

複合アーチ断面・開放型シールド機を採用した小土被り・超近接併設シールドトンネルの施工

田村 央¹・佐久間 博之²・大井 和憲³・蛭子 延彦⁴・前田 知就⁵

¹非会員 国土交通省 関東地方整備局 相武国道事務所 (〒192-0045 東京都八王子市大和田町4-3-13)

²非会員 国土交通省 関東地方整備局 相武国道事務所 (〒192-0045 東京都八王子市大和田町4-3-13)

³正会員 株式会社大林組 東京本店 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2品川インターシティB棟)

⁴正会員 株式会社大林組 東京本店 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2品川インターシティB棟)

⁵正会員 株式会社大林組 東京本社 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2品川インターシティB棟)

E-mail: maeda.tomonari@obayashi.co.jp

本工事は、神奈川県相模原市緑区城山1丁目～3丁目の閑静な住宅地の地下に、さがみ縦貫道路（圏央道）の一部となる全長417m、片側2車線の上下線道路トンネルを築造する工事である（図-1）。当初設計は、開削工法での計画であったが、現場施工日数の短縮・工事中の周辺環境負荷低減や交差道路への影響低減のため、上下線2本を併設した小土被りでのシールド工法（URUP工法）という技術提案を採用した。本稿では、従来であれば開削工法が適用されていた小土被りのトンネルに、シールド工法の適用を可能とした複合アーチ断面・開放型シールド機を採用した超近接併設シールドの施工事例について報告する。

Key Words : parallel TBM tunnel, composite arch section, open shield, shallow earth cover

1. 工事概要

(1) 施工概要

本工事は、トンネル全長417 mのうち現場打ち躯体及び坑門を除いた413.1mをシールド工法により、1台のシールド機を使用して上り線を施工し、回転基地でUターンした後に下り線を施工する（表-1、図-2）。

表-1 工事概要

工事名	さがみ縦貫川尻トンネル工事
発注者	国土交通省関東地方整備局
工期	平成21年3月6日（着工）平成23年5月10日～平成24年9月11日
工事内容	トンネル延長 L=417m（複線） シールドトンネル：L=413.1m（往復） 現場打ち躯体：L=3.4m（回転基地側） 坑門工：L=0.5m×2箇所 【シールド】複合アーチ断面（内空幅11.0m×内空高7.08m） 鋼繊維補強高流動コンクリートセグメント 【現場打ち躯体】2連ボックスカルバート （内空幅10.7m×内空高5.7m×延長3.4m）



