特集≫≫　インフラ

開放型シールドを採用した道路トンネルの施工実績
URUP 工法

久　田　英　貴

閑静な住宅街に高速道路を建設する「さがみ縦貫川尻トンネル」は，小土被り・近接する地下埋設物・巨礫の発生・地上発進到達・狭隘な空間でのＵターン施工など各種の難条件を克服しなければならなかった。本報では，工事の概要から問題を解決するための方策とその結果について紹介する。
キーワード：シールドトンネル，小土被り，Ｕターン

1. はじめに

圏央道（首都圏中央連絡道路）は，都心から半径およそ 40 km ～ 60 km の位置に計画された首都圏３環状道路の一番外側に位置する環状道路で，延長約 300 km の高規格幹線道路である。「さがみ縦貫川尻トンネル」は，圏央道の神奈川県区間の一部路線である，さがみ縦貫道路を形成するトンネルである。

当初設計は，開削工事で計画されていたが，現場施工日数の短縮・工事中の閑静な住宅街である周辺環境や交通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（以下「本工法」という））を技術提案し採用された。

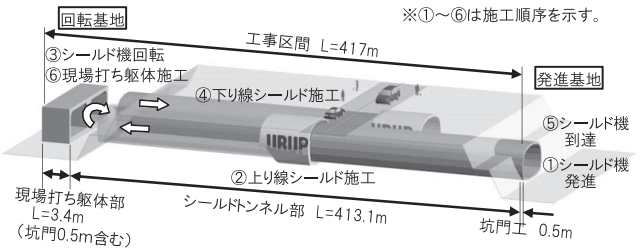
本シールド工事は，①国道を含む 10 箇所の交差道路の直下を小土被り（0.6 m ～ 4.8 m）で掘進すること，②トンネル上下に近接した地下埋設物（最小離隔 0.6 m）があること，③シールド掘削対象地盤に，巨礫（ϕ 600 mm 超）を含む玉石混じりの砂礫層があること，④シールド機は地上発進・地上到達が必要であること，⑤相模川河岸急斜面における狭隘なヤードでシールドＵターン施工を行う必要があること，⑥上下線トンネルの離隔が全線に渡り 200 mm の超近接の併設シールドであること，などの特徴を有する。

本稿では，このような条件下における複合アーチ断面・開放型シールドを採用した本工法の施工計画，施工上の課題と対策および施工実績について報告する。

2. 工事概要

本工事では，トンネル全長 417 m のうち現場打ち躯体及び坑門部を除いたシールドトンネル部 413.1m を本工法により，１台のシールド機を使用し往復施工する。

図―１に施工概要図，**表**―１に工事概要を示す。



図―１　施工概要図

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：（上り線）L=412.3m（下り線）L=413.6m 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）

(1) 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。地下水位はトンネル位置よりも低くシールド掘削対象地盤は安定した地盤条件である。また，トンネル下半部の硬質砂礫層には礫径 600 mm 程度の巨礫が点在する。

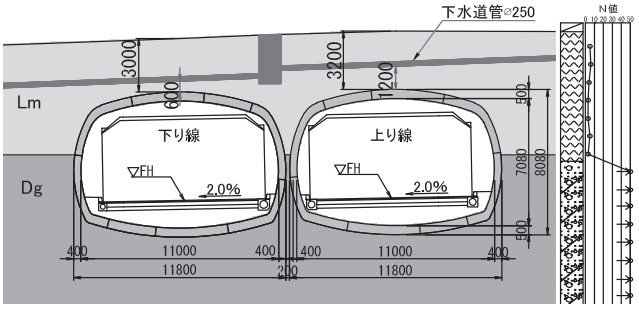
(2) 施工上の課題

本工事にシールド工法を適用するにあたり，施工上の課題を以下に示す。

①国道を含む10箇所の交差道路直下を小土被り(0.6 m ～ 4.8 m）で掘進する。
②トンネルの上下に近接した地下埋設物（最小離隔0.6 m）がある。
③シールド掘削対象地盤に，巨礫（ϕ 600 mm 超）を含む硬質砂礫層がある。
④シールド機は，地上発進・地上到達が必要である。
⑤河岸急斜面上の狭隘なヤードでシールドUターン施工を行う必要がある。
⑥上下線トンネルの離隔が全線に渡り200 mmと超近接併設シールドである。

