

開削トンネルランプ部における非開削工法の採用

阪神高速道路(株)建設・更新事業本部

堺建設部大和川線建設事務所 大嶋 昇

阪神高速道路(株)建設・更新事業本部

堺建設部大和川線建設事務所 河野 康史

阪神高速技研(株)事業部監理課 松川 直史

要 旨

本工事は、大阪府堺市の住宅密集地において建設中の大阪府道高速大和川線のうち、高速道路本線のトンネル約 350m と常磐西出入口それぞれ約 500m を開削工法で構築する工事である。そのうち、出路躯体構築は近隣住民の環境負担軽減策として開削工法から非開削工法へ変更した。非開削工法のうち、本線からの分岐部では地中切り開き工法を、出路単設部では矩形断面の泥土圧式シールド工法として矩形シールド（アポロカッター）工法をそれぞれ採用している。施工にあたっては、地表面への影響、既設トンネル函体への影響などの技術的な課題に対して様々な対策を講じ無事工事を完了した。

キーワード:非開削工法、地中切り開き・拡幅、メッセル工法、BH 工法、矩形シールド工法

はじめに

大阪府道高速大和川線は、大阪府、堺市、阪神高速道路(株)（以下：当社）の三者が共同して事業を行う延長約 10km の路線であり、その大部分は地下構造となっている。大阪府道高速大和川線のうち、当社が堺市から委託を受けて施工中の常磐工区開削トンネル工事は、高速道路本線のトンネル約 350m と常磐西出入口それぞれ約 500m を構築する工事である。

当工区は、工区両端に本線施工のシールドマシンが転回する立坑、また、両立坑間にランプ分合流部（常磐西出入口（仮称））を有するため、開削トンネル構造を採用している。

本線からの分岐部及び出路単設部を開削トンネル構造で構築する場合、沿道民家の生活道路（常

磐黒土線、以下：市道）を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。その結果、本線からの分岐部は地中切り開き工法で路下施工による躯体拡幅を行い、出路単設部についてはシールド工法による非開削工法をそれぞれ採用した（図-1）。

1. 地中切り開き工事概要¹⁾

1-1 地中切り開き工法の選定

地中切り開き区間の断面を図-2 に示す。開削工法で本線からのランプ分岐部を施工する場合、図中の 2 次土留めの位置に土留壁を構築する必要があるが、その施工には、市道を車両通行止めにする必要があり、近隣住民の車両出入りに制約が発生する。そのため、本工事では、施工中は市道