図-1 工事位置図

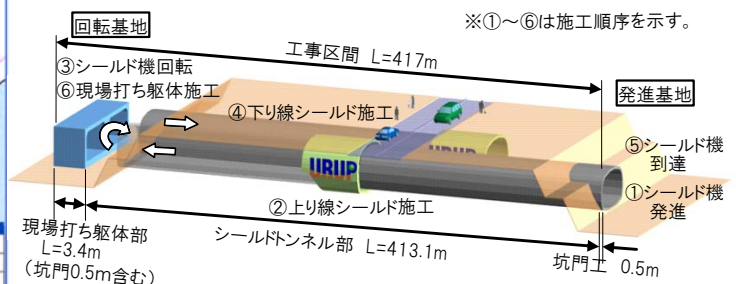


図-2 施工概要図

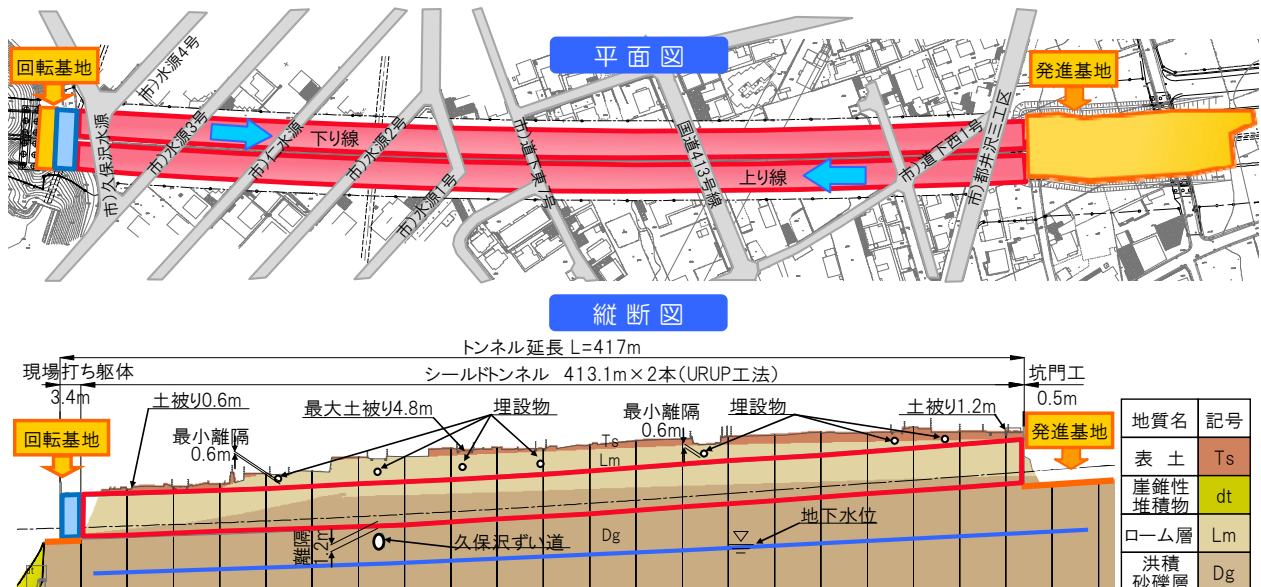


図-3 平面図・縦断面図

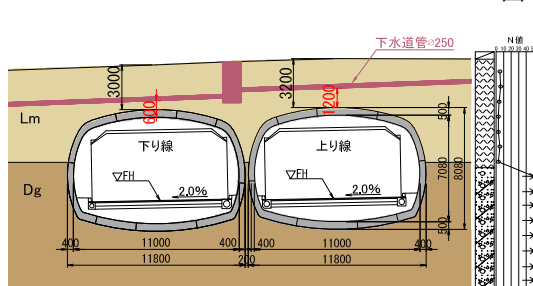


図-4 横断面図 (国道 413 号)

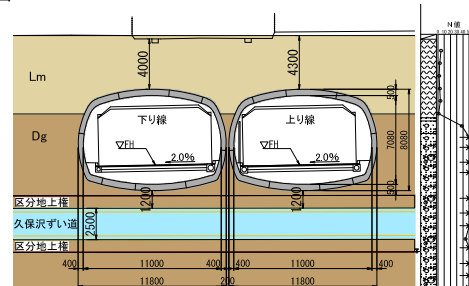


図-5 横断面図 (久保沢すい道)

(2) 土質条件

シールド掘削対象地盤の地層構成は、トンネル上半部が自立性の高い安定した関東ローム層(Lm)であり、下半部は支持力の大きい硬質砂礫層(Dg)である(図-3)。トンネル下半部の硬質砂礫層には礫径600mm程度の巨礫が点在する。また、地下水位はトンネル位置よりも低く安定している。

2. シールド工法適用に関する技術的課題

本工事にシールド工法を適用するにあたり、技術的課題を以下に示す。

- ① トンネル断面形状を円形断面とした場合、近接した地下埋設物と支障し、最小土被り部ではトンネル上部が地表面より突出することとなるため、上下の空間が小さい非円形断面を採用する必要がある。
- ② シールド掘削対象地盤の硬質砂礫層にはφ600mm程度の巨礫があることが想定されており、巨礫地盤の掘削に対応すること。
- ③ 国道含む10箇所の交差道路直下を小土被り(0.6m～4.8m)にて掘進すること。

- ④ シールド発進および到達部では、隣接工区と接続する関係から、背面地盤や前方地盤からの反力が確保できない状態での地上発進、地上到達が必要。
- ⑤ 相模川河岸急斜面上という非常に狭隘なヤードで、シールド機の回転と、Uターン施工を行うこと。
- ⑥ 上下線トンネルの離隔が、全延長にわたり200mmという超近接併設シールド施工であり、後行トンネル掘進によって、先行トンネルに影響を及ぼさないこと。

上記に示すとおり、本工事は、前例のない条件のシールド工事である。代表的な横断面図を図4.5に示す。

3. 課題に対する対応技術

(1) 複合アーチ断面の採用

非円形断面を採用した場合、建築限界に対しては矩形断面が内空断面ロスを最小にできるが、セグメント横断方向の曲げモーメントが卓越するため桁高を大きくする必要がある。そこで、より経済的な断面形状を検討した結果、外荷重に対してアーチ効果により曲げモーメントを抑制しセグメント桁高を小さくすることが可能となり、地下埋設物との離隔を確保できる「複合アーチ断面」を採用することとした(図-6)。

