

# 道路トンネル向け超大口径泥土圧シールド

## Super Large Diameter Muddy Soil Shield Machine for Road Tunnel

中 島 芳 人 ジャパントンネルシステムズ株式会社 エンジニアリング部  
勝 本 直 樹 ジャパントンネルシステムズ株式会社 エンジニアリング部

道路トンネル用超大断面のシールド掘削には、切羽保持の観点から、泥水シールド工法が多く適用されてきた。しかし、近年、切羽安定化技術の向上、作業用地確保および環境への配慮から、超大断面トンネルにも泥土圧シールド工法の適用が増加している。実績とともに、大深度（高水圧下）、長距離および高速施工に向けて、シールド機に対する技術向上の要求が高まっている。本稿では、IHIの超大口径泥土圧シールドへの取り組みを、東京都向け中央環状品川線シールドおよび大阪府、堺市向け都市計画道路大和川線シールドを例に挙げ、仕様と特徴を紹介する。

Slurry shield machine has been used mainly for super large diameter tunneling construction in terms of cutting face stability. But, recently, application of muddy soil shield machine is increasing for the super large diameter tunneling construction because of the advance of cutting face stabilization system, reservation of working place and consideration of environment. For the tunneling construction under high water pressure, the long distance and high speed application, high technology is required. IHI's approach and efforts for these hard requirements are introduced with characteristics and specifications of the Central ringed Shinagawa line shield and the city planning road, Yamatogawa line shield.

### 1. 緒 言

都市部のインフラ整備にシールド工法は広く採用されている。用途によってトンネル径はさまざまであるが、道路トンネル用の外径 12 m を超える超大口径シールドが、近年脚光を浴びている。

シールド工法は、都市部での施工となるため、経済性以外にも、作業用地の確保や周辺環境への影響を考慮する必要がある。このような観点から、泥土圧シールド工法の適用が増加している。泥土圧シールド工法は、シールド機のチャンバ内で掘削土砂を攪拌することによって、塑性流動化した泥土で切羽を保持しながら掘進する工法である。

掘削土砂の取り込みおよびチャンバ内の攪拌性能を向上させることが重要となるため、超大断面トンネルでの適用が少なかった。しかし、2003年にIHIが納入した首都高速向け中央環状新宿線の外径 12.02 m 泥土圧シールド機によって、その有効性が実証され、適用範囲の拡がりをみせている。

実績が増えるにつれて、発注者や施工者からは、超大口径シールド機に対してさまざまな技術的な要求があり、また、新技術への対応が求められている。主な技術的課題を以下に述べる。

#### (1) 大深度施工対応

#### (2) 長距離施工対応

#### (3) 高速施工対応

本稿では、上記のIHIの超大口径泥土圧シールドへの技術要求に対する取り組みを、中央環状品川線シールドおよび都市計画道路大和川線シールドで紹介する。

## 2. 品川線シールド

### 2.1 工事概要

中央環状品川線は、中央環状線（全長約 47 km）の南側部分を形成し、高速湾岸線から分岐した後、目黒川および環状第 6 号線（山手通り）の地下をトンネルで北上し、中央環状新宿線および高速 3 号渋谷線に接続する路線である。東京都品川区八潮一丁目地内（大井発進立坑）から目黒区青葉台四丁目地内（大橋ジャンクション）までの区間が結ばれる。平面路線図を第 1 図に示す。

工事名 中央環状品川線シールドトンネル工事 -2

施 主 東京都

施工者 大成・大豊・銭高建設共同企業体

### 2.2 工事の特徴

本工事の特徴を以下に示す。

(1) 超大断面トンネル：外径 12.53 m 泥土圧シールド

(2) 超長距離掘削：7 967 m

(3) 高速施工：同時掘進



第1図 品川線シールド 平面路線図  
Fig. 1 Flat route of Shinagawa line shield

- (4) 大深度（高水圧下）施工：土被り 47.9 m (0.5 MPa)
- (5) 発進部高強度壁切削：NOMST 壁（高強度壁）切削
- (6) 上総層粘性土地盤掘削：N 値（標準貫入試験値）50 以上の硬質地盤