上記に示すとおり，本工事は，前例のない厳しい条件のシールド工事である。

図―2に国道413号線の横断図を示す。



図―2 横断図（国道413号）

3. 交差道路直下・小土被り・巨礫掘進対策

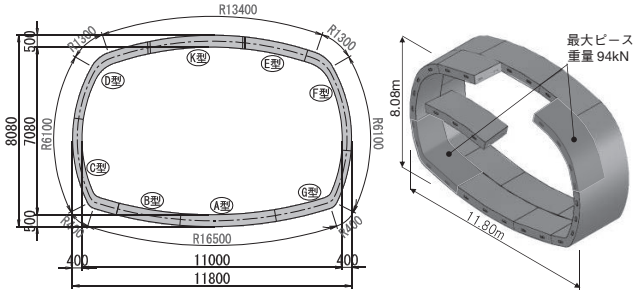
(1) 複合アーチ断面の採用

本工事の線形計画では，円形断面の場合，トンネル上下にある地下埋設物とトンネルが鉛直方向で支障し，また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。このため，本工事にシールド工法を適用するには，トンネル上下の空間が小さい非円形断面を採用する必要があった。しかしながら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，合理的な断面形状を検討した結果，アーチ効果により曲げモーメントを抑制しつつ，地下埋設物との離隔を確保できるトンネル頂底部，側部，隅部を曲率の異なるアーチで構成する「複合アーチ断面」を採用し，建築限界に近づけて不要な掘削断面を縮減した。

(a) セグメント構造

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，高い曲げ性能を有する継手が必要になることが分かった。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（綱繊維補強高流動コンクリート）セグメントを採用した。

図―3に複合アーチ断面の概要図を示す。



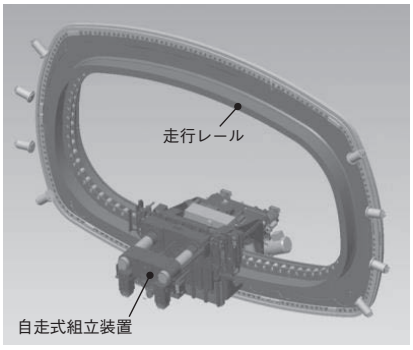
図―3 複合アーチ断面概要図

(b) セグメント組立装置

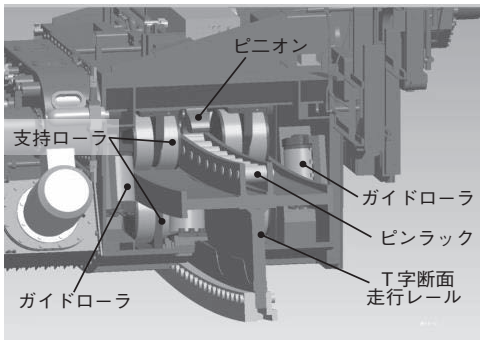
本工事で使用する複合アーチセグメントは，1ピースの最大重量が94 kNであり，各分割ピースが特殊な形状である。また，縦と横の扁平率が小さい（0.685 = 8.08 m/11.80 m）ため，既存の矩形用セグメント組立装置の適用が困難であったため，複合アーチ断面に対応できる新たな方式の組立装置を開発した。

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置し，そのレール上を自走する組立装置がセグメントを把持し任意の位置へ搬送し組立てを行うものである。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，レール上部に取付けたピンラックに走行装置側のピニオンを回転駆動させ噛み合わせる機構とした。

