

# 泥土圧シールドで営業線直下・小土被りを掘進

辻 忠彦

鉄道路線の地下化に伴い、営業線直下で新線を構築する工事が増えている。本工事は2駅間（約861m）の上下線をシールド工法により掘進し、狭隘な駅部でシールド機の回転・こう上を行ったものである。今回は営業線直下の小土被りでの掘進と、シールド機の回転・こう上の概略を紹介する。

キーワード：営業線直下、小土被り、近接施工、狭隘な場所での回転・こう上

## 1. シールド工事概要

### (1) 工事概要

本工事は、2駅間の861mを泥土圧シールドにて施工する工事である。シールドトンネルは一部縦列配置の上下線2本からなり、延長1,722m（L = 861m × 2本）を1台のシールドでUターン施工を行う。

### (2) 地質概要

土質縦断図を図-1に示す。

シールド掘削対象地盤の大半を占める立川礫層（Tag）は、玉石状の砂礫を含む砂礫層であり、玉石の最大径は300mmで、いずれの深度においても径200mmクラスの玉石が3～10個/m<sup>3</sup>程度混入し、バインダー分が5%以下という特徴を有している。また、透水係数は概ね10<sup>-2</sup>～10<sup>-1</sup>cm/sを示している。

上総層群砂質土層（Ks1）は、比較的均質な細砂～粗砂が互層状をなしており、所々に粘性土薄層を介在する。N値は最上部で20～40程度であるが、概ね50以上の非常に締まった地層である。

上総層群粘砂性土層（Ksc）は、固結シルトと砂の互層で、N値は35～50以上を示し、多くは50以上の非常に硬い地層である。

また、地下水位はGL-5.5～-7.3mであり、トンネル断面の上半部から天端付近まで季節変動する。

### (3) セグメント構造

第2工区シールド工事では、ダクタイルセグメント、およびはRCセグメントを用い、二次覆工省略で計画した。

このうち、上下線2本のトンネルが左右の併設から上下の併設へと暫時変化し、土被りが13.7mまで深くなる区間の上り線259m（185リング）においては鉄道トンネルとして初めて鋼繊維補強高流動コンクリートセグメント（以下、SFRCセグメント）を採用した。本セグメントは、鋼繊維の補強効果により曲げ耐力の増加が見込める。また、鉄道トンネルでは、コンクリート片のはく落は重大な事故に直結するが、その防止効果が期待できる。

さらに、一般部のRCセグメントにおいても、トン

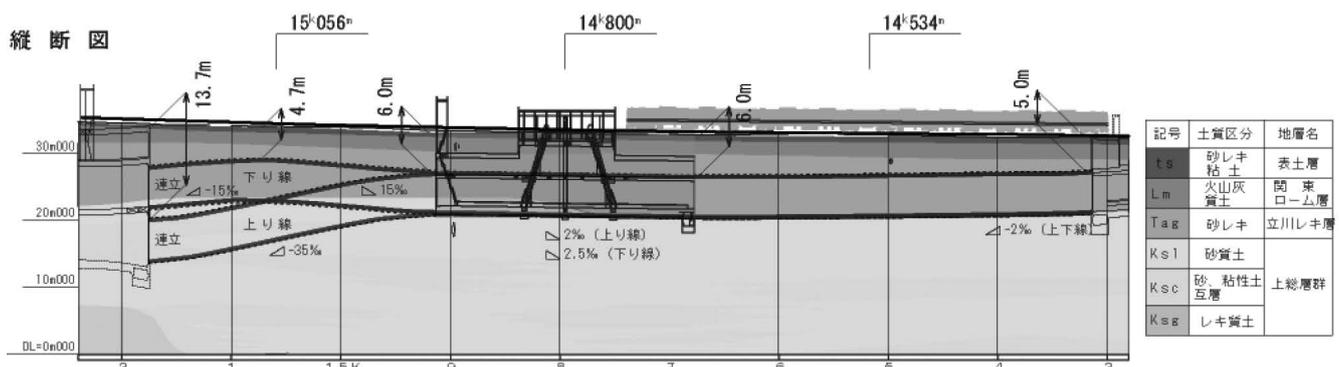


図-1 土質縦断図

ネル覆工のはく離・はく落を防止するため、セグメントの内表面に「耐アルカリガラス繊維シート」を設置したEXP（エキスパート）セグメントを採用した。

(4) 本工事の特徴

本シールド工事の特徴を以下に示す。

- ①営業線の直下を小土被り（最小土被り 4.7 m/0.69D）で縦断方向に連続して掘進
- ②掘削対象地盤は立川礫層が主体のため、バインダー分が少なく最大礫径 300 mm を想定
- ③地下水位はシールド掘削断面に対し不飽和で季節変動
- ④上下線のシールドトンネルの最小離隔が 400 mm と超近接
- ⑤営業線直下の回転立坑において、約 300 t のシールドを回転・扛上

