



都市部の地下空間の有効活用に貢献する多種多様なシールドマシン 複雑化する制約条件やニーズに対応した特殊機械・施工方法

西 淵 雅 之

都市部ではその発展に伴い、生活に必要なインフラ設備である電気・ガス・上下水道・通信・道路・鉄道等の整備のために地下空間が有効活用されてきた。トンネルといえば古くより、山岳部での最短経路を結ぶものなども数多く構築されてきているが、都市部のトンネルは、「過密な地上部の回避」のための地下空間の活用を目的としており、(大深度地下を除き)地上部との関係も無視できないことから、近年では制約条件や施工に求められるニーズは複雑化してきている。本稿では、各種制約条件やニーズに対応する特殊なトンネル掘進機(シールドマシン)を紹介する。

キーワード：トンネル，シールド工法，立坑，長距離施工，高速施工，支障物切削，非円形断面

1. はじめに

トンネル構築技術である「シールド工法」は、1800年代前半のイギリスでの施工事例から発展してきたものであるが、当初の適用機械は、トンネル外周部の地山の崩落に対する「盾」を主な機能とし、切羽側(切羽側)の安定を機械的・システムの的に制御しているものではなかった。

これに対し、日本国内では1960年代後半から1970年代前半にかけて、現在のシールド工法の主流である密閉型機械式(泥水式/泥土圧)の技術が確立された(図-1)。密閉型機械式とは、シールドマシン内に隔壁を設けて、切羽側とトンネル側(マシン内)を区切って密閉することで、切羽側の圧力や排土量を管理・制御しながら掘進できる機械であり、圧気等を併用せずに、切羽の崩落を防止し、安全・確実に施工できることから、近年の都市部のトンネルの大半は密閉型機械式シールドで施工されている。現在、一般的に「シールドマシン」といえば、密閉型機械式を指すことが多いため、本稿では、「シールドマシン=密閉型シールド」として記述する。

標準的な円形シールドマシンは、約 $\phi 2\text{ m}$ から $\phi 17\text{ m}$ 程度までの各種直径の実績が多数あり、代表的な施工例の東京湾アクアライン($\phi 14.14\text{ m}$ シールドマシンで施工)は木更津の人工島「海ほたる」に設置されている「カッターヘッド(切羽を切削する円盤)のモニュメント」も、シールド工法を広く一般に認識させるものとなっている(写真-1)。

アクアラインに代表されるような大口徑シールドは、1990年前後には主要な技術が確立されたが、これと並行して、都市部の複雑な制約条件に対応する特殊なシールド工法やシールドマシンが数多く開発されてきている。

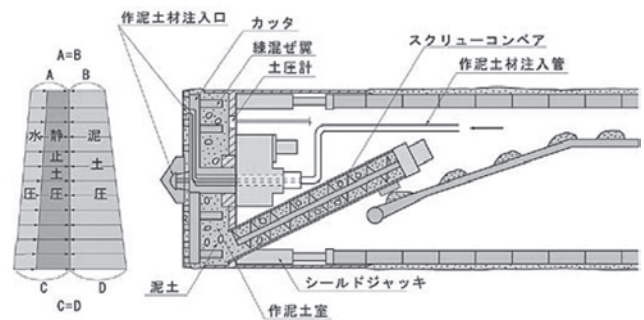


図-1 泥土圧工法 原理図



写真-1 カッターヘッドのモニュメント(海ほたる)

2. 都市部のトンネル工事へのニーズ

近年の都市部の工事では、各種制約条件に対応すべく、以下のような各種ニーズが高まっている。

①大深度化

未使用空間の活用。地上や近隣設備への影響低減。

②長距離化

立坑用地確保の問題解消。トータル施工費の低減。

③大断面化

大規模な地下空間の有効活用。

(高速道路、高速鉄道、地下調整池等での利用)

④高速施工化

施工コスト低減。近隣地域への負荷(騒音、立坑用地占有、資材搬入等)影響期間の低減。

⑤施工管理の高度化・自動化

人手不足・技能継承への対策。周辺地山や地上部への影響(沈下、騒音等)の防止、低減。

多様化したニーズは複合的にも要求され、それらに対応する特殊シールドマシンを次項以降で紹介する。

3. 立坑を省略できる特殊シールドマシン

一般的なシールド工法では、トンネル両端部に「立坑」を構築し、発進側の立坑(以下、発進立坑)の下部からシールドマシンを発進させ、場合によっては途中の「中間立坑」を通過して、到達側の立坑(以下、到達立坑)まで掘り進めた後、到達立坑側でマシンを解体(または回収)してトンネルが貫通する。都市部での立坑用地の確保の問題や、工事費低減ニーズに対応するために、立坑の設置を省略できるような各種シールドマシンが開発されてきた。

(1) 機械式地中接合シールドマシン

トンネル両端の発進立坑から各1台のシールドマシンを発進させて、両側から掘り進めたトンネルを途中で接合させることで、到達立坑が不要な長距離トンネルを構築することができる。ただし都市部のシールド工事の多くでは、地山に自立性がなく、さらに高水圧下での「切羽を開放(露出)した上での土木的施工」は危険を伴うことから、機械同士を安全に接合できる特殊構造の「機械式地中接合マシン」が開発され、多数の施工事例がある。

写真-2及び図-2は、MSD(Mechanical Shield Docking)工法用シールドマシンの一例を示す。接合地点まで掘進した2台のうち、一方(押出側:右)から接合用貫入リングを押し出し、他方(受入側:左)