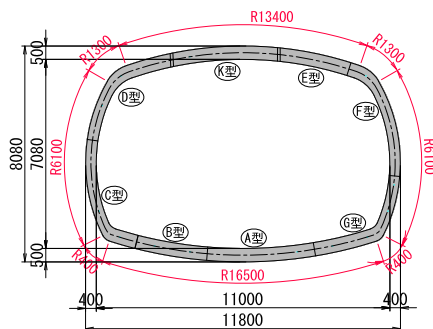


図-6 複合アーチ断面のセグメント

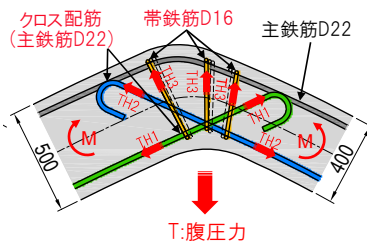


図-7 隅部配筋(クロス配筋+帯鉄筋)

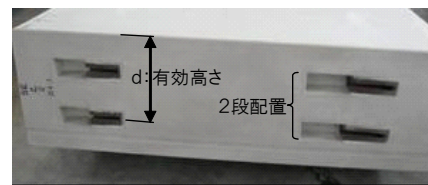


写真-1 水平コッター継手の2段配置

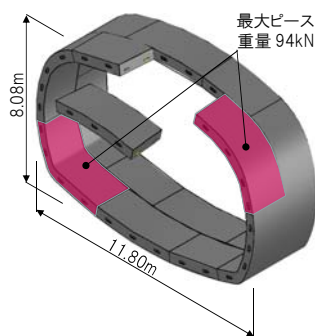


図-8 複合アーチ断面のセグメント

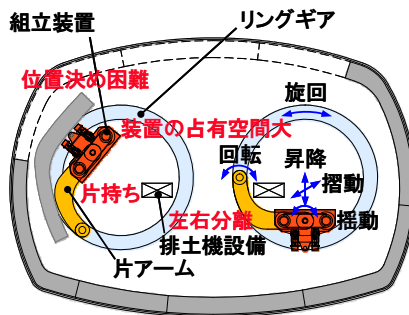


図-9 既存の矩形セグメント組立装置の例

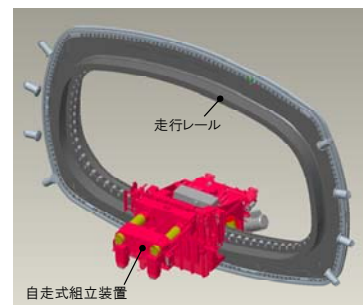


図-10 組立装置概要図

a) セグメント構造の工夫

設計段階における地震時の動的応答解析の結果から、複合アーチ断面の隅部に大きな腹圧力が作用する可能性があることと、高い曲げ剛性を有する継手が必要になることがわかった。そのため、セグメント本体には、従来のRCセグメントより曲げに有利なSFRC（鋼繊維補強高流動コンクリート）セグメントを採用した。さらに、セグメント隅部の配筋構造をクロス配筋+帯鉄筋とし（図-7）、実大試験体を用いた正負交番載荷実験によってその性能を確認した（参考文献1）。また、セグメントの大型分割により、継手箇所を減らしたうえに、先付け水平コッター継手では初めての2段×2列の配置とし、継手剛性を高めた（写真-1）。

b) セグメント組立装置の開発

本工事で使用する複合アーチ断面のセグメント（8分割）は1ピース最大重量が94kNであり、各ピースが特殊な形状である（図-8）。また、縦と横の扁平率が小さい（ $8.08\text{m}/11.80\text{m}=0.685$ ）ため、既存の矩形用セグメント組立装置の適用が困難であった（図-9）。

そこで、複雑な非円形断面に対応できる新たな方式の組立装置を開発した。この組立装置は、シールド機内に掘削断面と相似形状の走行レールを設け、そのレール上を走行する組立装置がセグメントを把持しながら組立を行うものである（図-10）。走行駆動部は、T字断面形状の走行レールを上下からの支持ローラと左右からのガイドローラで挟み込み、走行レールに取り付けられたピンラックと噛み合うピニオンを回転駆動させる機構とした（図-11）。

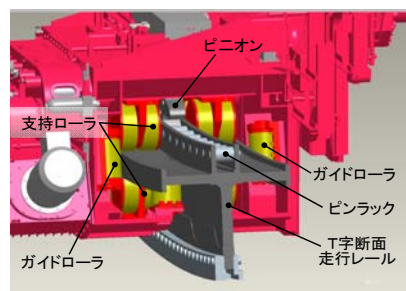


図-11 組立装置駆動部

(2) 開放型シールド機の採用

下半部の硬質砂礫層には $\phi 600\text{mm}$ 程度の巨礫があることが想定されていたことから、密閉型シールドでは巨礫による排土設備での閉塞や、カッタービットの摩耗及び切削性の低下が懸念された。一方、地下水位はトンネル位置よりも低く、安定した地盤条件であったことから巨礫の掘削にも対応が容易である開放型シールドの適用性を検討した。3次元FEM解析や村山理論による切羽安定性評価（参考文献2）により、切羽の安定が確認できたことから開放型シールドを採用した（写真-2）。