図―4に組立装置概要図と**図**―5に組立装置走行部を示す。



図―4 組立装置概要図



図―5　組立装置走行部

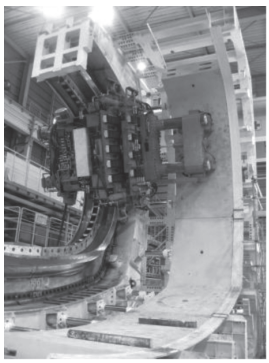
(c) 実証実験と現場施工実績

新たに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。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認した。

なお，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示す。

今回の施工実績から，本組立装置は断面形状に応じた走行レールを配置することで，複雑な非円形断面形状に対応することができることが分かった。

写真―1　組立試験状況，**写真―2**　現場組立状況を示す。

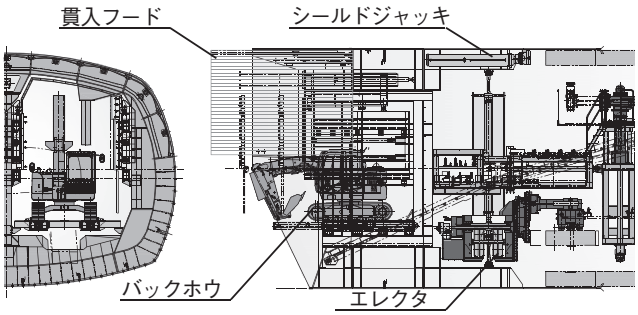


写真―1　組立試験状況

写真―2　現場組立状況

(2) シールド機の仕様

シールド掘削対象地盤は，全線にわたり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。また，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る。一方，下半部の硬質砂礫層には ϕ 600 mm 程度の巨礫があることが想定されたことから，密閉型シールド機では巨礫による排土設備の閉塞や，カッタービットの摩耗および切削性の低下や



図―6　シールド機全体図

表―2　シールド機仕様表

名　称	仕　様
シールド機寸法	幅11.96m×高さ8.24m×長さ11.95m
シールドジャッキ性能	2,510kN×2,300st×29MPa×20本，6.3cm/min
貫入式フードジャッキ	300kN×1,400st×19.5MPa×9本
エレクタ仕様	モノレールラック式，走行速度10m/min
エレクタ回転取扱重量	9.4t（セグメント1ピース最大）
掘削機構・能力	掘削機(0.4m³級)×2台・117m³/hr(2台)
排土機構・能力（シールド機内）	ベルトコンベア(幅750mm)×2台・160m³/hr(2台)
残土搬送設備・能力（トンネル内）	連続ベルトコンベア(幅610mm)×1系統・166m³/hr

小土被り施工のため，地表への掘削による振動等の影響が懸念されたため，切羽安定性評価により切羽の安定が確認できたことから巨礫の掘削に対応が容易な開放型シールドを採用した。シールド機の概略を**図―6**に仕様を**表―2**に示す。