### 2.3 シールド機に求められる要素

本工事の特徴からシールド機に求められる要素（技術）を以下に示す。

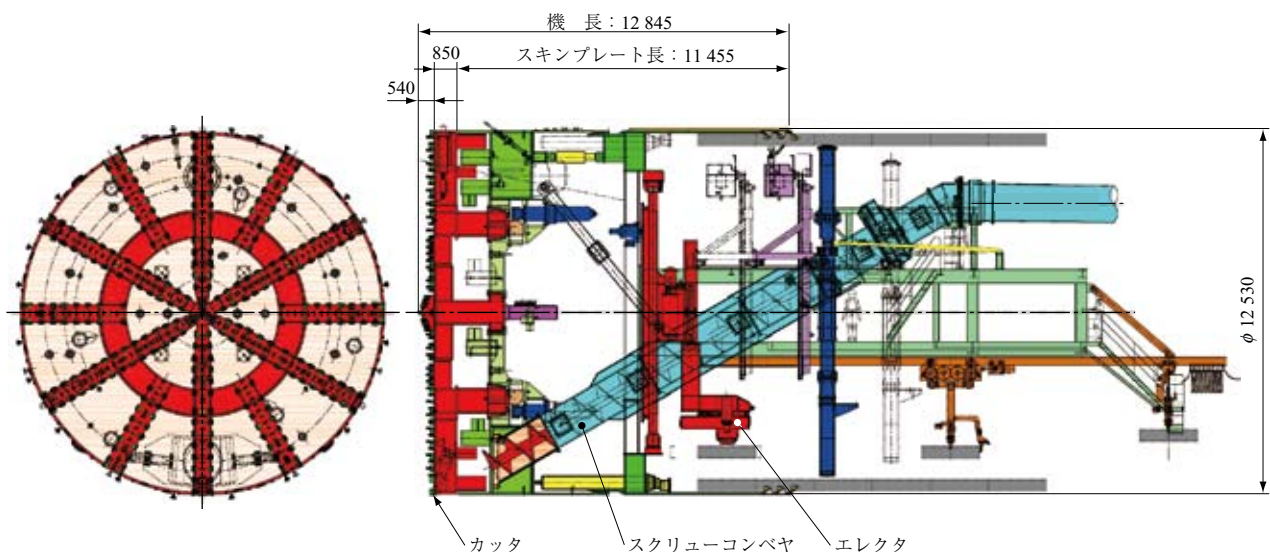
- (1) 超長距離に対する耐久性
- (2) 高水圧下施工での耐水性
- (3) 工期短縮（高速施工）への能力・性能
- (4) 発進部高強度壁掘削への対応能力
- (5) 硬質粘性土地盤掘削への対応能力

### 2.4 シールド機の仕様と特徴

シールド機の全景を第2図に、全体組立図を第3図に示す。シールド機的主要仕様を以下に述べる。



第2図 品川線シールド シールド機全景  
Fig. 2 Full view of Shinagawa line shield



第3図 品川線シールド 全体組立図（単位：mm）  
Fig. 3 General arrangement of Shinagawa line shield (unit : mm)

外 径	12 530 mm
機 長	12 845 mm
シールドジャッキ伸長速度	66 mm/min (全数作動時)
シールドジャッキ	3 000 kN × 3 050 mm × 60 本
総推力	180 000 kN (単位面積当たり推力 1 460 kN/m <sup>2</sup> )
カッタ駆動電動機	90 kW × 6 P × 400 V × 21 台 (電動機はインバータ制御)
カッタトルク	最大 34 944 kN・m (トルク係数(カッタトルクを外径の3乗で除した値) $\alpha = 17.7$ )
カッタ回転数	最大 0.82 rpm
中折れ装置	左右 2.0°, 上下 0.5°
中折れジャッキ	3 000 kN × 3 050 mm × 60 本
スクリーコンベヤ	外径 1 200 型 (1 次・2 次装備)
エレクタ	空中受渡方式半自動エレクタ
同時掘進	掘進とセグメント組立の同時施工

施工条件に対して配慮した特徴を以下に述べる。

#### 2.4.1 高水圧下での超長距離掘削 (7 967 m)

##### 2.4.1.1 カッタビットの耐久性向上

カッタ外周部はしゅう動距離が大きくなるため、カッタビットの耐久性が必要となる。また、本工事は IHI が納入した中央環状新宿線の外径 12.02 m 泥土圧シールドと比べて掘削距離が約 4 倍となるため、以下の対策を実施した。

##### (1) E3 種超硬チップの採用

超長距離施工に対してはカッタビットの耐摩耗性が必要となり、ビット先端部の超硬チップ(タンダステンカーバイト焼結金属)の硬さが要求される。このため、本工事では E3 種超硬チップ(通常用いられる E5 種より硬い材質)を採用し、ビット単体の耐久性を向上させた。