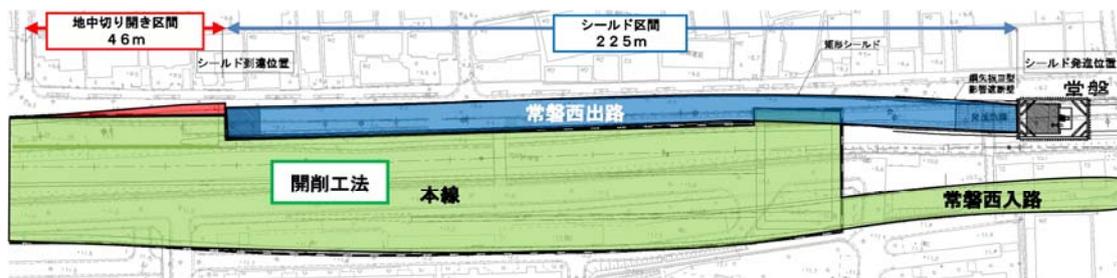


図-1 地中切り開き及びシールド区間（常磐西出路非開削工法区間）平面図

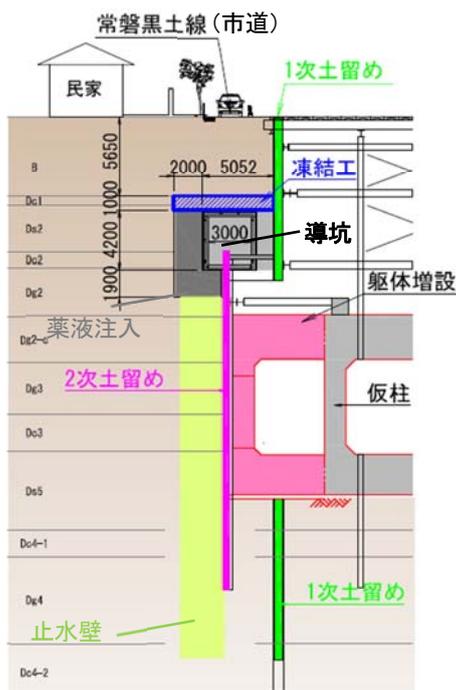


図-2 地中切り開き区間断面図

を最低限1車確保したうえで、1次土留めを施工した後、地中の本線部掘削範囲から土留壁の一部及びその背面地山を切り開いて、外側に掘削範囲を拡幅し、躯体構築を施工する手順で、構成成立性、構造安定性、過去の実績等について、表-1で構造形式の比較検討を行った。

検討の結果、A案は凍結規模が大きく周辺への影響が懸念されること、C案は長尺パイプルーフの実績はあるが地盤改良範囲が広くなり用地制約上問題があること、D案は大規模かつ用地制約内で行う場合の安定性の検証に時間を要すること等から、すでに構造形式として当社でも実績もあり、コストと工期にも優れているB案の「メッセル導坑+ BH 杭土留め工法」を選定した。

1-2 施工手順

施工手順は、図-3に示すように導坑掘削に先立ち導坑防護工（薬液注入工、高圧噴射攪拌工、凍結工）を行い、本線部躯体構築で設置した1次土留めの一部を切り開いてメッセル工法により市道直下を導坑掘削する。導坑内から薬液注入工により止水壁を施工し、BH工法によって2次土留めを打設する。その後、地中拡幅区間の1次土留めを大断面に切り開き、分岐部の掘削・躯体増設を行い、本線躯体の仮柱を撤去し本線躯体と接続するものである。

次項に導坑施工に先立つ導坑防護工、掘進、その後の2次土留めの造成、拡幅掘削・躯体増設における技術課題と対応策について述べる。

1-3 導坑防護工

導坑の上部範囲は、洪水災害後に復旧された埋土層で、粗い礫質土が多く混入していた。また、近傍の地下水位を継続計測したところ、季節変動が見られ、導坑防護工対象範囲付近を推移していた。このような地盤条件の中、導坑掘進時は、切羽すべり破壊抑止や天井部の抜け落ち防止のため、粘着力 $C=80\text{kN}/\text{m}^2$ 以上の強度と止水性が必要であった（図-4）。

このため、現地地盤による試験施工を行ったが、薬液注入では強度発現が不十分で、必要な粘着力が確保できないことから、導坑防護工上部範囲は検討の結果、凍結工法とした。なお、上部防護範囲以外は止水機能が確保されれば十分であることから薬液注入工法を採用している。なお、用地の制約上、地盤改良工事は、ヤード内からの斜打ちや水平打ちを併用し実施した。結果、地表面の沈下等の影響もなく施工できた。

表-1 地中切り開き部構造形式の選定

CASE	A案：コの字凍結工法	B案：メッセル導坑+BH杭土留め	C案：直線パイプルーフ	D案：細径曲線パイプルーフ+凍結
平面図				
標準断面				
工法概要	1次土留めの背面地盤をコの字に凍結し、凍結地盤にて土留めし、1次土留め背面地盤を切り開く	1次土留めの背面に地盤改良を行って導坑掘削し、その中でBH杭により2次土留めを打設して切り開く	1次土留めの背面に、推進工で設置した直線パイプルーフにて土留めし、薬注で止水したうえで切り開く	1次土留めの背面に、推進工で設置した曲線パイプルーフにて土留めし、凍結で止水したうえで切り開く
構造安定	・今回のように大規模断面での施工実績がない。 ・凍結膨張圧による躯体への影響の懸念がある。	△ ・一般的な土留め壁であり構造的安定性は高く、導坑からの杭施工実績がある。（阪神高速神戸山手線）	○ ・切り開き範囲が最も長く、用地制約内での施工が困難	△ ・大規模断面での施工には試験施工等による検証が必要である。 ・掘削土砂が最も多いうえ、掘削床付けを下げる必要がある。
コスト	高価	△ 他案より経済的	○ 高価	△ 高価
工期	+6ヶ月以上	△ ±0（基準）	○ +1年以上	× +6ヶ月以上
判定	凍結規模が大きく、周辺影響が懸念される	△ 施工実績もあり、構造安定性が高い	○ 地盤改良範囲が広く、用地制約の問題あり	× 大規模での安定性の検証に時間を要する

