

# 22. 世界最大級の泥土圧シールドマシンによる長距離施工について

(株)大林組：○的場 一彦、中山 正夫  
長谷川 英崇、野中 圭二郎

## 1. まえがき

首都高速中央環状線新宿線は中央環状線の東京都目黒区青葉台から板橋区熊野町に至る延長 11 km の路線であり、街路の環状 6 号線（山手通り）の整備とともに、平成 18 年度の完成を目指して建設が進められている。本工事はそのうち豊島区千早一丁目の立教通り立坑～新宿区上落合二丁目の大江戸線中井駅までの延長約 2,020m 区間（外回り）を掘削外径φ12.04m の世界最大級の泥土圧シールドマシンにより施工するものである。計画路線は山手通りの下を縦断し、鉄道や橋脚基礎等の重要構造物に離隔 1D 以内に近接することから切羽の安定保持が重要となる。土質は前半が東京礫層（以下 Tog 層）が主体の礫地盤（想定最大礫径φ300mm）であり、後半はN値 50 の非常に密な江戸川層砂質土層（以下、Eds 層）と江戸川層粘性土層（以下、Edc 層）の互層となることからビットの磨耗対策が必要となる。

また、シールドの発進基地は、山手通りと立教通りの交差点付近に位置し、道路幅予定地内のごく限られた用地しか確保できないうえ、2 本のトンネルを同時期に施工するため、省スペースなシールド設備計画が高速施工の可否を左右することになる。

そこで本工事ではシールドマシンにビット磨耗と礫地盤に対応した大型の特殊先行ビットを配置するとともに、切羽の安定保持と掘削土砂の塑性流動化を確実にを行うための攪拌装置を装備した。また、長距離施工、高速施工に対応できる土砂搬出設備、資材搬送設備等を狭隘なスペースの中で設置し、掘進管理として掘削土砂の塑性流動性の状況および排土量管理の精度の向上を図った計測システムを採用した。本報文では、シールドマシン、後方設備を含む地上設備の概要及び本掘進途中までの施工実績について報告する。

## 2. 工事概要

事業概要を図-1に、工事概要を表-1に示す。本工事の特徴とその主要因に関する対策項目について、図-2に示す。特に大断面土圧シールドマシンで掘進延長の半分を占める礫地盤でのビット磨耗対策、道路幅予定地を使用した狭隘なスペースでの地上設備の設置、工期短縮を図るために大量の掘削土砂を効率よく搬出するための土砂搬出設備、切羽を優先とした一次覆作業に加え同時施工となる床版設置工・内部支保工（発注予定）を考慮した資材搬送等が、円滑かつ高速施工を実現するうえで重要となる。また、掘削土砂



図-1 事業概要図

表-1 工事概要

工事名称	SJ51工区～SJ53工区(外回り)トンネル工事		
発注者	首都高速道路公社		
施工者	大林・大豊・東急特定建設工事共同企業体		
工期	平成14年3月14日～平成17年2月15日		
施工場所	東京都豊島区千早一丁目～新宿区上落合二丁目		
工事内容	シールド機径	φ12,020mm	
	トンネル延長	2,018.1m	掘削土量 229,766 <sup>3</sup>
	トンネル線形	平面線形：R=500m(左カーブ)、R=600m(右カーブ) 縦断線形：i=2.5% (最急勾配)	
	掘削工法	泥土圧(気泡)シールド工法	
	一次覆工	RCセグメント(パステルセグメント) : 8337ヶ	外径φ11,800mm、桁高450mm、幅1,500mm
	ダクタイルセグメント : 2537ヶ	外径φ11,800mm、桁高400mm、幅,200mm	
	鋼管セグメント : 3077ヶ	外径φ11,800mm、桁高400mm、幅,500mm	
発進・到達方法	発進方法：NMST壁、到達方法：地盤改良工		
土質	武蔵野礫層(Mg)、東京層(Toc, Tos)、東京礫層(Tog)、江戸川層(Edc, Eds)		
土被り	9.2～23.4m(河川横断部9.6m)		

のチャンバー内での塑性流動状態の可視化、レーザースキャンによる掘削土量、ロードセルによる土砂重量等の計測は掘削作業の安全性、施工精度の向上を図るうえで必要となる。