##### (2) 高低差配置の採用

ビット単体の耐久性向上に加え、ビット全体の許容摩耗量を大きくするため、強化型先行ビットの超硬チップ高さを大きくするとともに、先行ビットおよびメインビットにそれぞれ高低差配置を採用した。

##### (3) 2 重ビットの採用

想定以上の摩耗が生じた場合にも掘削ができるように、2 重ビットを採用した。2 重ビットは大成建設株式会社と IHI が共同開発した技術である。

2 重ビットは外側の 1 次ビットを内側の 2 次ビットに、包み込むように重ねさせたビットである。シールド機での掘削初期は外側の 1 次ビットで地山を切削する。掘削が進むにつれ 1 次ビットの頂部が摩耗してしまうと、1 次ビットが分離され、内側の 2 次ビットが現れ地山を切削する。ビットの延命化技術である。本技術によって、2 次ビットが完全に摩耗するまでの長距離掘削が可能となる。ビット交換のための中間立坑の構築や地盤改良などが不要となり、ビット交換で掘削作業を止める必要がないため、工期短縮となる。これまでに 2 件の試験・実証施工を行い、1 件の実機適用に至っている。品川線シールドの 2 重ビットの取付状況を第 4 図に、2 重ビットの 1 次ビット掘削から 2 次ビット出現までのメカニズムを第 5 図に示す。

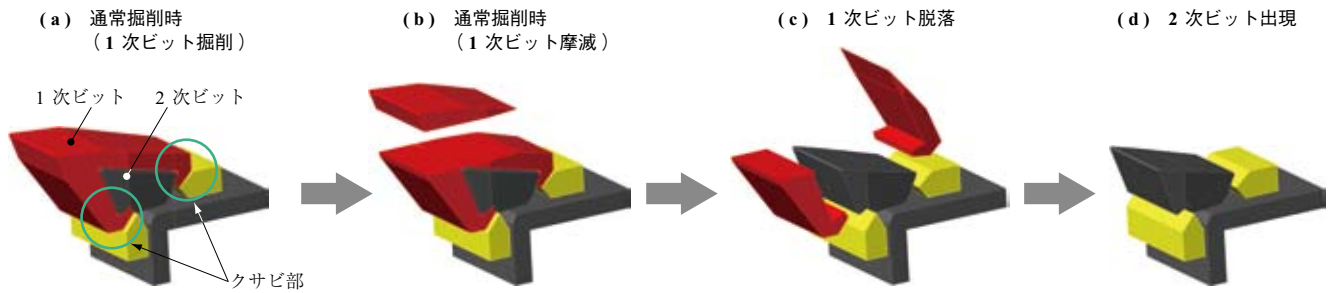
(a) 2 重ビット



(b) 2 重ビット (取付状況)



第 4 図 2 重ビット  
Fig. 4 Double bit



第5図 2重ビット 新ビット(2次ビット)出現メカニズム  
Fig. 5 Mechanism of new bit appearance

#### 2.4.1.2 カッタ駆動部の耐久性向上

硬質粘性土地盤での掘進速度を確保するため、カッタ回転数をこれまでの超大口径シールドに比べ約2倍に設定し、以下の対策を実施した。

##### (1) カッタ軸受の耐久性向上

カッタ軸受は3列3輪ローラ軸受を採用し、長距離対策として十分な安全率をもつもの(想定使用時間に対し約4倍の寿命)とした。

##### (2) 土砂シールの耐久性向上(高水圧下対応)

カッタ駆動部における土砂シールの高水圧下での耐久性向上のため、以下の対策を実施した。

- ①コーナシール2段+リップシール4段の採用
- ②耐熱性が高く柔軟性のある材質NBR(ニトリルゴム)の採用
- ③各シール間に個別に、連続してグリースの給脂が可能な構造の採用
- ④シールしゅう動面への冷却機構の装備と温度管理の徹底
- ⑤シールしゅう動面の材質に摩耗の小さい高張力鋼を採用

#### 2.4.1.3 排土装置の耐久性向上

国内最大級の超大口径泥土圧シールドであるとともに、高速施工の要素も加わるため、時間当たりの排土量はこれまでに実績のないものとなった。スクリーコンベヤは、時間当たりでシールド機掘削排土量の1.5倍を排土することが可能なフライト外径1200mmの大型スクリーコンベヤを採用した。スクリーコンベヤの耐久性向上対策として以下を実施した。

- (1) スクリーケーシング内面の先端部に耐摩耗性鋼板を貼り付ける。
- (2) スクリーフライト外面の先端部に耐摩耗性鋼板を貼り付ける。
- (3) スクリーコンベヤ先端のバルクヘッド部にスラ