写真-2 開放型シールド機

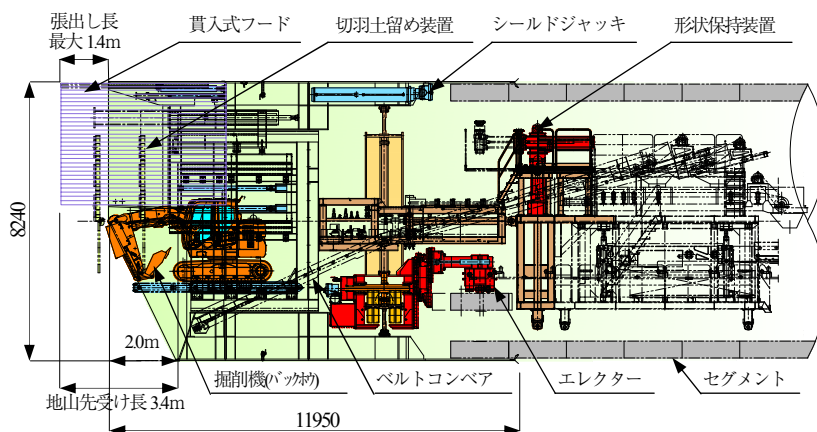


図-12 シールド機側面図

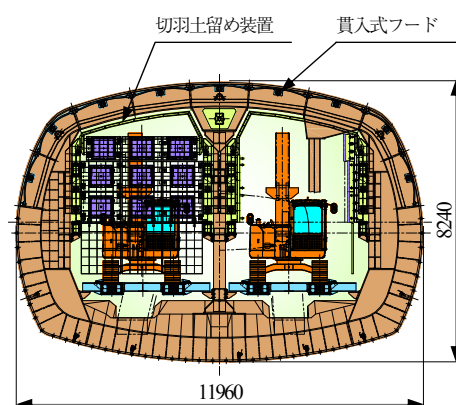


図-13 シールド機正面図

a) 上段先行構造、貫入式フード、切羽土留め装置

シールド機の先端部は、切羽の安定のため、シールド機上部を下部より2 m 先行させた。さらに、地表面への影響を低減させるとともに、掘削時の安全性を向上させるため、シールド機上部に独立して可動できる貫入式フード (9分割, 最大張出し1.4m) を装備した (図-14) 。これらにより、最大3.4mの地山先受けを行いながら掘削が可能とした。また、作業休止時における切羽の変状を防止するための、切羽土留め装置を装備した。

b) 掘削管理システム

シールド機内のバックホウによる掘削精度を管理するために、掘削ガイダンスシステムを開発し装備した。本システムは、掘削面全体の位置と奥行き方向の掘削深さをリアルタイムに運転席のモニターに表示する技術である (図-15) 。