### 3. シールドマシンとビット磨耗対策

シールドマシン全体図を図-3に、仕様を表-2に示す。

本工区は、掘削地盤前半に出現する礫径φ50～300程度のMg層・Tog層、発進立坑土留壁部のNOMST壁、換気所の柱列式地中連続壁等の切削があることから、カッタービットの母材部（シャンク）には真空焼入れを施したSKC24を、刃先部（チップ）には耐摩耗性、耐熱性、耐食性、高圧縮強度等種々の特性をもった耐久力のあるWC-Co系超硬合金材を使用した。

本工事では長距離掘進・礫地盤への対応として、カッタービット（さし刃型ビット）の他に、高耐久性を有する大型の特殊先行ビットを採用した。図-4にビット磨耗予測と実績（630R）を図-5にビット配置図を示す。

ビットの磨耗予測についてはカッタービットのみ配置した場合の磨耗量は、46.6mm（磨耗係数=26.7×10<sup>-3</sup>）に達すると推定され、許容磨耗量30mmを超える結果となる。そこで、特殊先行ビットを併用し、カッタービットの長寿命化を図ることとした。特殊先行ビット併用による磨耗低減効果は、過去の実績より40%程度であることが確認されており、その効果により、カッタービットの推定磨耗量は28mm（磨耗係数=16.0×10<sup>-3</sup>）と許容磨耗量以下になる。また、砂礫層における特殊先行ビットの磨耗は、カッタービットの磨耗係数に対して初期磨耗で2.69倍、通常磨耗で2.15倍の磨耗係数が実績として報告されている。この磨耗係数をもとに、特殊先行ビットの磨耗量を推定すると66.4mmとなり、ビット磨耗限界