イド機構のゲートを取り付け、摩耗時の補修・交換が可能な構造とした。

#### 2.4.2 高強度壁・硬質粘性土掘削

##### 2.4.2.1 カッタヘッド

##### (1) カッタスポーク本数・形状

カッタは外周部12本、内周部6本のスポークから構成され、全断面から一様に掘削土砂を取り込めるようにし、開口率を68%と大きく設定することで、掘削土砂の取り込み性の向上を図った。本工事では掘削する土質が硬質粘性土で粘着力が強く、カッタビットやチャンバ内に付着して、掘削に悪影響を与える可能性がある。このため、カッタスポークは構造上採用可能な箇所は丸型スポークを採用するとともに、カッタスポーク背面部には練り混ぜ翼を配置し、カッタやチャンバ内での土砂の付着防止と攪拌効果を高めた。また、チャンバ内の土砂流動性向上のため、カッタに添加剤注入用の注泥口を13か所設置した。

##### (2) ビット配置

硬質粘性土は掘削時に細かく切削してしまうとチャンバ内で練り混ぜられ、付着性が高くなることから、掘削土砂を一定の大きさに切削し、チャンバ内から効率良く排出することが重要となる。このため、ビット配置は、まず先行ビットで溝状の掘削を行い、続いてティースビット(切削した土砂をチャンバ内に取り込むメインカッタビット)で溝間を切削することによって、効率良く一定形状の状態で行断切削させる配置を採用した。また、マシン発進部に設置されたNOMST壁の切削対策として、先端を鋭利にして切削能力を高めた強化型先行ビットを装備した。

#### 2.4.3 高速施工

##### 2.4.3.1 同時掘進

従来のシールド工法はセグメント1リング分を掘進完

了後、シールド機を停止し、セグメントの組立を行う。これに対して、同時掘進はシールド機による掘進とセグメントの組立を同時に行うことによって、施工時間の短縮を実現するものである。

同時掘進には単胴式と複胴式があり、本工事は IHI として実績のある単胴式を超大口径泥土圧シールドに対して初めて採用した。

### 2.4.3.2 セグメント組立

#### (1) エレクタ

セグメントの組立には、作業の安全性と組立精度の向上および組立時間の短縮が求められる。

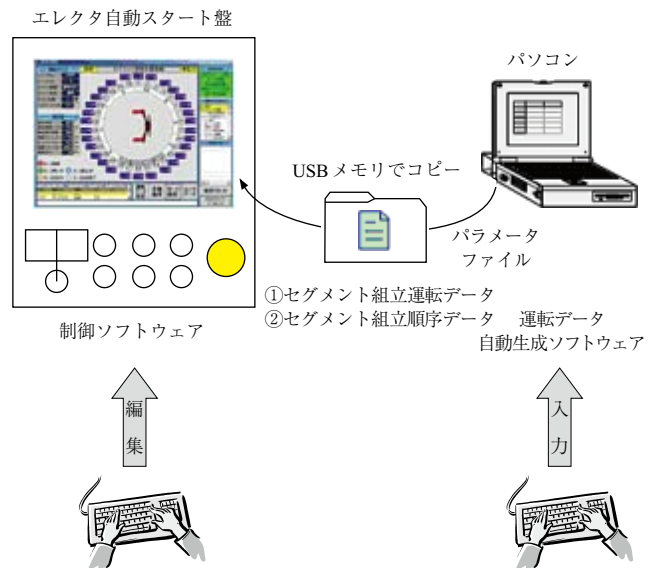
本工事では組立時間の短縮のため、RC（鉄筋コンクリート）セグメント把持から位置決め微調整まで、そのほかの種類セグメントはセグメント把持からおおよそその位置決めまでを行う半自動エレクタを装備した。セグメントの組立精度を確保するため、① 旋回動作 ② 伸縮・しゅう動動作 ③ 既設セグメントとの傾きを調整するためのローリング、ピッチングおよびヨーイング機構、をもち、微速で旋回方向に作動する旋回微調整制御を装備した。また、2次ホイストから直接エレクタにセグメントを受け渡す、空中受渡方式によるセグメント供給方式を採用した。

#### (2) 制御システム

従来の半自動エレクタ制御システムは、セグメントの種類・幅および形状をどのように組み立てるかという予定を数リング先まで入力しておき、実際に組立を行う直前に制御ソフトウェアのなかでセグメントの組立位置の角度計算を行っていた。しかし、このシステムではセグメントの種類や組立順序の変更が生じると、そのたびに制御ソフトウェアの変更が必要となる。本工事ではこれまでに実例がないほどセグメントの種類が多いため、現地での実際の施工においてセグメントの組立順序が変更される可能性も考えられた。したがって、このような事態に対応するため、組立角度の計算までをすべてオフラインで別のパソコンを使用して計算し、計算結果を制御ソフトウェアに受け渡す方式を採用した。組立運転データの設定方法を第6図に示す。