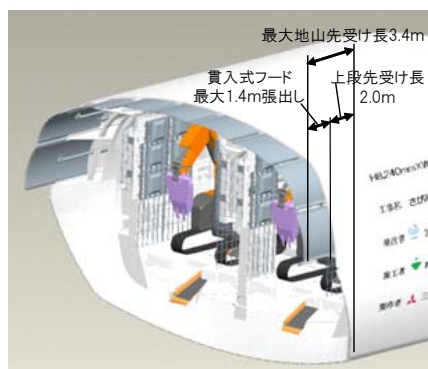


図-14 上段先行構造

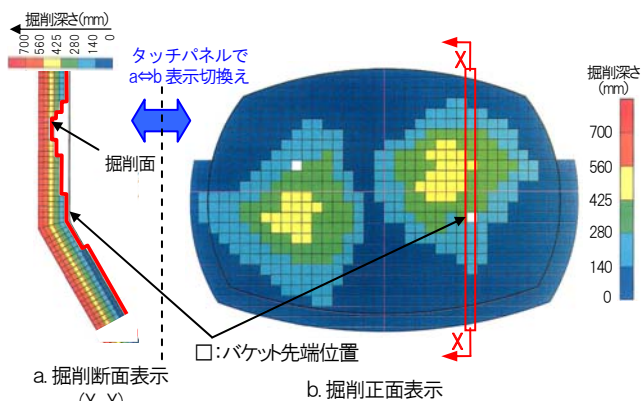


図-15 表示モニター画面

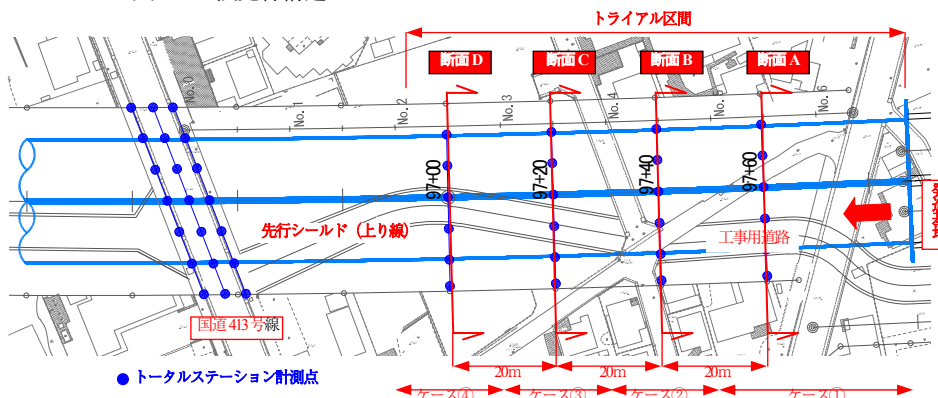


図-16 トライアル計測断面位置

掘削機の各部に装備したセンサーにより、シールド機とバケット先端との相対位置を3次元的に算出し表示することで、オペレータの感覚に頼らず、掘削深さを数値管理することを可能とした。

(3) トライアル施工

周辺地盤および交差道路に影響を与えない掘進方法を早期に確立するため、発進直後にトライアル掘進区間を設置し、計測断面を4箇所設けた (図-16) 。この計測断面においてトータルステーションによる自動計測で地盤変状を測定し、地盤変状を最小限に抑えることができる最適な掘削方法を確立することとした。トライアル掘削パターンは、貫入式フードの貫入長と、1掘進あたりの掘削長をパラメータとし、表-2に示す4ケースとした。

表-2 トライアル掘削パターン

ケース	フード長	掘削長
1	1.0m	425mm
2	0.5m	212mm
3	0.5m	425mm
4	0.25m	212mm

(4) 地上発進反力設備、地上到達防護

発進時のシールド前面は切土された法面であり、シールド機底面の摩擦だけでなく、シールド前面の貫入抵抗や上面及び側面の周面摩擦に抵抗するための推力が必要となる。しかしながら、切羽面の土圧がないため小さい推力で発進できることから、下部のシールドジャッキのみで対応する計画とした。反力設備は、立坑反力壁のような大規模なものではなく、グラウンドアンカーと反力鋼材を組合せた構造で計画した(図-17)

シールド機の到達に必要なスペースは、相模川に面した急斜面の一部を切土した作業床に加えて、別工事にて既に構築された橋台上に仮設構台を設置して確保した(図-18)。到達部の土被りは0.6 mと非常に小さいため、シールド推進に伴う表層地盤の引きずりによる河川急斜面地山側の崩落が懸念された。そこで、敷き鉄板、グラウンドアンカーおよび表層押え鋼材による到達防護を行った(図-18)。

(5) シールドUターン仮設備の工夫

シールド機の回転は油圧ジャッキにより牽引することとし、作業床コンクリートおよび仮設構台上に摩擦低減を目的とした生分解性グリスを塗布した敷き鉄板を敷設し、

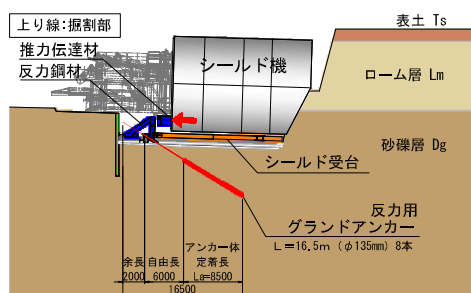


図-17 上り線 発進反力設備

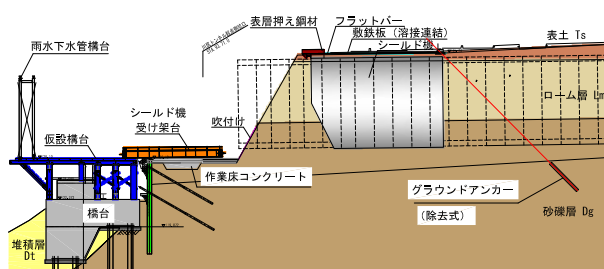


図-18 回転ヤード・到達防護概要図（縦断面図）

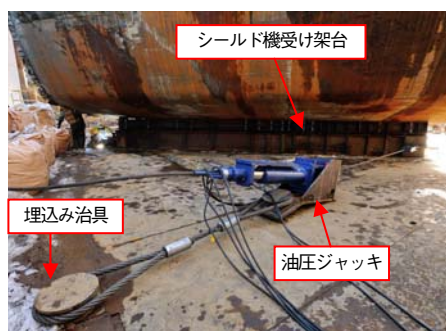


写真-3 回転用ジャッキ

その上にシールド機受け架台を設置した。また、作業床コンクリート部分に回転用ジャッキの反力をとるための治具を埋め込んでおくことで、仮設構台から橋台に影響を与えないようにした(写真-3)。