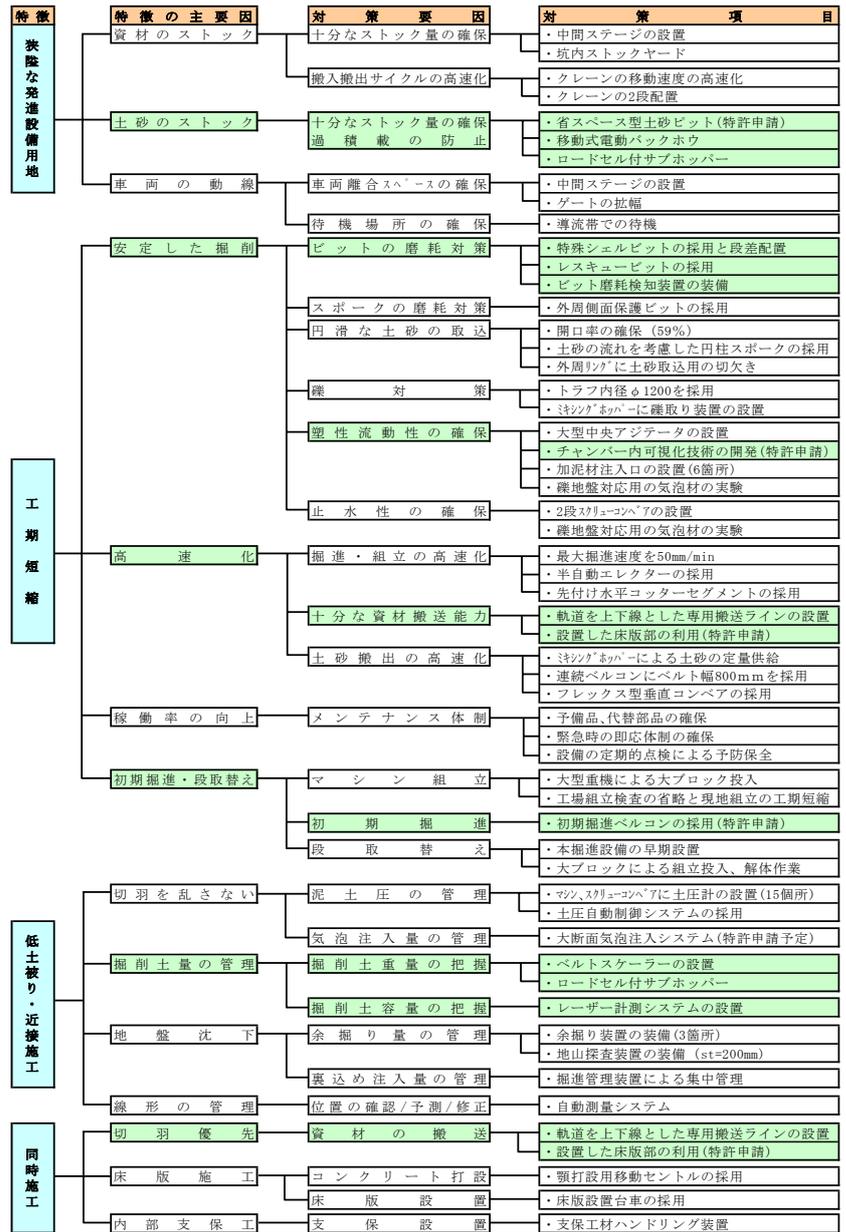


図-2 工事の特徴と対策

表-2 マシン仕様

項目	詳細項目	仕様
シールド本体	シールド外径	φ12,020mm
	シールド機長	11,200mm
	テールシールド	ワイヤレス耐圧型×3段
推進装置	シールドジャッキ	3,500kN×2450st×36本
	総推力	126,000 kN
カッター装置	単位面積あたり推力	1,110kN/m <sup>2</sup>
	スポーク本数	主スポーク6本+補助スポーク6本
	開口率	約59%
	支持方式	中間支持方式
	定格 (100%)	28,846kN-m (α=16.8)
	最大 (120%)	34,615kN-m (α=19.9)
	カッター回転数	0.456rpm
攪拌装置	余掘り装置	コベーカー-3基装備 (最大余掘り量150mm)
	中央部攪拌装置	回転式中央アジテータ: 羽根径φ4,200mm 回転トルク: 1,094/1,641 kN-m 回転数: 2.0/1.33rpm
	外周部攪拌装置	攪拌翼12本、固定翼4本
排土装置	形式	軸付スクリーンコンベア: φ2,000mm
	排土能力	約350m <sup>3</sup> /h (効率100%時) 0.7×7.0rpm
	排土可能礫径	φ420mm

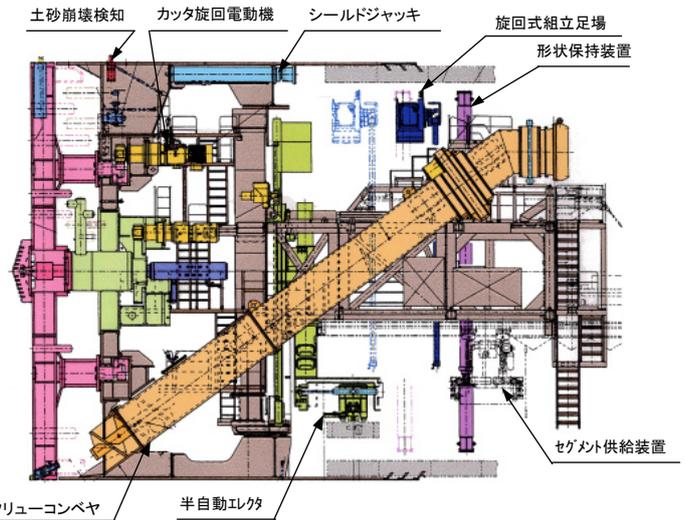
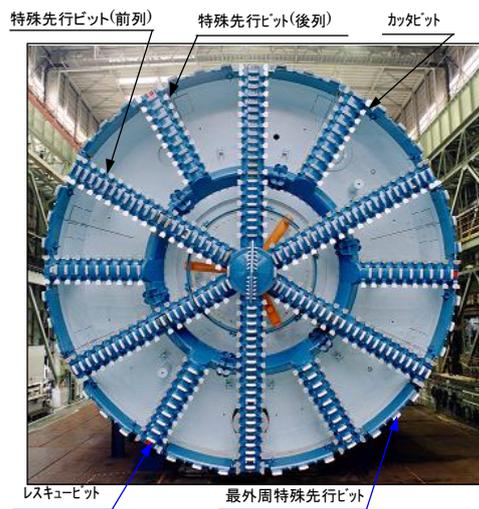