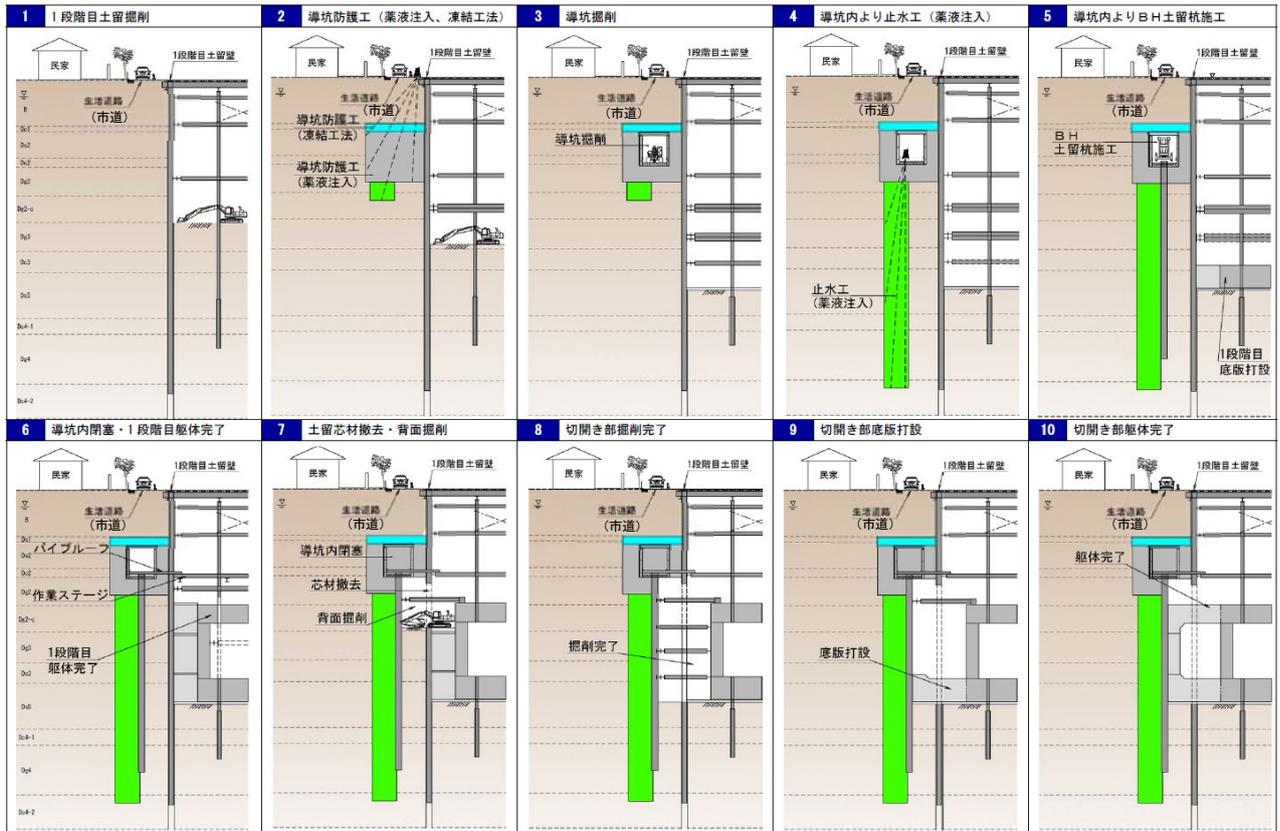


図-3 地中切り開き工法施工手順（導坑一般部）

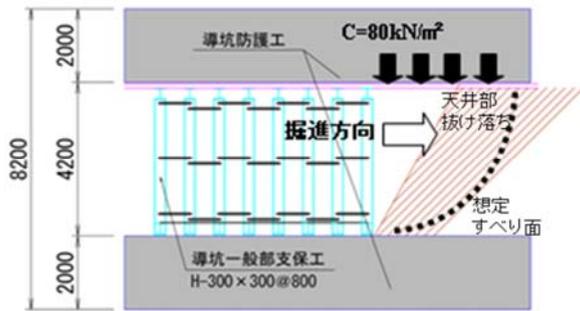


図-4 導坑掘進部縦断面図



写真-1 凍結管の設置状況

1-4 導坑掘進（メッセル工法）

導坑はメッセル工法により図-5 に示すように進入部から一般部へ途中直角に方向を変えて掘進する。最初に 1 次土留めを切り開いて進入部を構築し、その後直角に右折し、1 次土留めと平行に BH 杭施工用の一般部を構築する。前述のとおり、導坑の天井部は凍結工法で高強度の凍土を造成する（写真-1）。進入部は掘進時の開放断面が大きいので、全断面にわたって高圧噴射攪拌工（JETCRETE）が造成されており、その改良体内を掘進した。一般部は薬液注入工による改良体内を掘進した。

本工事での導坑の構造的な特徴は 2 つある。1 つ目は、進入部を掘進した後、その導坑内から直角に方向を変えて再発進したこと、2 つ目は、再発進後の一部区間で、1 次土留めのラインに合わせて導坑の断面形状が変化していることである。施工上の工夫としては、狭隘な箇所での支保工の建込みを容易とするため、鋼材を把持できるアタッチメントを取り付けたハンドリングマシンを使用し、メッセル導坑工事は 6 ヶ月の工事期間を要した（写真-2）。



写真-2 導坑支保工の建込み状況

1-5 2次土留めの造成（BH 杭）

