セグメント坑内運搬状況

5. 掘進実績と評価

(1) 小土被り発進の評価

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) を図一九に示す。裏込め材と沈下抑止特殊充填材は, シールド機全長 (9.05 m) が発進立坑エントランス内 (地盤内) に入って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 40 mm 発生した。しかし, 充填開始後は沈下量は 10 mm 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



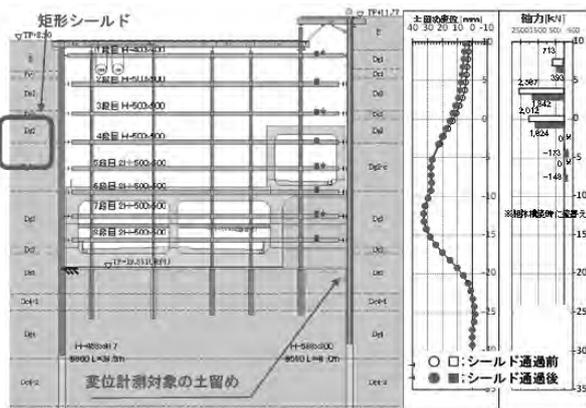
図一九 発進時の地表面沈下測量結果 (土被り 0.5D 掘進時)

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、1 mm 以下に抑えられた。

(2) 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（10 kN/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 225 m 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了した。

計測断面 4 ヶ所のうち、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一 10 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。



図一 10 掘進前後の土留め計測結果（測点 No.6）

(3) 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、重心位置を移動させ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 9 m の修正掘進を継続し基準の 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. おわりに

近年、狭隘な都市部において、小土盛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、施工に活用できれば幸いである。

謝 辞

工事に際し、矩形シールド工法への変更に伴う計画から設計、施工まで、ご尽力いただいた関係各位に謝意を表す。

J C M A

【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.

【筆者紹介】

真鍋 智 (まなべ さとし)
鹿島建設株式会社
機械部 企画グループ
次長



加藤 淳司 (かとう あつし)
鹿島建設株式会社
関西支店 常磐工区 JV 工事事務所
機電課長



浅川 剛 (あさかわ たけし)
カジマメカトロエンジニアリング株式会社
関西技術部 機工グループ
課長