図-3 シールドマシン全体図

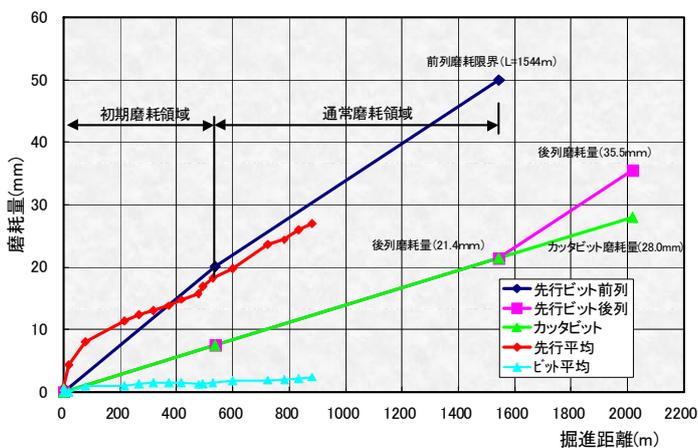


図-4 ビット磨耗予測と実績

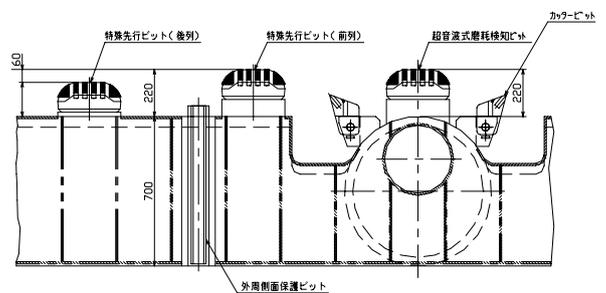


図-5 ビット配置図

50mmを超える結果となる。そのため、特殊先行ビットも前列・後列の段差配置にして対応した。

前列特殊先行ビット（以下、前列ビット）の磨耗限界までの掘削距離は1544m（磨耗係数=37.4×10<sup>-3</sup>）で、その後、後列特殊先行ビット（以下、後列ビット）での掘削となる。この間、後列ビットは、前列ビットに保護された状態にあるが、カッタービットと同様に土砂磨耗が予測され、前列ビットが磨耗限界に達した地点で21.4mm（磨耗係数=16.0×10<sup>-3</sup>）の磨耗が推定される。後列ビットが、この磨耗状態から掘削を開始すると、到達時の磨耗量は35.5mm（磨耗係数=37.4×10<sup>-3</sup>）と推定されるが、磨耗限界量50mmに対して約1.4倍の安全率を有している。

したがって、特殊先行ビットを段差配置とすることにより、ビット交換なしでの施工が可能となる。

ビットの磨耗量については、磨耗検知ビット（超音波式4セット）を装備し、常に磨耗量を把握するととも

に、最も磨耗が予想される最外周部については掘削外径を確保するために、レスキュービット（油圧機構による格納型伸縮カッタービット）を3箇所配置した。

#### 4. 土砂搬出設備

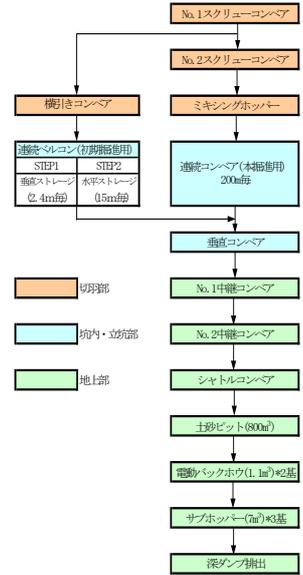
本工事は泥土圧式シールド工法の採用により、大量の掘削土砂を効率良く地上の土砂ストックヤードまで搬出する必要がある。表-3に土砂搬出設備について比較検討と搬出フローを示す。

土砂搬出の方法としてズリ鋼車、ポンプ圧送、泥水輸送等が考えられるが、設備の設置スペースの面からポンプ圧送が有力となる。しかし、大断面（φ10m以上）の場合、既存で最大能力の圧送ポンプを2系統設置したとしても掘進速度は2cm/min程度であり、礫地盤での管内閉塞、調達コスト等を考慮すると連続コンベアによる土砂搬出が最も効率的であり、コストの低減が図れる。掘削土砂の搬出フローは1・2次のスクリュ