以上に示すとおり、これまで日本国内でも例を見ない極めて厳しい条件のシールド工事といえる。今回は、このような条件下における泥土圧シールドの施工計画、課題と対策、施工実績について報告する。

2. 営業線直下・小土被り・SEW 発進到達・礫層掘進対策

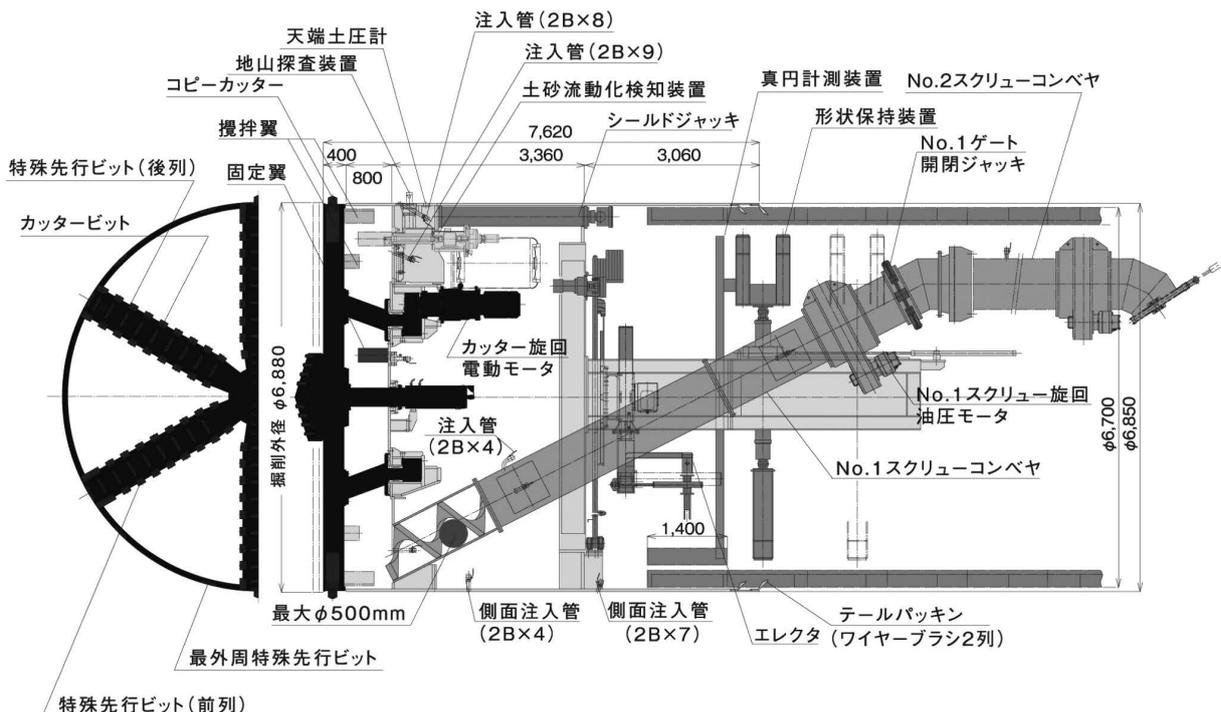
(1) シールドの仕様

本工事で使用した泥土圧シールドの仕様を表一に示す。シールド形式は、立川礫層への対応、低土被り

表一 シールド仕様

項目	詳細項目	
シールド本体	外径	φ 6,850 mm
	機長	7,620 mm
	テールシール	ワイヤブラシ耐圧型 2列
推進機構	シールドジャッキ	2,000 kN × 21 本
	総推力	42,000 kN
カッター装置	スポーク本数	6 本
	開口率	約 68%
	支持方式	中間支持方式
	装備トルク	6,674 kN-m (100%)
	カッター回転数	0.94 rpm
	余掘装置	コピーカッター 2 基
土砂攪拌装置	攪拌翼	外周部 2 本・内周部 2 本
	固定翼	外周部 1 本・内周部 1 本
裏込注入	注入方法	同時注入
	注入箇所	セグメントグラウトホール
土砂搬出設備	形式	リボン式スクリーコンベヤ φ 850 mm
	排土能力	約 165 m <sup>3</sup> /hr
	排土可能礫径	φ 500 mm