下り線シールド施工時の残土搬出設備は、発進基地から上り線で使ったベルトコンベアを連続して用いることができるように、回転基地仮設構台上にベルトコンベア捻転装置(図-19)を設置する計画とした。

(6) 併設を考慮したセグメントの設計と計測管理

上り線トンネルと下り線トンネルのセグメント間の離隔は200mmと極めて小さく(写真-4)、後行トンネルの施工にともなって先行トンネルに断面力の変動(増加)が発生する。セグメントの設計では、先行トンネル施工後の断面力に、FEM解析によって算出した後行トンネル通過時の断面力増分を足し合わせて、併設の影響を考慮した。実施工では、設計の妥当性を検証し、セグメントの健全性を確認するために、図-20に示すように、先行トンネルのセグメント計測を行い、後行トンネルの掘進管理にフィードバックさせることとした。

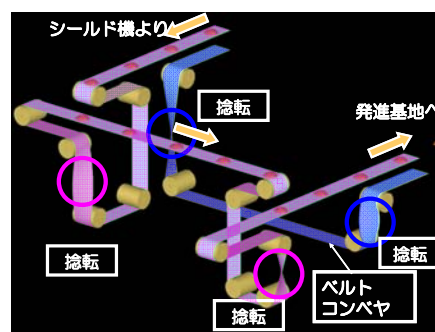


図-19 ベルトコンベア捻転装置概要図

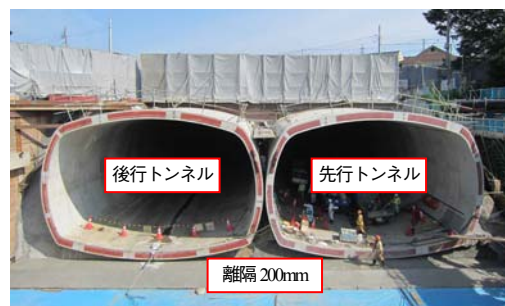


写真-4 セグメント併設状況

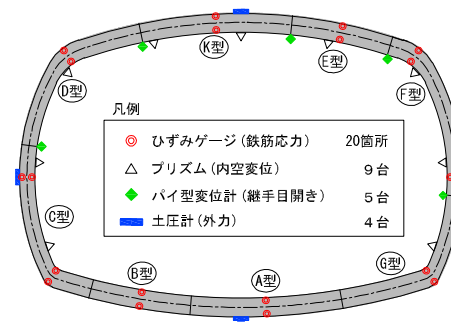


図-20 セグメント計測配置

4. 技術的評価および施工実績

(1) 複合アーチ断面

a) セグメント構造

セグメント本体について、実物大供試体による曲げ試験(単調載荷・正負交番載荷)を実施した結果、試験体の降伏荷重は単調載荷、正負交番載荷ともに設計降伏荷重を上回った(図-21)。これは隅部のクロス配筋と帯鉄筋が腹圧力に対して有効に機能し、セグメントのひび割れ発生を抑制した結果と考えられる。

b) セグメント組立

今回開発したセグメント組立装置の性能を事前に検証するため、製作工場において、実大セグメントによる組立試験を実施した。この試験では、無負荷作動及び負荷作動時にそれぞれの要求性能(圧力・速度)を満足しているかどうかを検証した。その結果、セグメント重心と把持位置が大きくずれた最大重量の隅部セグメントについても各動作(走行、昇降、スイング、スライド)とも要求通りの性能を満足していることを確

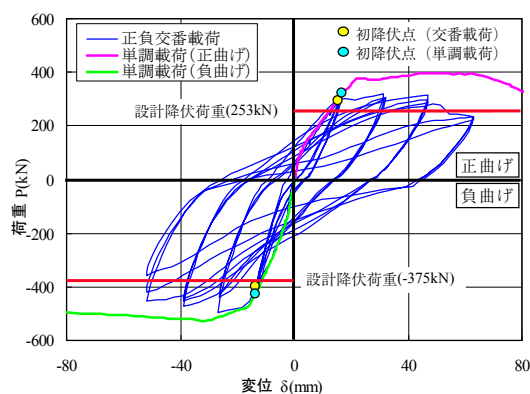


図-21 単体曲げ試験結果(正負・単調)