導坑内での杭打ちは地下水位以下での施工となるため、孔壁防護を兼用した止水壁の造成を先行した。また、杭打ちは導坑内の狭隘な空間（高さ 3.4m、幅 3.0m）でも、施工可能なBH工法（大口徑ボーリング工法）を採用し、削孔径 750mm、削孔長 24.5m の孔内に小割したH鋼杭（H428×407×20×35mm）を建込み、800mm 間隔の柱列式土留め壁を造成した（写真-3）。削孔径と杭間隔の関係等から一定の施工精度が求められていたが、削孔中ならびにH鋼杭建込み中に鉛直度を都度確

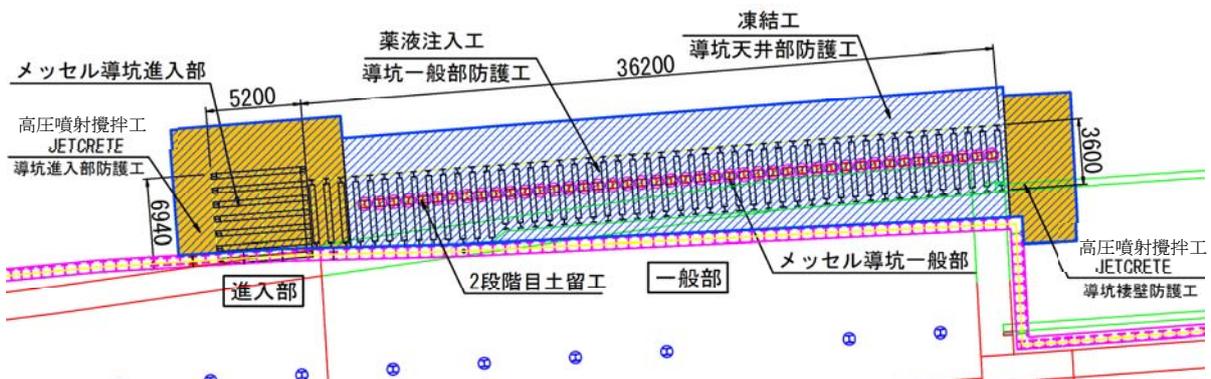


図-5 導坑防護工及び導坑平面図

認した慎重な施工を実施し、許容鉛直精度（1/100）以内に抑えた施工ができ、止水性の高い2次土留め壁を造成することが出来た。



写真-3 BH工法削孔(左)と芯材建て込み(右)

1-6 1次・2次土留め杭の接合

切り開き区間の拡幅掘削箇所の上部には地山が残っており、その地山を支えるために、拡幅掘削前に1次・2次土留め壁を接合するルーフ材を設置した(図-6)。施工空間を十分に確保できる1次土留め壁の掘削側から、背面の導坑へ向けて水平削孔し、その内部にルーフ材となる鋼管(外形φ318.5mm, 肉厚17.4mm, STK400又はSTK490)を設置する方法を採用した。それにより、導坑と1次土留め壁の間の地山を掘削することなくルーフ材設置が可能となり、実施工では、安全かつ効率的に施工することが出来た。なお、水平削孔にあたっては、狭隘な空間での施工となり通常のパイプルーフ工法の削孔機が使用できないためコアボーリング機で削孔を行った。