掘進、発進基地の用地等を考慮して泥土圧シールド工法を採用した（図一 2 参照）。カッターヘッド形状は、立川礫層に対して破碎よりも取り込みを優先してスポークタイプを採用し、玉石を取り込むスクリーコンベヤは排土可能径 φ 500 mm のリボン式を採用し、確実なプラグゾーンを確保するため 2 次スクリーコンベヤを設置した。



図一 2 シールド

また、地表面への影響を小さくするため、シールドには同時裏込注入装置を設けず、セグメントからの同時注入方式を採用し、できる限り早いタイミングで裏込注入を開始するために、形状保持装置の上部を二股構造とした。さらに、止水性向上および再注入が可能な二重止水裏込注入孔を採用した。

さらに、本シールドは、礫層を長距離掘進することに加えて、発進部および到達部にシールドで直接切削可能なSEW壁を採用しているため、カッタービットの形状、耐久性を確保し、切削性能を維持することを目的として、特殊先行ビットを段差配置することとした。

(2) 切羽の安定対策

(a) 塑性流動化対策

①掘削用添加材

主たる掘削対象地盤である立川礫層はシルト以下の細粒分が不足しているため、ベントナイト系加泥材を添加することでこれを補うとともに、気泡を添加することにより、安定したチャンバ内の塑性流動および排土性状の確保とカッタートルクと推力の低減を図った。注入量・注入位置は掘進状況および排土状況に応じて調整した。

②土砂流動管理技術の適用

シールド施工時の切羽の安定保持に必要なチャンバ内土砂の塑性流動状態を定量的に評価・把握するため、リアルタイムに視覚的に捉えることが可能なチャンバ内の土砂流動管理技術を導入した(図-3参照)。

(b) 切羽土圧管理

小土被り条件下では当然ながら有効土被り圧が小さく、土圧係数から求められる有効静止土圧との差も小さくなる。そのため、切羽土圧の許容幅が狭くなり、わずかな管理誤差でも周辺地盤に影響を与える可能性

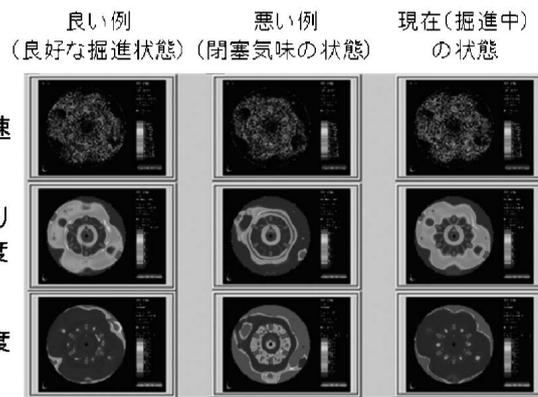


図-3 土砂流動管理技術

がある。従来以上に繊細な切羽土圧の調整を行うために、以下の対策を講じた。

- ・チャンバ内に土圧計を6箇所(上部・中央・下部各2箇所)配置
- ・上部土圧計をメインの管理土圧とし、下限値と上限値を設定
- ・上部土圧計の下限値は「有効静止土圧 + 地下水圧 + 予備圧」、上限値は「土被り圧」
- ・中央の土圧計は下限値を上部土圧計と同様に設定
- ・下部土圧計はチャンバとスクリーコンベヤの閉塞防止のための目安として監視

さらに、営業線の運行が切羽に与える影響を考慮し、上記設定土圧に列車荷重による動的荷重成分を付加した。

(c) 効率的な掘削土砂の排出と排土管理

本工事は礫地盤における営業線直下・小土被り条件であることから、最も効率的かつ連続的に掘進を行うことを目的として、坑内の土砂搬出には延伸式の連続ベルトコンベヤを、掘削土砂の垂直搬送には垂直ベルトコンベヤを採用することとした(図-4)。排土量

