

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

鹿島建設(株)	正会員	○真鍋	智
	正会員	羽富	公彦
	正会員	馬目	広幸
阪神高速道路(株)	正会員	松川	直史

1. はじめに

大阪中心部の慢性的な渋滞解消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。

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。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併走掘進の各種対策と実績、評価を報告する。

2. 工事概要

府道高速大和川線は、大阪府、堺市、阪神高速道路(株)の三者が共同で事業を行う路線で、その大部分は地下構造となっている(図-1)。このうち、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、両立坑間にはランプ合流部(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。

(1) 矩形シールドへの変更

当初、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が、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配置する工事占用帯では、生活道路が長期間車両通行止めにする必要がある等、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。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、ランプ単独部はシールド工法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した(図-2)。

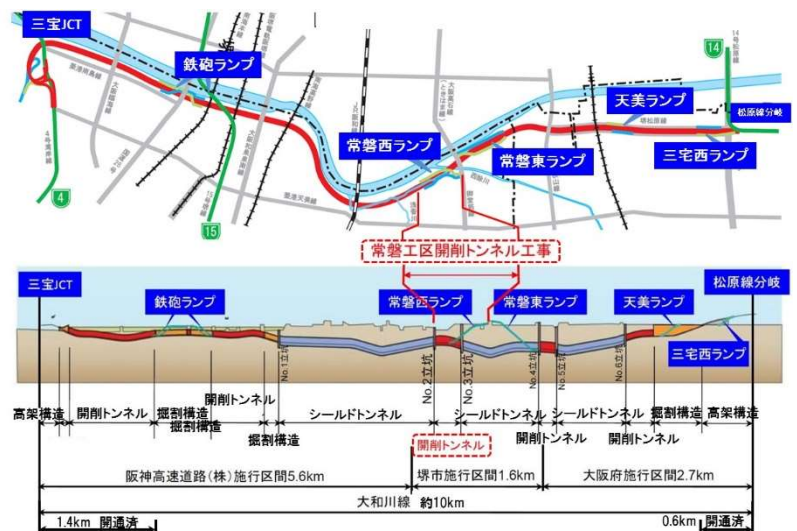


図-1 トンネル構造と事業区分
(ランプ名は仮称)

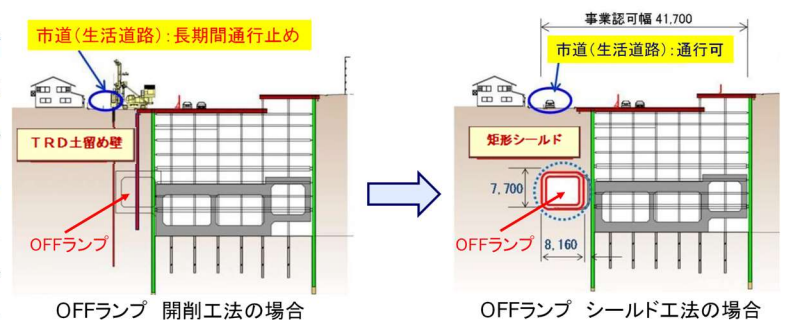


図-2 矩形シールド工法への変更

キーワード ランプトンネル、矩形シールド、アポロカッター、小土被り施工、近接施工

連絡先 〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11 鹿島建設(株)機械部 企画グループ TEL 03-5544-2404

(2) シールド施工条件

トンネル線形は、延長 225m、発進立坑から 8%の下り勾配で、土被りは発進部約 1.5m、到達部約 17m である(図-3)。

セグメントと土留め壁との離隔は 500mm を標準に計画した。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-4)。

(3) 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^{1),2)}のあるアポロカッター工法を採用した(表-1, 図-5, 写真-1)。本工法は、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ている。