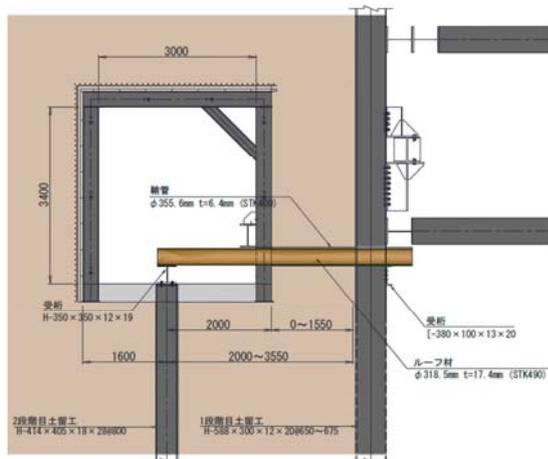


図-6 1・2次土留め杭の接合構造(ルーフ材)

1-7 拡幅掘削・躯体構築

先行構築した本線部躯体と2次土留めとの間を掘削する。その際に1次土留め壁は、掘削に合わせて切断・撤去し、鉛直方向の重量(路面覆工、拡幅上部の地山)を支持するために約700mmピッチの土留壁芯材を4mごとに2本ずつ残置した。この残置土留め杭は、鉛直荷重だけでなく、1段階目の掘削・躯体構築により側圧(土圧・水圧)や施工時の盛替えの影響を受けているため、施工履歴を考慮した設計検討や施工期間中の地表面沈下の計測管理において、十分に影響を把握した上で施工を行い、地表面へほとんど影響なく拡幅掘削中の安定性を保つことが出来た。

拡幅掘削完了後、ランプ拡幅部の躯体構築を進め、躯体構築完了後、当初の本線部躯体で構築した仮柱を撤去し、地中切り開き部の施工を完了した。なお、仮柱撤去に際しては、仮柱切断時に発生する頂版への衝撃を排除することなどを目的として、写真-4に示すように仮受けベント構台を設置し実施した。



写真-4 仮柱撤去状況
(本線函体から切り開き部を望む)

2. 矩形シールド工事概要²⁾

2-1 矩形シールド工法の採用

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-7)。

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. トンネル平面図と縦断面図を図-8 に示す.

シールド掘進時の本線開削部の土留め壁芯材との離隔は最小 250mm で約 150m に渡る近接併走掘進となる. トンネル覆工は, 図-9 に示すように矩形シールドトンネルとしては比較的断面が大きく, 用地条件をはじめとする制約から覆工厚を極力小さくする必要があったことから, 六面鋼殻合成分セグメントを採用した.