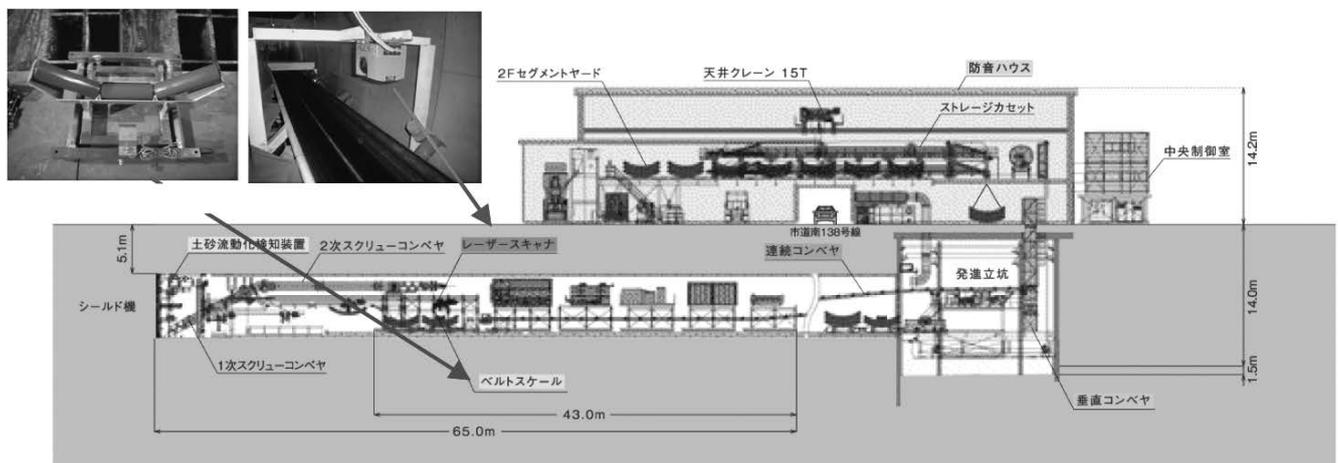


図-4 土砂搬出設備と計測装置

の管理は、切羽に近い後続台車上の中継コンベヤに体積式のレーザースキャナと重量式のベルトスケールを設置し、統計的手法を用いて、掘進中にリアルタイムグラフで監視することにより、異常時に直ちに対応できるシステムを構築した。

(3) 計測管理

運行の安全確認を目的に、掘進状況を把握するため、24時間の自動計測ほか各種計測による情報化施工を行うこととした。

(a) トライアル計測

周辺地盤および営業線に影響を与えない掘進管理方法を早期に確立するため、営業線の直下に侵入するまでの発進立坑から約90mまでの区間をトライアル掘進区間とし、トライアル計測断面を3断面設置し、各種計測装置によりデータを収集することとした(図-5)。

(b) 軌道・地盤計測

軌道の安全確認と、地盤の変状を掘進管理へリアルタイムにフィードバックし地盤変状を最小限に抑えるため、トータルステーションによる自動計測を実施した。測定箇所は、上下線の内軌側レールとシールド直上地盤とし、測定ピッチは10mとした。

(4) 掘進結果

上記、各対策を施し、掘進を行った結果を示す。

(a) 添加材管理結果

発進当初は気泡を主体で添加材を使用した。切羽の安定が困難となり、ベントナイト系加泥材を主体に変更したところ切羽の安定を確保することができた。

また、断面が深く飽和された上総層および地下駅構築のために先行薬液注入を実施した地中切掘り区間の掘進においては、気泡での掘進が適していた。

添加量および注入位置の選択は土砂流動管理技術のリアルタイムシミュレーション結果を判断材料として活用した。

(b) 土圧管理結果

トライアル計測において土圧管理方法を確立させ、軌道・地盤計測結果をフィードバックしながら土圧管理結果を行った結果、営業線直下において概ね管理目標値の±5mm以内(平均-2mm)の変位量に抑えることができ、列車の運行を妨げることなく掘進することができた。なお、その結果、後続トンネルの掘進では同条件の先行トンネル掘進時よりも高い切羽土圧を必要とすることがわかった。