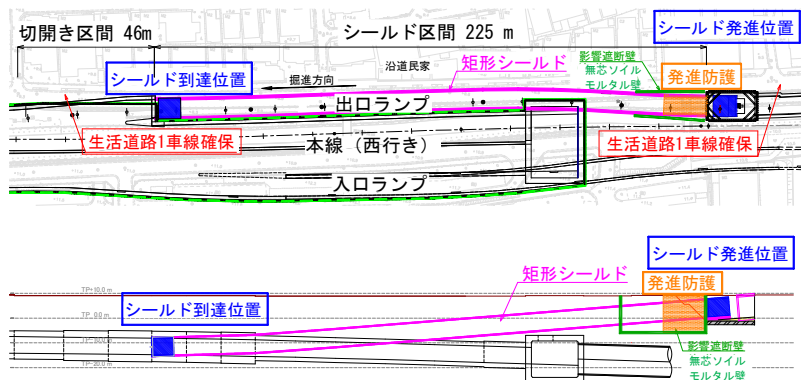


図-3 シールドトンネルの線形概略図

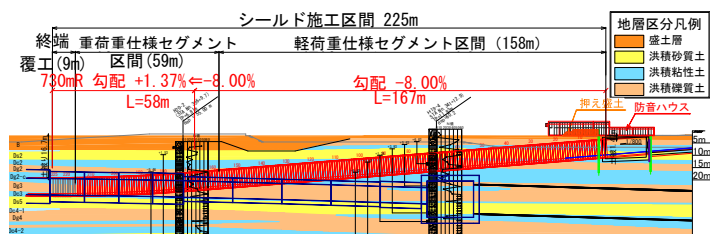


図-4 シールド掘進区間の土層縦断面図

表-1 シールド機諸元表

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
コピカストローク	Max 70mm

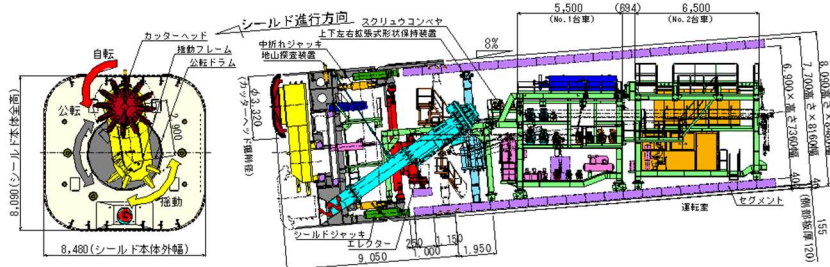


図-5 シールド機概要図

3. 施工上の課題

(1) 矩形断面の構造成立性

トンネル構造設計では、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

発進時はシールド機後端が地表面に近く、前述のとおりシールド機先端部の土被りは 1.5m である。事前の FEM 解析では発進直後の土被り 4m 地点(0.5D 相当)でシールド直上 21mm、官民境界 0.9mm 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

土留め壁併走区間では、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(図-6)ため、慎重な線形管理と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。



写真-1 シールド機全景

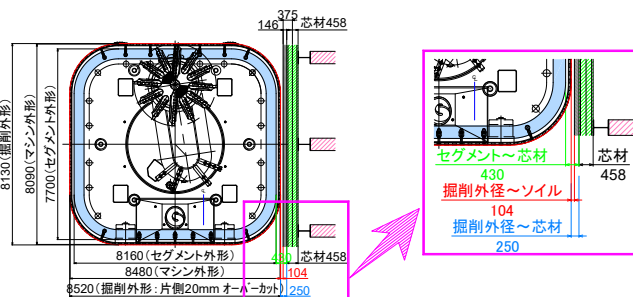


図-6 シールドと土留め壁の離隔

(4) 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では離隔を保ちながらの掘進となり、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ため、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、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。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. 各種対策と計画

(1) 六面鋼殻合成セグメントの採用

1) セグメント桁高に関する制約条件

シールド機は本線開削土留め壁と約 150m に渡って併走するが、トンネルを事業認可幅や必要内空確保等の制約に収める必要があるため、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（図-7）。

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たが、土留め壁併走区間の深度の大きい到達付近では、全土被り荷重を考慮した（図-8）。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）は自立性も高いため、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設計した。

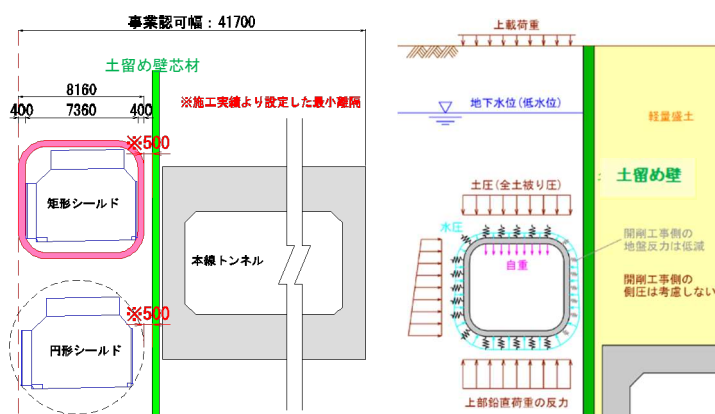


図-7 土留め壁併走区間断面図 図-8 設計荷重モデル図

2) セグメント種別の選定

RC セグメントは桁高 400mm 以下に収まらず、また、鋼製セグメントは経済性に劣るため除外した。一方、合成セグメントのうち、五面鋼殻合成セグメントは、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を誘発する恐れがあるため、六面鋼殻合成セグメントを採用した（表-2）。

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)

3) トンネル断面形状の設計

本工事では、次頁の表-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、地表面離隔（土被り）の観点から、トンネル上下左右面が平坦形状の矩形案に決定した。ライズ案は、浮上りに不安定で事業認可幅に収まらないため除外した。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。