表一 3 土砂搬出設備の比較と搬出フロー

比較項目	細目	連続ベルコン+VHC	圧送設備	泥水輸送
使用機械	主要機械	連続ベルコン 1基、VHC 1基	ワッシャー、圧送ポンプ10台、配管延長装置	混合槽、送・排泥ポンプ6台、バキューム、配管延長装置
	調達方法	・施工条件によって異なるが、汎用品としてはベルト幅610mmで、最大900mm幅があるが新規製作となる。	・配管系統が2系統であれば、調達可能であるが、搬送スピードは2cm/min程度となる。それ以上の搬送スピードまたは1系統とする場合は、新規製作となる。	・大断面用の泥水輸送ポンプの調達が可能である。
搬出性	搬出効率	・掘削土が潤滑のとれる状態であれば搬出効率が高いが、泥土状で潤滑が取れないと搬出効率が低下する。搬送は通常ベルト幅の1/3程度までは搬出可能である。	・掘削土砂の流動性が圧送に大きく影響する。搬送が一般に圧送シリンダー径の1/3以上であると、閉塞を起し易い。	・機軸の大きさは配管径の1/3程度であるが、排泥ポンプで閉塞を起こす可能性があるが、圧送の場合より少ない。
	搬出能力	・最近、山岳トンネルやTBM等で採用され始めているが、汎用品では搬出量180m <sup>3</sup> /hrで、最大では1000m <sup>3</sup> /hrのストレージカセットの設置が施工方法によって異なる。搬送スピードは最大は5cm/minが可能であり、掘削土砂の性状が良いほど搬出能力が高くなる。	・φ10m以上の実績は数件であるが、現状の圧送ポンプで最大80～100m <sup>3</sup> /hr（吐出圧3.4MPa～2.5MPa）であり、1系等での圧送が困難である。搬送スピードは2～2.5cm/min程度である。	・横断クラススの泥水輸送設備があることから、搬送スピードは最大4cm/minまでは可能であり、通過粒径φ120mmまで可能である。
施工性	地上設備	・省スペース化が図れる。	・省スペース化が図れる。	・地上に泥水処理設備が必要となる。
	坑内設備	・坑口付近にベルト延長装置が必要となる。	・中継ポンプ、配管延長装置が必要となる。搬送径φ50mm程度にするクラッシャーが必要となる。	・中継ポンプ、配管延長装置が必要となる。搬送径φ50mm程度にするクラッシャーが必要となる。
	初期掘進	・ベルト延長装置を本掘進時に設置するため、初期掘進長が長くなる。	・初期掘進長が長い。	・初期掘進長が比較的短い。
	段取り替え	・ベルト延長装置を本掘進時に設置する期間が必要となる。	・段取り替えが短くてすむ。	・段取り替えが比較的短くてすむ。
	トラブル要因	・常時ベルトの蛇行修正を心がけ、ベルトの損傷が無ければトラブル要因としては少ない。	・搬送径φ50mm以上になると、掘の噛み込みや送距離の増大により閉塞を起こしやすくなるうえ、効率が低下し交換が必要となる。	・φ200mm程度の機軸までは液体輸送できるが、閉塞の可能性がある。ウォータハンマー、排泥管の摩擦対策が必要。
	メンテナンス	・ベルト延伸作業が、200mごとに発生する。蛇行修正機構の交換が必要となる。	・ポンプの消耗品が発生するため、定期的に部品の交換が必要となる。	・ポンプの消耗品が発生するため、定期的に部品の交換が必要となる。
	騒音・振動	・ほとんど無いが、ベルトが乾いたあとの始動時に粉塵が発生する。	・圧送抵抗の増大により、衝撃音と振動が大きい。	・坑内での騒音、振動は少ないが、地上部において1度処理に用いられる振動機械で振動が発生する。
切羽の安定	・保持しやすい。	・保持しやすい。	・底土崩りでの切羽水圧の制御が難しい。	
実績	・山岳トンネルやTBMにおいて数件の実績があり、最近ではシールド工事で採用も増えている。	・非常に多い。	・土圧式での実績は小口径ではあるが、大口径では少ない。	
総合評価	◎	△	×	

注) 掘削事業は床版同時施工、立坑兼用、地上設備ヤードの面積等から条件的に困難であることから、検討項目から除外した。



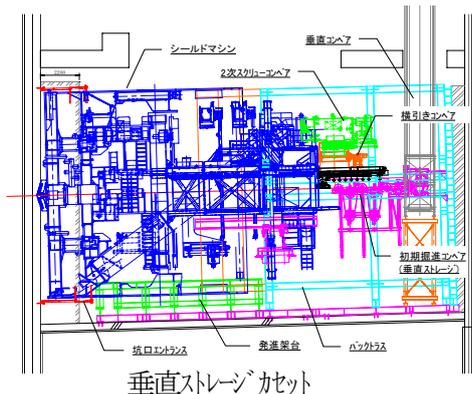
ーコンベアから定量供給機能と礫取装置を装備した(φ280mm以上)ミキシングホッパーにストックされて連続コンベアに投入される。連続コンベアは坑口部に200m連続搬出可能な水平ストレージカセットを設置し、ロードセル付のウインチでベルトテンションを制御しながら掘進と同期させてベルトの撒出しを行う。掘削土砂の垂直搬送は水平ベルト上の搬送物に積付ベルトを被せて密閉する構造で、高含水土の搬送にも対応可能な垂直コンベアを採用した。地上部は中継コンベア、シャトルコンベアを介して土砂ピット(800m<sup>3</sup>)にストックされ、電動バックホウ(1.1m<sup>3</sup>)でサブホッパー(7m<sup>3</sup>)に搬出後、計量されて深ダンプに排出される。表一4にコンベアの仕様を示す。