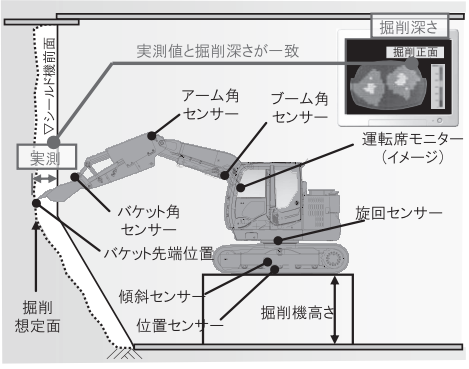
(3) 地盤変状対策

(a) 上段先行構造と貫入式フード

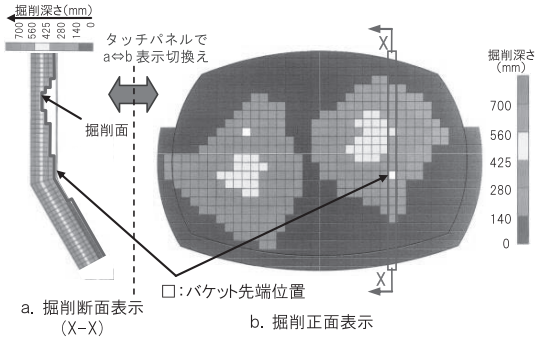
シールド機の先端部は，切羽の安定のため，シールド機上部を下部より 2 m 先行させた。さらに地表面への影響を低減させるとともに，掘削時の安定性を向上させるため，シールド機上部に独立して可動できる貫入式フード(9 分割, 最大張出し 1.4 m)を装備した。

(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。掘削機の各部に装備したセンサーにより，



図―7　ガイダンスシステム構成図



図―8 管理画面イメージ図

写真―3 巨礫破砕用ブレーカー

シールド機と掘削機の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，オペレーターの感覚に頼らず，掘削深さを数値管理することが可能となる。

図―7，8にシステム構成図と画面を示す。

(4) シールド掘進結果

(a) 交差道路の通過

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り，本シールド工事の交差道路の中で最も重要な幹線道路である。土被りは，3.0 m～3.2 m程度で，最も近接する下水管との離隔は0.6mという条件である。なお，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，± 10 mm以内であった。掘削初期にトライアル掘削区間を設け，貫入フードの貫入長さ，シールド掘削1回あたりの掘削長をパラメーターとして最適な掘削方法を調査し，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。また裏込材が近接埋設物に影響を与えないように袋つきのセグメントを採用した。これらの対策による，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。

(b) 巨礫地盤の掘削

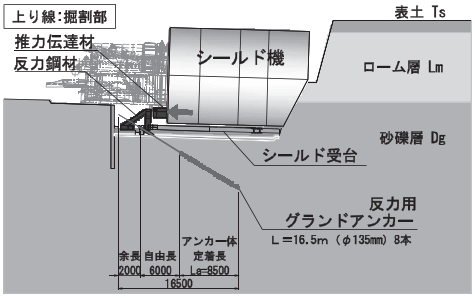
事前の土質調査から，トンネル断面の下半部の硬質砂礫層には礫径600 mm程度の巨礫が点在することが判明していた。しかし，実際には礫径1 mを超える巨礫が多数出現した。ベルトコンベアでの搬出が困難な大きさの礫に対しては，バックホウのアタッチメントをバケットからブレーカーに交換し，切羽で巨礫を破砕したのち，シールド機内のベルトコンベアにて搬出した。切羽での掘削機のアタッチメント交換が可能な開放型シールドの利点を活かし1 mを超える巨礫地盤に対しても，対応することができた。**写真**―3に破砕用ブレーカーを示す。

4. シールド地上発進・地上到達・Uターン施工

(1) 上り線地上発進

本工事の発進基地は，開削工法による工区と接続する関係から，従来シールド工事のような発進立坑を設けて背面地盤に反力を採ることが出来ない状態での発進（地上発進）であった。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およ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出来ることから，下部のシールドジャッキのみで推進する計画とした。反力設備は，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―9に発進反力計画図を示す。



図―9 発進反力計画図

(2) 上り線地上到達

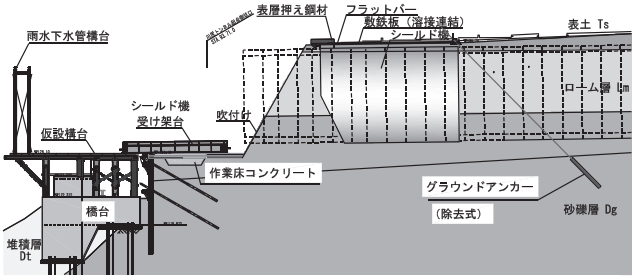
上り線が到達するシールド回転基地は，近接する市道の通行を確保する必要があったため，相模川河岸急傾斜面上の非常に狭隘なヤードに設置することとなった。市道の通行確保による切土範囲の制約から，上り線シールド進行方法左側は河岸急斜面の地山への到達となった。