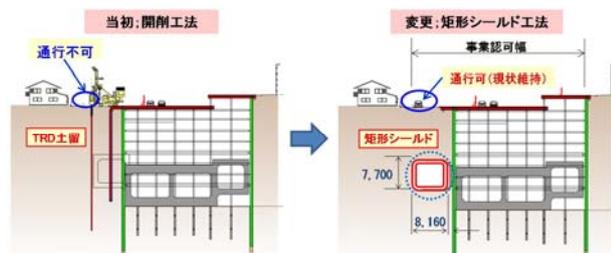


図-7 矩形シールド工法への変更概要

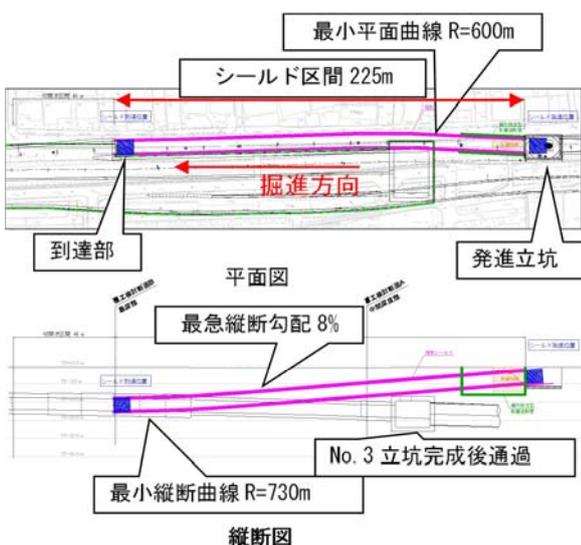


図-8 矩形シールドトンネル平面・縦断面図

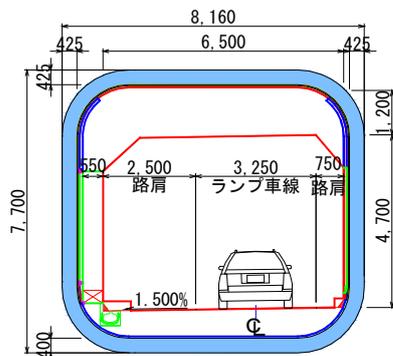


図-9 矩形シールド断面図

2-2 施工上の課題

掘進範囲の土質条件は, 図-10 に示すように地表面付近 2~5m の埋土層に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. そこで, 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含む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 (写真-5). なお, 道路トンネルを単体のシールド機で矩形断面を掘削するのは国内で始めてとなる. 矩形シールド施工では, 以下の課題への対応が必要であった.

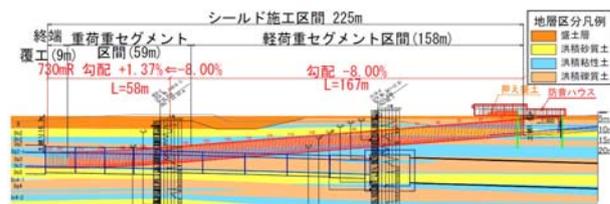


図-10 シールド掘進区間土層縦断面図



写真-5 矩形シールド掘進機

(アポロカッター工法)

(1) 小土被り発進

発進時はシールドマシン後端が地表面に近く, マシン先端部での土被りは 1.5m であった. 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の沈下 21mm が想定され, 確実な沈下抑止対策が要求された.

(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, 慎重な線

形管理と同時に土留め壁の変位や出水といった影響抑止に配慮した切羽土圧と裏込め注入圧の管理が要求された。

2-3 課題解決への取組み

(1) 沈下抑止対策

初期掘進は近隣民家にも接近しており、以下にあげる条件から沈下抑止対策と地盤崩壊防止対策を施した。

- ①小土被りであること
- ②矩形断面で上部が平坦であること

対策として、押え盛土と表層改良、及び影響遮断壁（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（ボイドキーパー）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。

(2) 掘進深度に応じた切羽土圧管理値の設定と姿勢制御

本線開削土留め壁と約 150m に渡り小離隔（シールド掘削外径と芯材間最小 250mm）で掘進するため、マシンの方向制御と姿勢制御が重要であり、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。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位も勘案しながら段階的に設定した。土留め壁への影響把握のために、土留め計測断面（区間中 4 断面）を設定

し、シールド掘進データと照合しながら施工することとした。

2-4 掘進実績

(1) 小土被り発進の評価

図-11 にシールド中心上の地表面沈下測量結果を示す。発進後のシールド機長分が発進立坑のエントランス内に入るまでは沈下抑止特殊充填材（ボイドキーパー）充填と裏込め注入ができなかったため、その区間を含めカッターによる余掘り量に相当する沈下が工事敷地内で最大 40mm 発生した（シールド機通過時直上と後続沈下による）。これに対し、充填開始後は直上沈下量が 5～10mm に抑制できた。なお、官民境界での沈下量は 1mm 以下であった。

(2) 本線開削土留め壁との近接併走掘進の評価

掘進時は地表面沈下抑制と同時に、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、発進時の沈下管理実績から主働土圧（+予備圧）相当まで抑えた設定に変更し全区間の掘進を無事終えた。

計測点のうち立坑から約 120m の No. 6 でのシールド通過前後の土留め計測結果を図-12 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。