### 2.4.4 大深度（高水圧下）における高速施工

大深度施工における課題として装備推力の検討が必要である。高水圧下での施工であるため、装備推力は所要推力計算から算出した結果と、同時掘進時に必要な方向制御が可能な推力を考慮し決定する必要があった。



第6図 組立運転データ設定方法  
Fig.6 Set-up method of operation data

シールドジャッキ制御パターンの一例を第7図に示す。掘進中にセグメントを組み立てる場合、セグメントの組立スペースを確保するため、シールドジャッキを縮めることによって、推進方向のモーメントバランスが崩れ（第7図-(b)）、シールド機を方向制御することができなくなる。このため、同時に掘進動作ができるようにシールドジャッキの負荷圧を三通りの圧力で制御し、シールド機の姿勢を保持するシステムを採用した。

三通りの圧力は、それぞれ、負荷圧、右制御圧および左制御圧とし、負荷圧は、シールド機が掘進する際に地山から受ける圧力で決定される。右制御圧と左制御圧は、同時掘進制御のモーメント方向を“0”（直進）で掘進する計算から算出された圧力に設定する。これによって、シールド機の姿勢制御（モーメント制御）を行い、姿勢を保持する。各セグメントピース組立時における方向制御検討結果の一例を第8図に示す。

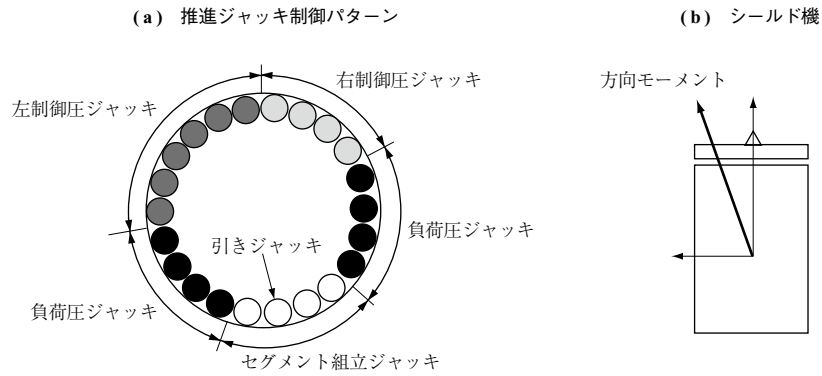
### 2.5 経過

2009年9月から現地組立を開始し、12月18日に発進した。2010年2月22日にセグメントを125リング掘り進めて終了し、本段取替えに入った。3月22日から本掘進を開始した。