連続コンベアは初期掘進時から使用できることから、ベルトストレージ量を水平および垂直に自由に調整でき、本掘進にも適用できるレーシングジョイント

の初期掘進コンベアを開発し、実用化した。(特許申請中) 図一6に初期掘進用コンベアの発進時およびの水平ストレージカセット設置状況を示す。

表一 4 コンベアの仕様

項目	連続ベルコン	垂直ベルコン	No.1中継ベルコン	
コンベア機長	1992.2	13.6	98.4	
揚程	14	33.27	0.9	
搬送能力	560	420	420	
ベルト	ベルト幅	800	1200	1050
	ベルト張力	800	1250	250
	芯体	ナイロン	テトロン	ナイロン
	プライ数	4	6+1	2
	トラフ角	37.5		45
その他	ストレージ量	400m	波積高さ 280mm	
			有効幅 620mm	
駆動形式	形式	クademアロー	シグドライブチェーン	シグドライブチェーン
	制御方式	インバーター	インバーター	定速
	モーター	ドライブ: 90kW×2台 デジコン: 15kW	Fベルト: 75kW 平ベルト: 55kW	22kW
その他(安全装置他)	水洗クリーナー	各種クリーナー	各種クリーナー	
	各種クリーナー	逆転防止装置	ベルト速度検出器	
	ズリ詰り検出器	ズリ詰り検出器	引綱スイッチ	
	滑り検出器	ベルト速度検出器	蛇行検出器	
	ベルト速度検出器	引綱スイッチ		
	引綱スイッチ	蛇行検出器		
	蛇行検出器			



初期掘進用コンベア



水平ストレージカセット

図一 6 連続コンベア設置状況

## 5. 軌道設備

坑内の資材搬送は掘進作業と並行して道床部となる床版設置工事、連絡坑等の切開き部の補強を行う支保工設置工事（発注予定）を行うため、セグメント等の資材の他、PC 構造の床版、中壁、支保鋼材等を円滑にかつ切羽作業優先となるよう運搬を行う必要がある。

そこで軌道は、従来大断面シールドで採用されている枕木をトンネル中心に敷設する方法ではなく、トンネル下部に敷設してセグメント運搬専用の下半線とし、上半線は設置した床版をそのまま利用する床版、支保鋼材等の運搬専用線とした。（特許申請中）

図-7 に上下線の軌道路線図、図-8 に軌道の坑内断面図を示す。

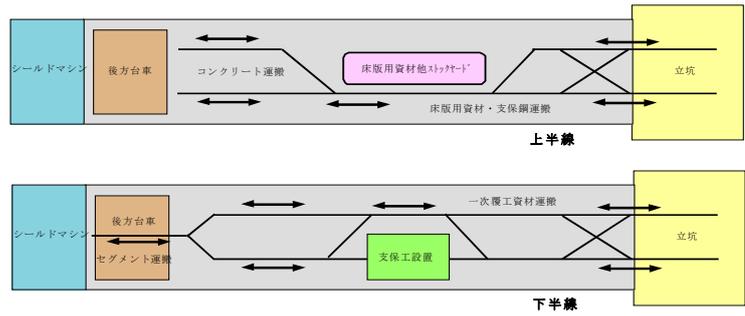


図-7 軌道路線図

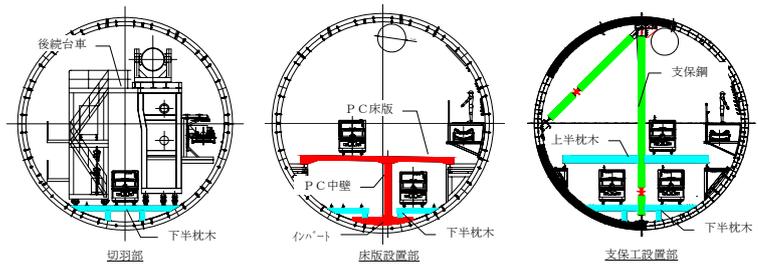


図-8 坑内軌道断面図

## 6. 地上設備

中継コンベア、揚重設備等の地上設備は山手通り上の防音ハウス内(長さ145m、幅22m、高さ16~20m)の半分を占有して納めた。セグメント等の資材は約8R分をストックでき、搬入及び投入用として天井クレーン(7.5t\*スパン9.3m)2基とその他資材用として天井クレーン(4.8t\*スパン9.3m)1基を設置した。プラント設備(裏込め注入・気泡注入設備)は土砂搬出設備(シャトルコンベア、電動バックホウ、土砂ピット)並びに変電設備と供用できる構台上に設置し、省スペース化を図った。図-9 に地上設備の設置概要図を示す。