さらに、掘進停止時におけるチャンバ内土圧の減少によって直上の営業線に影響を及ぼすことがないように、ベントナイト系加泥材を用いてチャンバ内土圧保持を行った。

また、掘進開始当初は直上の営業線の進行による列車動的荷重の影響が懸念されたが、土圧計実測値がシールド天端で約2~3kPaと非常に小さいものであった。これは軌道のバラスト道床がクッション材の役割を果たしたと想定される。

3. 上下線最近接部 400 mm 以下の近接施工対策

(1) セグメント計測

本工事では、双設されるトンネル間の離隔が極めて

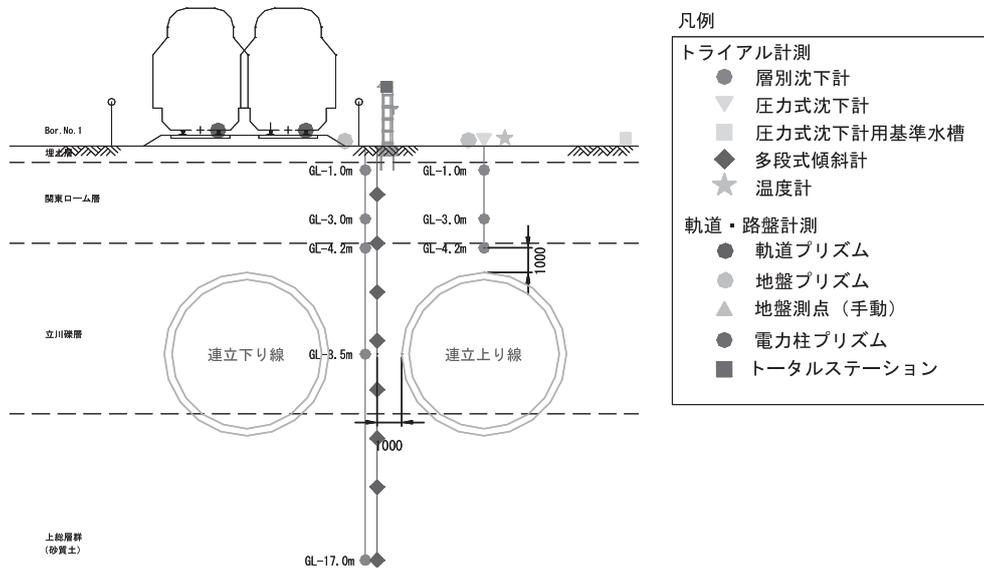


図-5 トライアル計測断面

小さいため、後続トンネル（下り線）掘進時の切羽圧力や裏込め注入圧などが、先に構築された先行トンネル（上り線）に影響を及ぼす可能性が考えられた。上り線のセグメント計測を行い、掘進管理にフィードバックするとともに、後続トンネル掘進の影響が大きいと判断される場合には、仮設支保工の設置など、先行トンネルの補強を検討することとした。

## (2) 近接施工結果

後続トンネルが計測断面①（トンネル離隔 550 mm）を通過する際に得られたセグメントの計測結果から、上下線のトンネルが最も近接する計測断面③（トンネル離隔 400 mm）の位置でのセグメントの応力状態を予測し、特別な対策は不要であると推定された。さらに計測断面②（トンネル離隔 1400 mm）にて上記推定の妥当性を確認して、計測断面③を通過した結果、先行トンネルに有害な影響を及ぼすことなく、当該箇所での施工を実施することができた。なお、ひずみゲージの測定値から推定した断面力は軸力が卓越し、セグメントの応力状態は設計値に比べて安全側であることが明らかとなった。

## 4. 狭隘な回転立坑におけるシールドの回転・扛上

### (1) 回転

乾性摩擦低減材による工法を採用し、シールドの回転を行った。これは回転架台接触面に乾性摩擦低減材を塗布することで回転時の摩擦力を低減する方法であり、湿式のグリスのように落下せず現場環境を悪化させることがない二硫化モリブデンを主剤とした灰黒色の乾性被膜潤滑材を使用した。