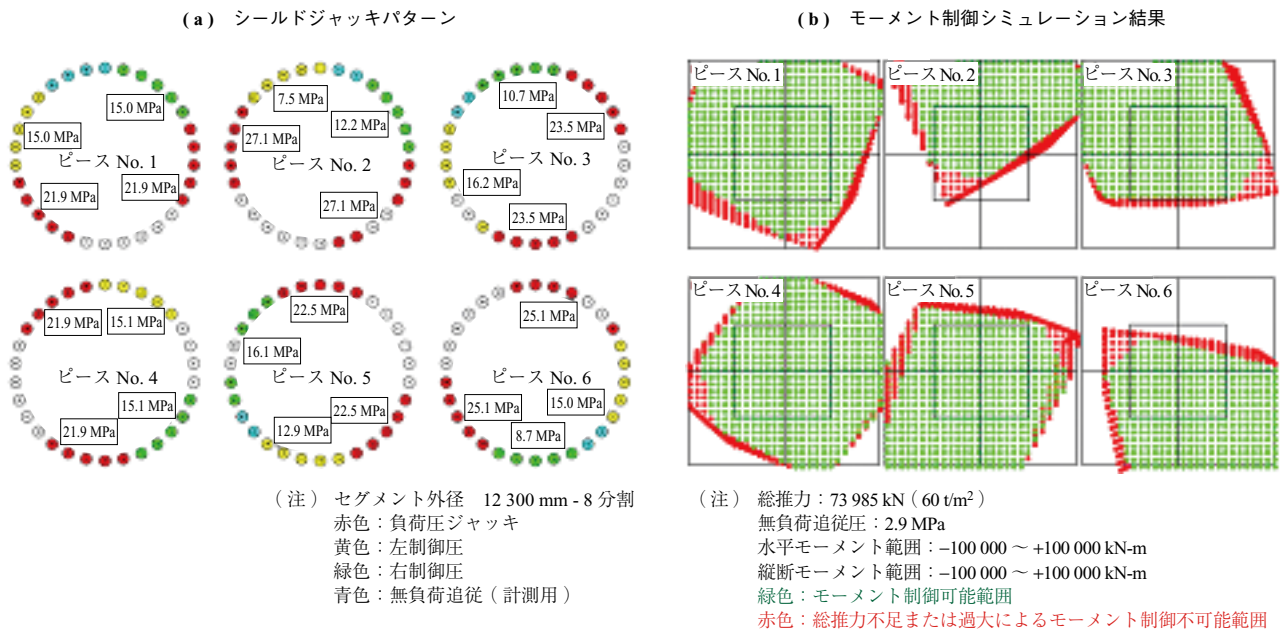
## 3. 大和川線シールド

### 3.1 工事概要

都市計画道路大和川線は、大阪府堺市4号湾岸線から分岐し、15号堺線と交差して最終的に14号松原線に直結する、東西に走る予定の道路である。約10kmを高架部



第 7 図 シールドジャッキ制御パターン (一例)  
Fig. 7 Control pattern of shield jack (An example)



第 8 図 方向制御検討 (一例)  
Fig. 8 Direction control study (An example)

や、開削工法とシールド工法によって構築されるトンネル部で構成される。IHI が納入するシールド機による工事は、堺市北区常盤町から松原市天美北までの約 1.9 km の並列トンネルを 1 台のシールド機を転回 (U ターン)・移動して、構築する工事である。平面路線図を第 9 図に示す。

工事名 都市計画道路 大和川線シールド工事  
 事業者 大阪府・堺市  
 施工者 大鉄工業・吉田組・森組・紙谷工務店  
 共同企業体

### 3.2 工事の特徴

本工事の特徴を以下に示す。

- (1) 超大断面トンネル：外径 12.54 m 泥土圧シールド
- (2) 超長距離掘削：3 767.946 m

- (3) 高土被り (高水圧下) 施工：  
土被り 30 m (0.3 MPa)

- (4) 発進部および到達部高強度壁切削：  
NOMST 壁 4 回切削

- (5) U ターン施工：2 回

- (6) 複合地盤 (砂れき, 粘性土, 砂質土) 掘削

### 3.3 シールド機に求められる要素

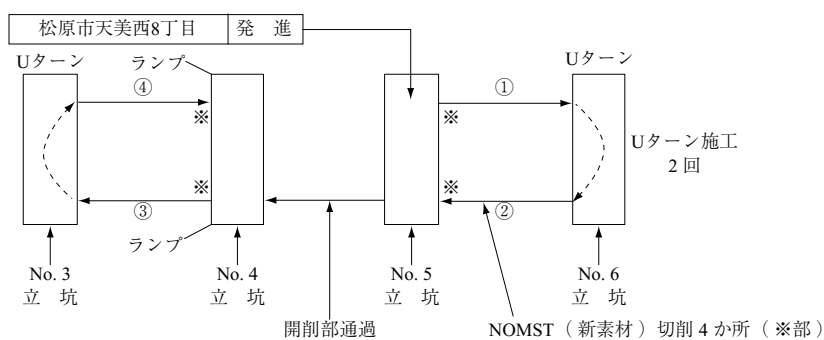
本工事の特徴からシールド機に求められる要素 (技術) を以下に示す。

- (1) 超長距離に対する耐久性
- (2) 高水圧下施工での耐水性
- (3) 発進部および到達部高強度壁切削対策への対応能力
- (4) U ターン施工への対応能力