4) セグメントの分割（ピース割）

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-9）。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、経済性を考慮し、1.0m 幅とした。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、ピースごとの製作種別を半数程度に減らすことができた。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、角度を有する場合には軸力作用時の分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。

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)			
	断面積: 60.1 m ² (100%)	断面積: 61.1 m ² (102%)	断面積: 66.0 m ² (110%)
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			
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)	△	△

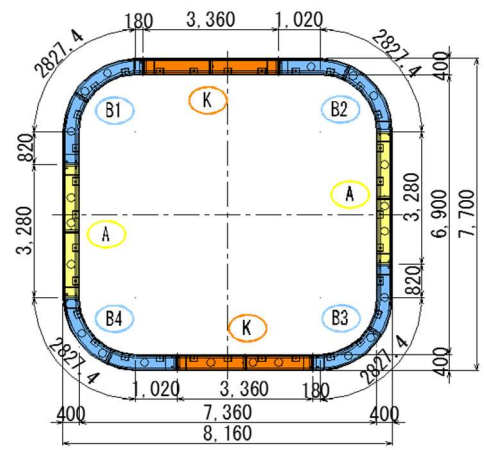


図-9 セグメント分割図

(2) 小土被り発進の各種対策

発進に際しては、近隣民家にも近接しており、最小土被り 1.5m（押え盛土造成前）と小土被り、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策を施した。表-4 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、水平挿入式傾斜計による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止特殊充填材（ボイドキーパー）^{3), 4)} を注入し、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。

(3) 土留め壁近接掘進の切羽土圧管理値

掘進時の切羽土圧管理は、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位も勘案し段階的に設定した（図-10）。掘進管理に際しては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-11 に開削部の計測配置図を示す。掘進時は、実測の地下水位から土水圧を再計算し、矩形シールド通過時の土留め変位と切梁軸力、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、左右対称に合計 6 点の土圧計を配置し、カッター一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）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。以上の対策を表-5 に整理する。

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（ 50kg/m^3 添加） ・目的・・・①切羽圧への上載圧 30kN/m^2 付加 ②加泥材、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 1 D 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	・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振りに充填 （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

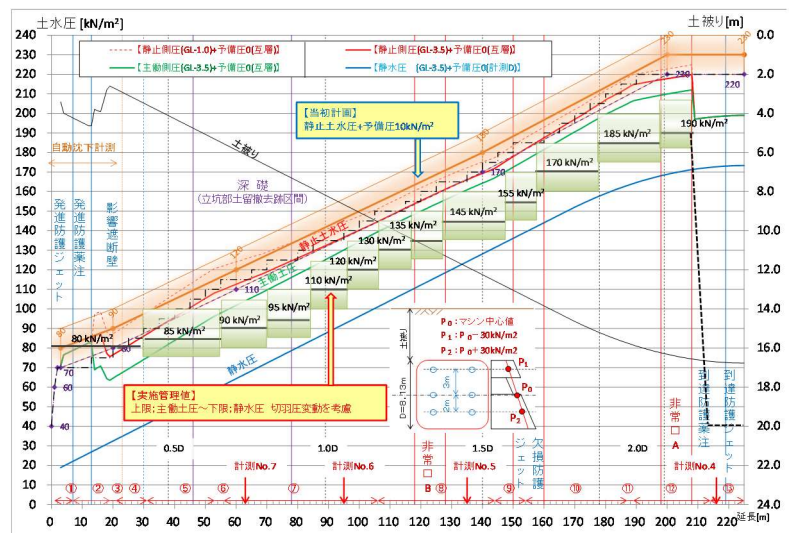


図-10 掘進深度に応じた切羽土圧管理値の設定

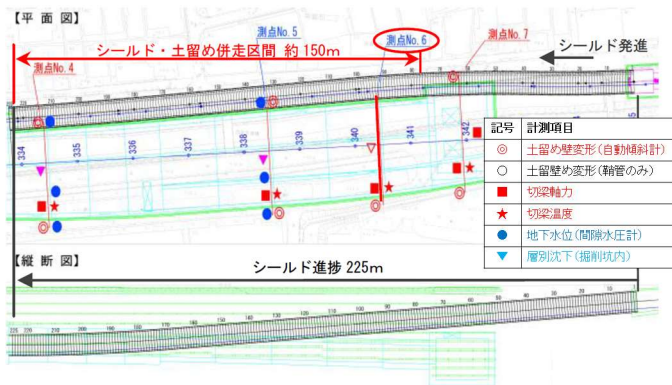


図-11 土留め計測断面配置図

表-5 土留壁併走掘進の対策

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/m ²) 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 マシ姿勢制御, 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	・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 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) 姿勢制御システムの導入