回転架台は、下部より敷桁、受桁、敷鉄板、到達架台、バックアップ鋼材

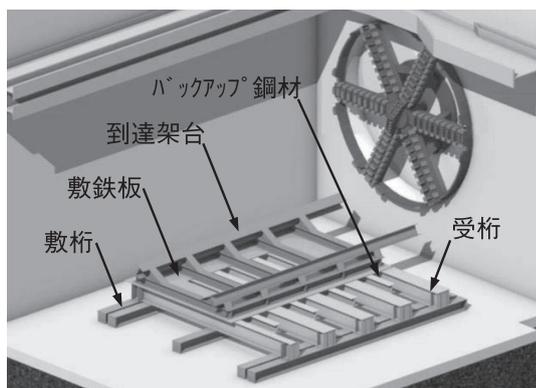


図-6 シールド回転状況

(図-6 参照)。

架台を含むシールドの重量は約 300 t であり、回転作業に必要な牽引力はおよそ 15 t であった。

### (2) 扛上

回転立坑が営業線直下で空頭が小さく、シールド上部に吊り桁を設置できないため、シールドの側面に設置した支柱・ジャッキ等の反力設備により、シールドを載せた受桁を吊り上げる、吊上げ方式を採用し、約 7.9 m シールドを扛上させた（図-7 参照）。

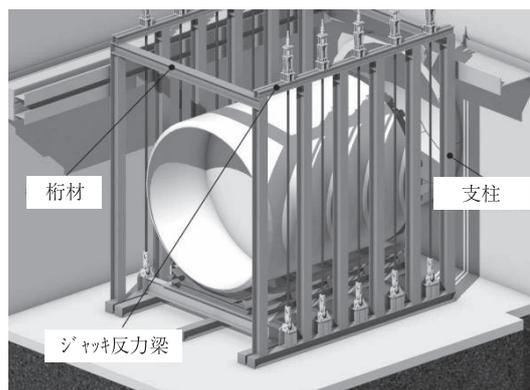


図-7 シールド扛上状況

使用した機材は、センターホールジャッキ（揚重能力 700 kN、ストローク 200 mm）と PC 鋼より線（φ 28.6 mm）10 セットで、各ジャッキにはストローク計を装備した。また、補助ストランドを装備し、ジャッキトラブルや PC 鋼より線の破断による万一の落下に備えた。

1 サイクルあたりの扛上量を 200 mm、上昇速度を 100 mm/分とし、各ジャッキの相対変位が 5 mm 以内となるよう自動運転制御しつつ、人為計測の結果をもとに手動で微調整を行った。

懸念されたシールドと支柱材の接触については、受桁および支柱の剛性向上と、全ジャッキの一元管理により、各受桁・ジャッキの作用荷重が均等となることにも変形量が抑えられ、ジャッキ操作に伴うシールドの横ぶれもなく、扛上作業を無事に完了することができた。

### (3) 仮セグメントを省略した再発進

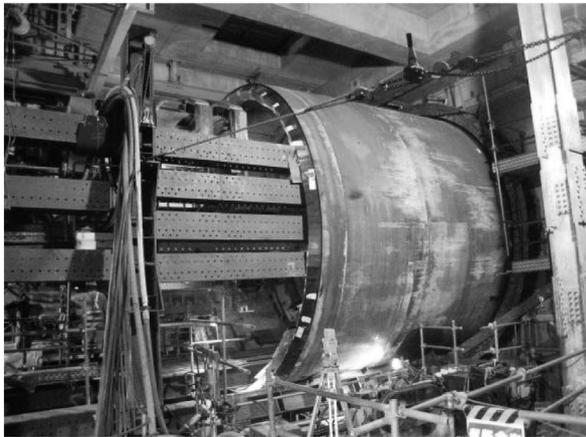
初期掘進時におけるシールド推力の伝達部材として、仮セグメントを用いる方法が一般的であるが、本工事では、下り線工事にてシールド内に設置した初期掘進用の小型連続バルコンが仮セグメントの組立て作業に支障するため、組立て用スペースが機内に確保されるまでの発進から 2 m の区間を仮セグメントに依

らない方法で掘進した（写真—1 参照）。

仮セグメントの省略によって、初期掘進用の小型連続バルコンの利用が可能となり、土砂の運搬作業が効

率化されたとともに、初期掘進工程において5日間の工期短縮効果も得られた。

JCMA



写真—1 シールド再発進状況



【筆者紹介】

辻 忠彦（つじ ただひこ）

㈱大林組

土木本部本部長室

部長