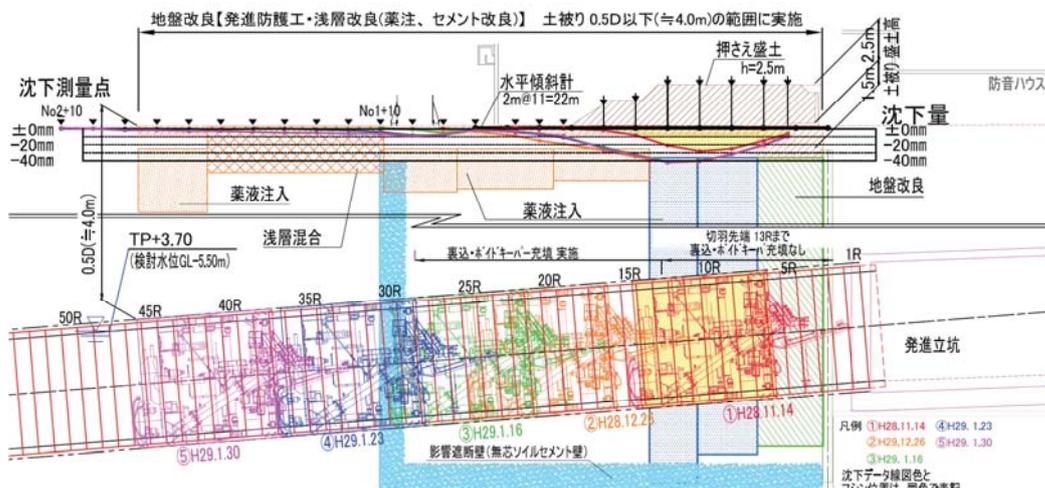


図-11 発進時の地表面沈下計測結果（初期掘進区間：シールド中心上）

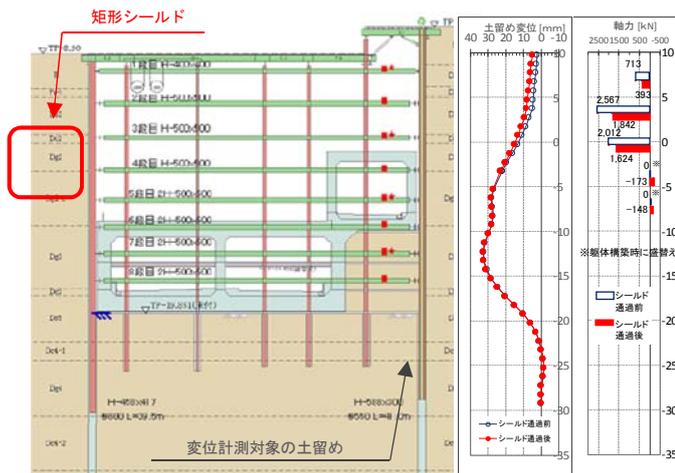


図-12 掘進前後の土留め計測結

(3) 施工状況

写真-6 に本線掘進時の坑内状況を示す。上記課題の対策等を実施することで周辺への影響をほとんど与えることなく施工を完了することができた。

おわりに

制約された狭隘な施工空間で地中切り開き工法、矩形シールド工法を採用し施工を無事完了した。



写真-6 矩形シールド施工状況

地中切り開き工法によるランプ拡幅部での躯体増設及び矩形シールド工法による小土被り発進と土留め壁との近接掘進は、狭隘な都市環境下で求められる非開削工法で貴重な施工実績と期待され、同種工事への参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 渡辺ら：常磐西出路の地中切り開き工法の施工報告，阪神高速道路第48回技術研究発表会論文集，2016。
- 2) 真鍋ら：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，土木学会第27回トンネル工学研究発表会，2017。

CHANGING THE CONSTRUCTION METHOD FOR AN EXPRESSWAY EXIT RAMP FROM CUT AND COVER TO UNDERGROUND EXCAVATION AND RECTANGULAR SHIELD TUNNELING

Noboru OSHIMA, Yasushi KONO and Naofumi MATSUKAWA

In the Hanshin Expressway Yamatogawa Route Tokiwa Section Cut and Cover Tunnel project, a couple of ramps and junctions connecting to an underground expressway are under construction. The construction method was changed for the exit ramp from the cut and cover method to the underground excavation and rectangular shield tunneling in order to eliminate the nuisance to neighbors. This paper summarizes the construction of the tunnels.

大嶋 昇



阪神高速道路株式会社
建設・更新事業本部
堺建設部大和川線建設事務所
Noboru Oshima

河野 康史



阪神高速道路株式会社
建設・更新事業本部
堺建設部大和川線建設事務所
Yasushi Kono

松川 直史



阪神高速技研株式会社
事業部 監理課
Naofumi Matsukawa