認した(参考文献3)。また、現場施工においても本組立装置の操作性は安定しており、組立時間は70分程度と工場での組立試験結果と同等であった。現場でのセグメント組立状況を写真-5に示す。

(2) 開放型シールド機の掘削

上半部のローム層の自立性は高く、切羽の安定性は全く問題なかった(写真-6)。一方、下半部の硬質砂礫層には礫径 600mm 程度の巨礫が点在することは判明していたが、実際には礫径 1m を超える巨礫が多数出現した(写真-7,8)。ベルトコンベアでの搬出が困難な大きさの礫に対しては、バックホウのアタッチメントをバケットからブレイカーに交換し、切羽で巨礫を破碎したのち、シールド機内のベルトコンベアにて搬出した(写真-9)。切羽でのアタッチメント交換作業が可能な開放型シールドの利点を活かし 1m を超える巨礫地盤の掘削に対しても、柔軟に対応することができた。

(3) 国道413号の通過

国道413号の交通量は14,000台/日と非常に多く、また、水道・ガス・下水・NTTなど合計10本の地下埋設物があった。これらの埋設企業者との協議によって定めた変状の管理目標値は、 $\pm 10\text{mm}$ 以内であった。トライアル掘進区間にて最も有効であった掘削パターンを用いて掘削を行い、路面変状をトータルステーションによりリアルタイムに監視しながら、掘進管理を実施した。また、裏込め材が近接埋設物に影響を与えないようにするため、袋つきのセグメントを採用した(写真-10)。これらの対策により、埋設管に影響を与えることなく、国道413号直下の掘進を上下線とも無事に完了することができた。



写真-5 セグメント組立状況



写真-7 礫混じり状況



写真-9 ブレイカーによる礫破碎



写真-6 切羽地山状況



写真-8 巨礫出現



写真-10 袋つきセグメント

(4) 地上発進・地上到達

a) 地上発進

グラウンドアンカーにより反力を確保していたため、ジャッキ推力が作用した際に、アンカーPC鋼線の伸びによる反力鋼材の変位が発生する。上り線では、アンカー自由長が短かったこともあり、アンカーの伸び量は小さかったが、反力鋼材の変位量を考慮してジャッキ選択を行うことが今回のような反力設備での発進時の管理ポイントであることがわかった。上り線は、土被り12 mでの発進であったが、無事にシールド機を前方の地山貫入し、地上発進することができた(写真-11)。

一方、下り線は、仮設構台上から発進であったため、仮設構台上から既設土留めまでの間、反力アンカーが空中に露出し、上り線よりアンカー自由長が長くなった。このため、ジャッキ推力が作用した時のPC鋼線の伸び量のバラツキによるシールド機の方角制御への影響が懸念された。そこで、伸び量のバラツキを抑制するために反力鋼材同士を連結するとともに、アンカーPC鋼線の本数増加と径のサイズアップでPC鋼線の伸びの抑制を図った。加えて、各アンカーの伸び量を逐次計測して適切なジャッキを選択することで、シールド発進時の方角制御を高精度に行うことができた(写真-12)。

また、上下線とも反力鋼材の高さを後方台車より低くしたことで、後方台車をシールド機に接続したままの発進が可能となり、段取替の省略による工程短縮など、地上発進の利点を十分に活かすことができた。

b) 地上到達

上り線の到達部は、土被りが0.6mと非常に小さかったこともあり、シールド推進時に表層地盤の引きずり現象が発生した。しかし、到達防護工の効果により、懸念されていた河岸急斜面の地山の崩落を発生させずに、無事に到達することができた(写真-13)。

一方、下り線の到達は、土被り12 mの交差道路を通過した直後に切土法面への地上到達であった。このため、交差道路の一般車の通行を可能にしながらシールドを到達させることも課題となった。そこで、上り線到達直前の推進時に生じたようなシールド直上の表層地盤の引きずりを防止するため、到達部坑口にあらかじめ設置していた防音壁基礎コンクリートをH鋼で補強するとともに、浮き上がり防止用としてウェイトを載荷した。この結果、土被り12 mの交差道路の通行を可能にしながら、下り線シールドも無事に到達させることができた(写真-14)。

(5) シールドUターン施工

シールド機回転作業直前の降雪により生分解グリスの効果が弱まったものの、回転時の牽引力を計画した油圧ジャッキ800kN×2台=1,600kNの能力以下に抑えて回転させることができた。架台を含むシールド機重量約6,000kNに対し、回転作業に要した牽引力は約800kNであり、摩擦係数は約0.13であった。この結果、仮設構台や橋台に影響を与えることなくスムーズに回転作業を行うことができ、横移動を含めた回転工の所要日数は3日間であった(写真-15)。