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) $\pm 3\text{mm}$ で掘進するが, シールド機がローリングする場合は, 目標軌跡を回転させたような軌跡として余掘り修正掘削した (写真-4)。



写真-2 シールド発進状況



写真-3 土圧分布監視モニター

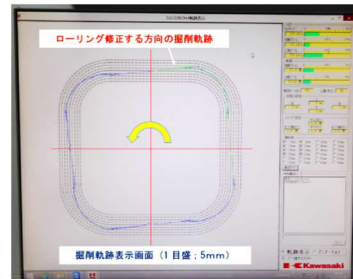


写真-4 ローリング修正掘削

5. 掘進実績と評価

(1) 六面鋼殻合成セグメントの組立精度

本工事で採用した六面鋼殻合成セグメントは, 継手剛性が他種のセグメントに比べて大きく, 桁高を小さくするのに有効なセグメントである。組立精度は, 内空変位の最大量が管理値 $\pm 50\text{mm}$ に対し, 土被りの小さい軽荷重仕様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仕様セグメントの範囲では, 水平変位 $+8\text{mm}$, 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, シールド機に装備された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に収まった。また, セグメントピース間の目開き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・上下方向の最大変位量・到達精度ともに $\pm 30\text{mm}$ であり, 管理値 $\pm 50\text{mm}$ 以内を満足した (表-6)。

(2) 小土被り発進の評価

図-12 に地表面沈下計測結果を示す。施工ヤード内でシールド機全長が地山内に入るまでは, 沈下抑止特殊充填材を注入することができなかったため, 余掘り量に相当する沈下が発生した。しかし, 沈下抑止特殊充填材の注入開始以降, 沈下量は $5\sim 10\text{mm}$ 以下に抑制できた。

表-6 セグメントの組立・線形精度

		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

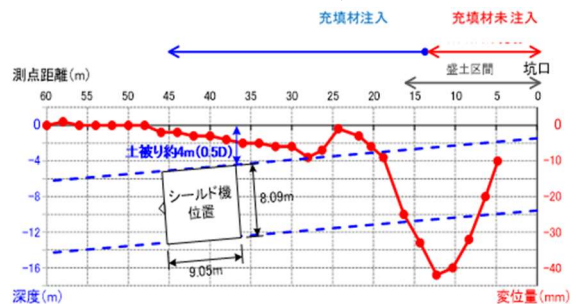


図-12 発進時の地表面沈下測量結果

また、押え盛土の効果により添加材の地表面への噴出もなく安定した設定土圧を確保でき、影響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。

(3) 土留め壁近接併走掘進の評価

切羽土圧は、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極力低く設定し、掘進延長 225m を本線開削土留め壁からの漏水や出水なく終えた。計測断面 4 ヲ所のうち、掘進前後の影響が最も現れた箇所では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-13）。

(4) 姿勢制御の実績

シールド機の姿勢は、下り 8% から到達付近で +1.37% となる線形であったが、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制御できた。ローリングは、テールクリアランス確保とトンネル構造物の建築限界確保から許容値を 0.5° に設定し、角度やテールクリアランスを監視し発生に応じて、カッター公転方向、中折れ装置によるマシン方位角変更、余掘り掘削による修正を順次実施した。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り基準の 0° までローリング修正し、アポロカッター工法の掘削機構が姿勢制御にも有効であることが確認できた。

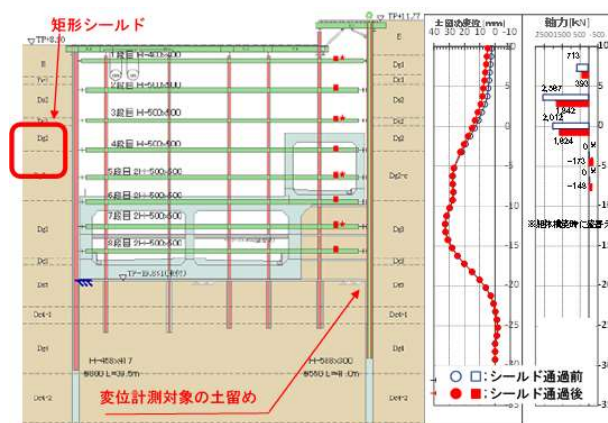


図-13 掘進前後の土留め計測結果

6. 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。平成 28 年 10 月に発進した今回の矩形シールドは、周辺地盤への影響もなく、また、近隣住民からの騒音・振動苦情もほとんどなく、平成 29 年 6 月に無事到達することができた（写真-5）。今後、本工事で得られた知見が工事の計画、施工に活用されれば幸いである。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者に謝意を表する。



写真-5 シールド到達状況

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, VI-027, 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, VI-007, 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 pp. 19-28, 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, 第 27 巻, II-12, 2017. 11