(a) 平面路線図



(b) 平面イメージ図



第 9 図 大和川線シールド 平面路線図  
Fig. 9 Flat route of Yamatogawa line shield

(5) 複合地盤（砂れき，粘性土，砂質土）掘削への対応能力

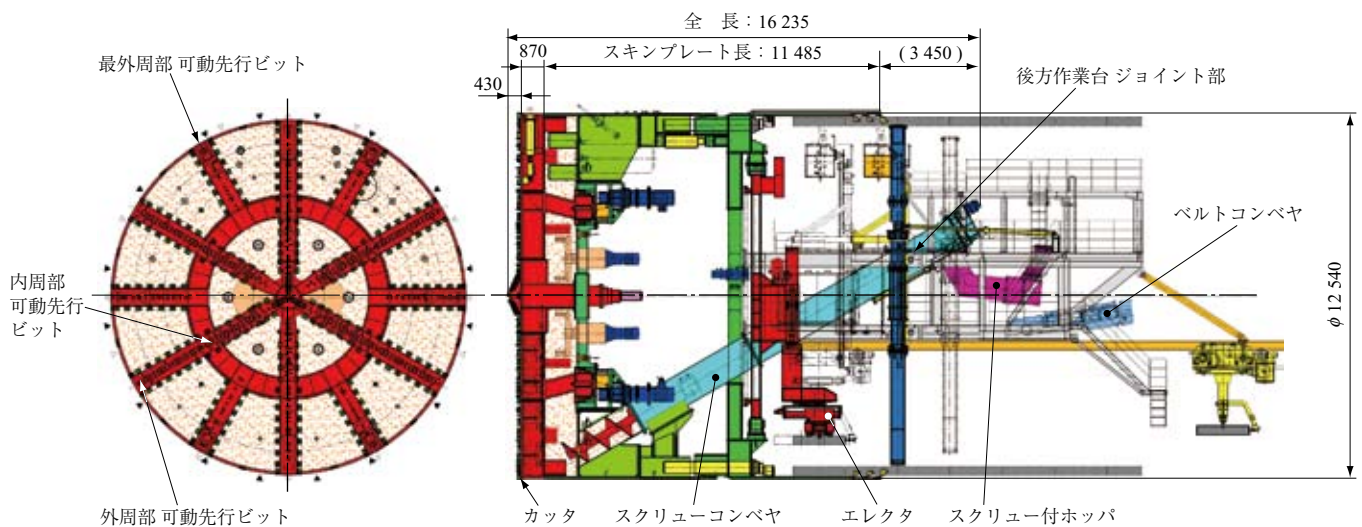
### 3.4 シールド機の仕様と特徴

シールド機の全景を第 10 図に，全体組立図を第 11 図に示す。シールド機的主要仕様を以下に述べる。

- 外径 12 540 mm
- 全長 16 235 mm
- シールドジャッキ伸長速度 50 mm/min (全数作動時)
- シールドジャッキ 3 000 kN × 2 550 mm × 48 本
- 総推力 144 000 kN (単位面積当たり推力 1 166 kN/m<sup>2</sup>)



第 10 図 大和川線シールド シールド機全景  
Fig. 10 Full view of Yamatogawa line shield



第 11 図 大和川線シールド 全体組立図 (単位: mm)  
 Fig. 11 General arrangement of Yamatogawa line shield (unit: mm)

#### カッタ駆動電動機

55 kW × 4 P × 440 V × 25 台

カッタトルク 最大 39 132 kN・m (トルク係数  
 $\alpha = 19.7$ )

カッタ回転数 最大 0.4 rpm

中折れ装置 左右 2.0°, 上下 0.5°

中折れジャッキ

3 000 kN × 500 mm × 40 本

スクリーコンベヤ

外径 1 000 型

エレクタ 空中受渡方式半自動エレクタ

施工条件に対して配慮した特徴を以下に述べる。

### 3.4.1 複合地盤掘削

#### 3.4.1.1 カッタヘッド

##### (1) カッタスポーク本数と形状

カッタは外周部 12 本, 内周部 6 本のスポークから構成され, 開口率を 61% と大きく設定することで, 掘削土砂の取り込み性の向上を図った。内周スポーク間のつなぎ材にテーパを設けることによって, 土砂の流動性向上と, チャンバ内周部への効率の良い土砂の取り込みを図った。

##### (2) カッタビットの耐久性向上

本工事ではれきの発生が予想されることから, れきに対する欠損防止と粘性土に対する切削性を考慮し, カッタビットのチップ材質はじん性の高い E5 種超硬チップを採用した。

#### 3.4.1.2 排土装置

##### (1) スクリューコンベヤ

排土装置はフライト外径 1 000 mm のスクリーコンベヤとし, スクリューコンベヤ内の止栓効果によって, 止水性が向上するシャフト式を採用した。なお, 止栓効果の確認用として, スクリューコンベヤ中間部 3 か所に土圧計を装備した。

##### (2) 棒ゲートの装備

複合地盤の掘削において, 想定外のれきの出現にも対応できるように, スクリューコンベヤ排土シュート口付き土砂ホッパに棒ゲートを装備した。ゲートジャッキがれきのかみ込みなどで閉じることができなくなる非常時に, 掘削土砂の機内流入を確実に防止した。スクリーコンベヤ土砂ホッパを第 12 図に示す。