残土搬出のUターン設備として用いたバルコン捻転装置は、中継部に動力設備が不要であるため、本工事のような狭隘な回転基地でも連続バルコンの適用が可能となり、効率のよい残土搬出が実現できた(写真-16)。



写真-11 上り線シールド地上発進



写真-13 上り線シールド地上到達



写真-15 シールド機回転

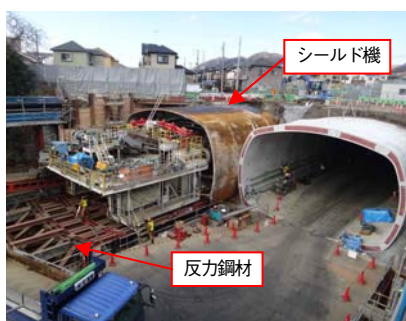


写真-12 下り線シールド地上発進



写真-14 下り線シールド地上到達



写真-16 連続バルコン捻転装置

下り線へのセグメント運搬は、発進基地～上り線坑内～回転基地を経由して、フォークリフトによる搬入を行った。これは、地上発進のメリットを活かし、発進基地の地上から直接シールド坑内へ車両の進入が可能であることにより実現できたものである。また、狭隘な回転基地においてもフォークリフトはスムーズな運搬能力を発揮した(写真-16)。

表-3 鉄筋応力計測結果

側部鉄筋応力 (N/mm ²)	上り線 施工後	下り線 通過後
計測値 (併設増分)	42.0	56.5 (+14.5)
設計値 (併設増分)	51.3	89.2 (+37.9)

(6) 超近接併設施工

下り線発進直後のトライアル施工により、①余掘りが大きいと切羽通過時に先行トンネルが引き込まれる②左右の蛇行修正時に先行トンネルが押し込まれる③離隔部の裏込め充填が不足すると先行トンネルの変形が大きくなるという傾向がわかった。そこで、掘進管理システムによる余掘り防止・適切なジャッキ選択による方向制御、裏込め注入管理を徹底して施工管理を行った。なお、後行トンネルが先行トンネルの計測断面を通過する際に得られたセグメントの計測値と、設計値を比較した結果、併設影響の大きいセグメント側部の鉄筋応力は設計値に比べて安全側である結果となった(表-3)。また、全線にわたり先行トンネルに有害な影響を及ぼすことなく、無事に超近接併設施工を完了することができた(写真-17)。



写真-17 トンネル坑内完成

5. おわりに

従来であれば開削工法が適用されていた小土被りトンネルの施工にURUP工法を適用することで、大幅な工期短縮を実現した。また、閑静な住宅地において周辺住民の生活環境保全を維持するとともに、掘削土量の縮減をはじめ、多くの環境負荷低減を実現することができた。さらに、交差道路直下での小土被り・複合アーチ断面・大断面開放型シールド・超近接併設施工など、過去に例を見ない厳しい条件下でのシールド工事であったが、新たに開発した各技術を駆使して適切な施工管理を行うことにより、交差道路直下の地下埋設物にも影響を与えることなく、無事に施工を完了することができた。

今後、本工事が市街地における小土被りの道路トンネル工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 前田他 複合アーチ型シールドトンネルにおける隅部セグメントの配筋に関する検討 土木建設技術発表会 2010 概要集, pp.237-242, 2010.
- 2) トンネル・ライブラリー第 5 号 山岳トンネルの補助工法 土木学会, 1994.
- 3) 蛭子他 非円形断面シールドトンネル用セグメント組立装置の開発と導入 第66回年次学術講演会概要集, 2011.

(2013.9.2 受付)

CONSTRUCTION OF SHALLOW EARTH COVER COMPOSITE ARCH SECTION PARALLEL TUNNELS WITH MINIMAL CLEARANCE BY OPEN SHIELD TBM

Hisashi Tamura, Hiroyuki SAKUMA,
Kazunori Oi, Nobuhiko Ebisu and Tomonari MAEDA

417m long two lane up and down line road tunnels were built in a quiet residential area in Sagami City, Kanagawa Prefecture, as a part of Across SAGAMI Road that constitutes Metropolitan Inter-City Expressway. Although the original plan had selected open cut method for this project, considering period of construction, impact on environment, and influence over traffic on existing roads, contractor's proposal of building two extremely shallow parallel tunnels 200mm apart by TBM called Ultra Rapid Underpass (URUP) Method was adopted.

This paper reports construction of the composite arch section parallel tunnels by open shield TBM using URUP Method that has enabled application of tunnelling to the construction of underground structure with very shallow earth cover as little as 0.6m.