到達部の土被りは0.6 mと非常に小さいため，シールド掘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。

その結果，シールド掘進時に表層地盤の引きずり現象は発生したものの，懸念された河岸急斜面の地山の崩落を防ぎ無事到達することができた。

図― 10 に回転ヤードと到達防護計画図を示す。



図― 10　回転ヤード・到達防護計画図

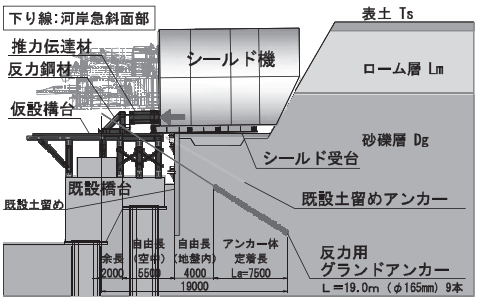
(3) シールド機回転

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鉄板を設置し，その上にシールド機受台を設置した。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 800 kN × 2 台＝ 1,600 kN 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総重量約 6,000 kN に対し回転作業に要した牽引力は約 800 kN 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，移動を含めた回転工の所要日数は，準備期間を除くと 3 日間であった。**写真**― 4 に回転状況を示す。

写真― 4　シールド機回転状況

(4) 下り線再発進

下り線の再発進は，既設橋台上に設置した仮設構台上から行う計画とした。橋台は本設構造物であり，発進時の推進反力を作用させることが許されなかった。そこで，反力鋼材の固定には，前方の既設土留め背面の地盤に設置したグラウンドアンカーのみによる計画とした。また，反力鋼材底面と仮設構台の間に敷鉄板を設置し，アンカーの伸びにより反力鋼材が変位した場合でも，敷鉄板上を反力鋼材が滑ることで仮設構台に水平荷重が伝わらない構造とした。**図**― 11 に下り線発進設備計画図を示す。



図― 11　下り線発進設備計画図

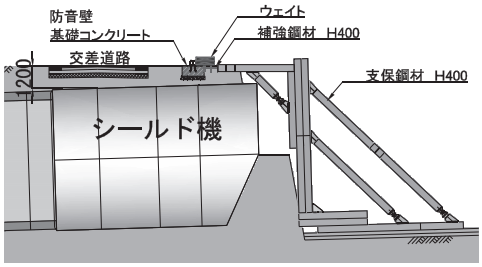
(5) 下り線シールド U ターン施工

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用した連続ベルトコンベアを回転基地仮設構台上にベルトの捻転装置を設置した。この捻転装置は，中継部に動力が不要なため，本工事のような狭隘な回転基地でも連続ベルコンの適用が可能であり，効率のよい残土搬出ができた。また，下り線へのセグメント搬出は，発進基地～上り線坑内～回転基地を経由し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。

(6) 下り線地上到達

下り線の到達は，土被り 1.2 m の交差道路を通過した直後に切土法面への地上到達となる。このため，交差道路の一般車両の通行を妨げることなくシールド機を到達させることが課題であった。上り線到達直前の掘進時に生じたようなシールド機直上の表層地盤の引きずりを防止するため，到達部抗口にあらかじめ設置し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 1.2 m の交差道路の通行を妨げることなく下り線も無事に到達させることができた。

図― 12 に到達防護計画図と**写真**― 5 に状況写真を示す。



図―12 下り線到達防護計画図

写真―5 下り線到達状況

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本工法 URUP 工法を適用することで，厳しい条件を克服し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への影響を低減し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。

JCMA

［筆者紹介］
久田 英貴（ひさだ ひでき）
㈱大林組
機械部技術第一課
担当課長