第 12 図 大和川線シールド スクリューコンベヤ土砂ホッパ  
 Fig. 12 Dirt hopper attached to screw conveyor of Yamatogawa line shield



### 3.4.1.3 攪拌装置（アジテータ）

チャンバ内周部の土砂の付着防止と攪拌性の向上を考慮し、高速で回転するアジテータを2基装備した。

### 3.4.2 NOMST 壁切削

本工事では工期短縮と工事費縮減のため、NOMST工法が採用されている。NOMST工法は立坑の壁に新素材コンクリートを用いることで、直接カッタで切削・開口することができる。本工事ではNOMST壁の切削が4か所必要となり、切削性能を確保するためのカッタビットの対策が必要となる。

発進部および到達部 NOMST 壁の切削対策として、NOMST 壁の切削用先行ビットを 75 mm ピッチで装備した。先行ビットが摩耗によって、到達部で先行ビットとしての機能を果たせなくなる可能性がある。そこで地山方向に油圧で押し出すことができる可動先行ビットを最外周部に4基、外周部および内周部に8基装備し、到達部の NOMST 壁を切削する前に一時的に押し出すことで、先行ビットとして機能させた。可動先行ビットを第13図に示す。

### 3.4.3 超長距離掘削（3 767.946 m）

#### 3.4.3.1 カッタビット

##### (1) 高低差配置の採用

砂れきを含む互層地盤を超長距離（3 767.946 m）にわたって掘削するため、激しいビットの摩耗が予測される。カッタビットの寿命向上のため、先行ビットとメインビットを装備し、両ビットに高低差を設けて配置した。

##### (2) ピン取付構造の採用

本工事では、掘削約1 kmごとにシールド機が立坑に出てくるため、カッタビットの摩耗状態を確認することができる。ビット摩耗時に交換が容易にできるように、カッタ外周部および最外周部のメイン

ビットはピン取付構造とした。

#### 3.4.3.2 エレクタ

工期短縮のため、長距離化は施工技術の高速化が必要である。高速施工の手法としては、品川線シールドで採用した、掘進とセグメント組立を同時に行う同時掘進の方法と、掘進とセグメント組立のサイクルタイム自体を短縮する方法がある。本シールド機では後者を採用した。以下の方法でサイクルタイムの短縮を図った。

- (1) 半自動エレクタの装備
- (2) シールドジャッキ引き速度の高速化
- (3) 自動空中受渡方式によるセグメント供給システムの採用

#### 3.4.4 Uターン施工

Uターン施工は、摩擦抵抗を低減させる目的から、多数の鉄球を配置した受け台にシールド機を搭載して、受け台と一緒にシールド機の方向を変える方法で行う。Uターン施工対策として、以下を実施した。

##### (1) 後方作業台の分割を容易にする構造の採用

Uターンを行う立坑の寸法の制約によって、後方作業台の後部を取り外す必要がある。後方作業台の前後ジョイント部の取合部をピン構造とし、後方作業台の後部をワンタッチで取り付け、取り外し可能な構造とした。従来の構造（ボルト＋溶接）に比べて、脱着に要する時間を減らし、工期の短縮を図った。後方作業台のジョイント部を第14図に示す。

##### (2) 後続台車長の低減

Uターン施工時の段取替え作業を減らすため、シールド機の運転に必要な制御盤などの機器類を、シールド機内および後方作業台に搭載し、後続台車の長さや数量を低減した。

(a) 最外周部 可動先行ビット



(b) 外周部 可動先行ビット



第13図 大和川線シールド 可動先行ビット  
Fig. 13 Movable precedential bit of Yamatogawa line shield



第 14 図 大和川線シールド 後方作業台 ジョイント部  
Fig. 14 Joint of back work place of Yamatogawa line shield

### 3.5 経 過

2010 年 2 月に工場でのシールド機組立と完成検査を無事終了した。シールド機解体後、6 月に現地投入を開始する予定である。

## 4. 結 言

本稿では、中央環状品川線シールド、都市計画道路大和川線シールドを中心に、IHI の超大口径泥土圧シールドの取り組みについて述べた。本工事は、シールド工事のさらなる大深度化、長距離化および高速施工を展望する工事となる。施工のフォローを確実に実施して、トンネル建設の技術を蓄積し、日々高まるシールド技術への要求の実現に向けて、努力していきたい。

## — 謝 辞 —

超大口径泥土圧シールドの設計・製作に当たって、多数の施主、施工者、関係各社および関係各位の多大なるご指導とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。