## 7. 計測管理

### ①チャンバー内可視化装置

大断面の泥土圧シールドにおける塑性流動性の定量的な評価手法を確立するためにチャンバー内可視化装置を開発し(特許申請中)、導入した。これはチャンバー内に、電動回転式フラッパーをゲートバルブを開いて油圧ジャッキで挿入し、電動モーターで回転させて、各回転角度ごとの電流値(トルク値)を測定するものである。また、事前にモデル解析した計算値から逆解析することにより、最も回転トルクの高い位置を流れの方向とし、そのトルクから掘削土砂の粘性を推定し、チャンバー内の塑性流動状態の可視化を行う。図-10 に可視化装置を示す。

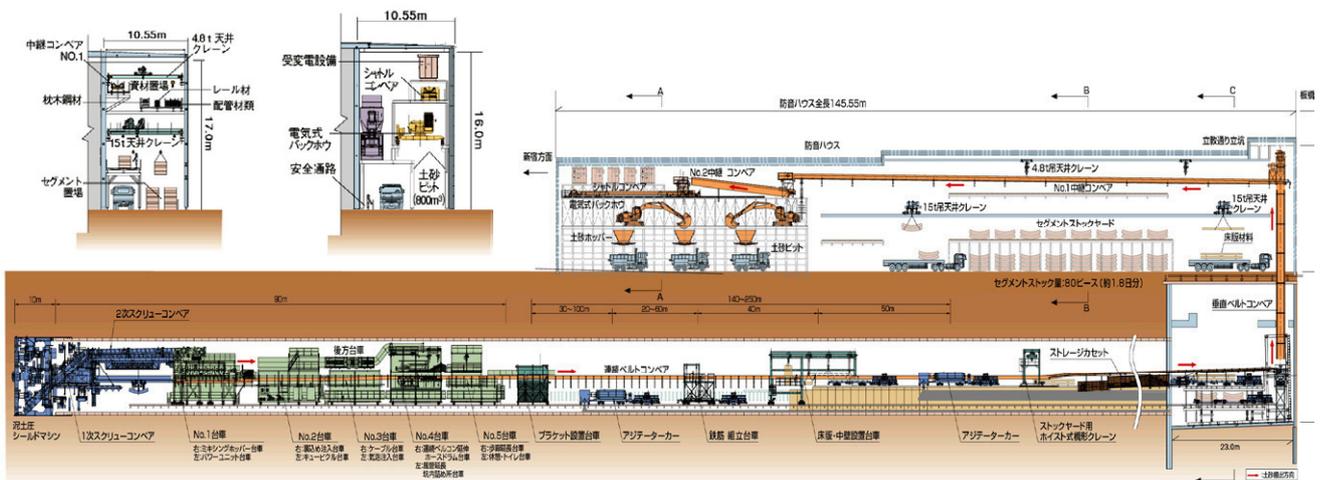


図-9 地上設備

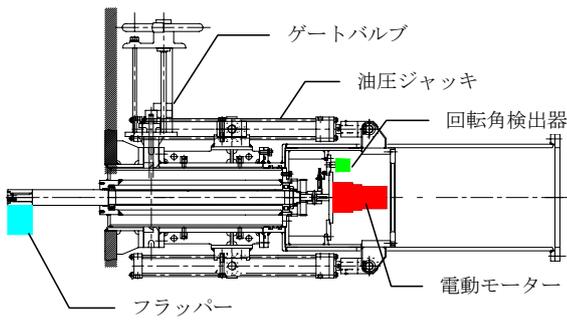


図-10 可視化装置

## ②土量計測

掘削土砂の土量は重量と容積を切羽に最も近い位置で計測を行い、地上でも場外への搬出で過積載とならないように再度重量の計測を行う。坑内での容積計測はレーザー光で連続ベルコン上に積載された土砂を測距し算出した断面積に、ベルト速度とスキャンタイムとの積から求める。重量計測は同様に連続ベルコン上の一定区間に積載された重量をロードセルで計量し、ベルト速度との積の総和で求める。計測の結果は毎リングの排土量に異常が無いかを、統計的管理手法を用いて管理している。図-11に計測システムの概要図を表-5に各計測システムの仕様を示す。

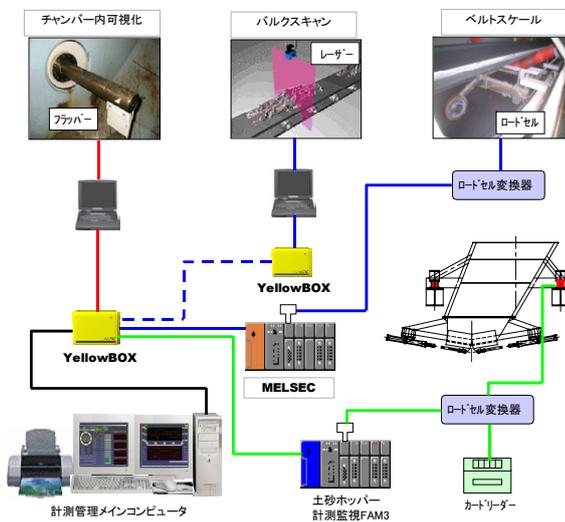


図-11 計測システム

表-5 計測システムの仕様

項目	ベルトスケール	土砂体積	土砂積載重量
型式	BW-802-DMS	BULKSCAN 200/210	KLM-10-4
メーカー	REMBE	SICK	川鉄アドミンテック
計測位置	連続ベルコン(No.2台車)	連続ベルコン(No.2台車)	サブホッパー
計測原理	ロードセル	レーザー伝播時間測定	ロードセル
検出箇所	1箇所	1箇所	4箇所
計量範囲	0~1000t/hr	0~600m <sup>3</sup> /hr	0~12 t
計測精度	±1/1000F.S	±0.5%	±1/100F.S
スキャンタイム	100msec	40msec	100msec

## 8. 施工実績

### ①ビット磨耗

ビットの磨耗状況については図-4より、初期磨耗領域で特殊先行ビットは約27mm、磨耗係数は $30.0 \times 10^{-3}$ となっており、当初予想していた初期磨耗量以内と考えられる。カッタービットは約2.4mmで、磨耗係数は $2.55 \times 10^{-3}$ となっており当初予想していた磨耗量より大幅に少なくなっている。これは特殊先行ビットによる先行切りの効果が大きく、カッタービットへの負担が軽くなっているものと思われる。

### ②掘進実績

初期掘進から現在(630R)までの掘進状況を図-12に示す。掘進速度は初期掘進時では15mm/min、本掘進時では23mm/minである。推力は管理土圧の上昇により増えてはいるが、平均で57100kNと装備推力の45%であり、前面抵抗以外の地山との摩擦抵抗の割合は46%程度となっている。また、カッタートルクは17700kNmと装備トルクの61%で、一般の泥土圧式シールドの実績からすると10%程度大きいと言える。これは礫

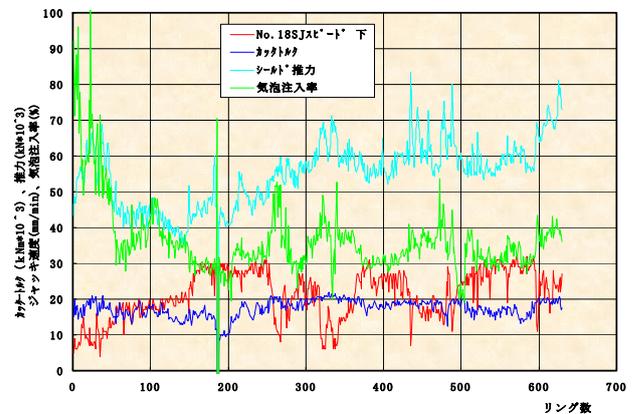


図-12 掘進管理データ

率が多いこととN値50以上の固結した江戸川層粘性土層 (Edc 層) が出現したためと考えられる。添加材となる気泡材の注入率は平均で33.6%であるが、250Rよりカッタートルクの上昇を押えるために高分子系の分散材を2%程度注入している。

### 9. おわりに

掘進延長のほぼ半分を終了したところであるが、同時作業として床版設置工事のほかに支保工設置工事も始まり、順調に掘進作業が進めば来年の4月末に掘進作業が終了する予定である。