に貫入させることで、地山を露出させずに、2つのトンネルを安全に接合(貫通)させることができる。

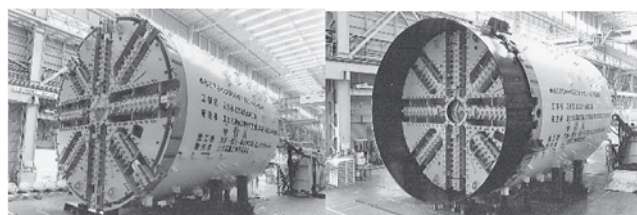


写真-2 MSD工法用シールドマシン(受入側/押出側)

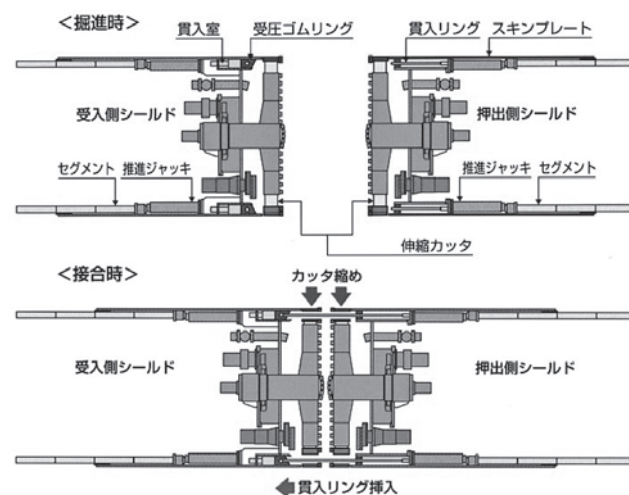


図-2 MSD工法接合手順図(受入側/押出側)

写真-3はCID(Concentric Interlace Docking)工法用シールドマシンの一例の工場検査状況を示す。接合地点において、一方(引込側:左)のカッターヘッド及び駆動部をマシンの機内側に後退させ、その空間に他方(押込側:右)を貫入させることで、安全な接合(貫通)ができる。



写真-3 CID工法用シールドマシン(引込側/押込側)

(2) 分岐/上向き/親子/球体シールドマシン

直径が異なる「本管」及び「枝管」がある上下水道などで、直径が大きい本管内から、枝管用の小径シールドマシンを発進させることで、小径用の発進立坑を必要とせずに枝管を構築できる。このような特殊施工には、狭隘なトンネル構内でマシンの組立と発進ができる特殊構造の「分岐シールド(写真-4及び図-3)」を適用している。

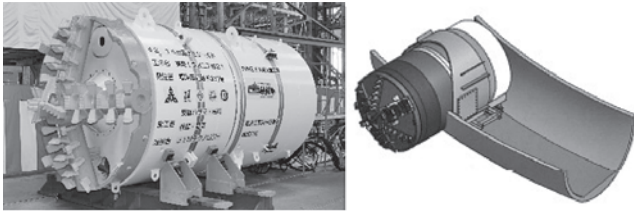


写真-4 及び 図-3 分岐シールド

またトンネルの途中で資材搬入やメンテナンス用の中間立坑（地上とのアクセス用立坑）が必要となる場合があるが、このような中間立坑も、本管内から小径の「上向きシールド（写真-5 及び 図-4）」を発進させることで、地上側の用地確保を必要最小限に抑えながら、立坑を構築することが出来る。この上向きシールドでは、地上到達後にマシンを解体して本管側に回収し、これを再利用して、同一の本管内から計3本の立坑を構築した工事例もある。

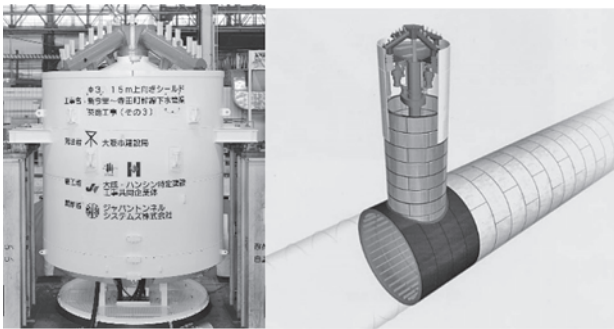


写真-5 及び 図-4 上向きシールド

さらには、シールドマシン（親機）から小径の「子機」を発進させる特殊工法もある。このシールドマシンを用いれば、従来では、直径が異なる2台のシールドマシンで構築していたトンネルや、施工が困難な急カーブ区間を含むトンネルを、1台のシールドマシンで連続的に構築することができる。写真-6 及び 図-5 は同一方向に子機を発進させた「親子シールド」の実績例であり、写真-7 は、立坑構築用の親機から子機を直角方向に発進させた「球体シールド」の実績例である。

4. 「止めずに」施工できるシールドマシン

前項では「立坑を省略できる特殊マシン」を紹介したが、都市部のトンネル工事では、工期の長期化が、工費の増加に加え、発進立坑（発進基地）の近隣住民の不便にも直結するため、極力、施工を止めずに、安定して長距離を施工できたり、高速で施工できる特殊マシンも望まれる。本章では、これらの「止めない特殊マシン」を紹介する。

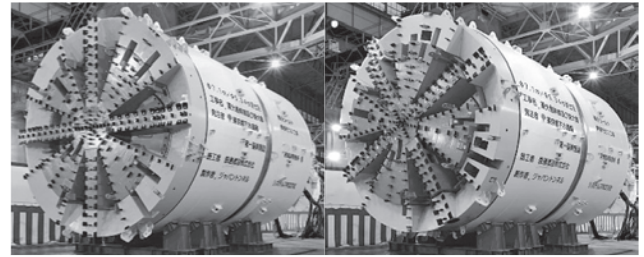


写真-6 及び 図-5 親子シールド（子機は青色部）

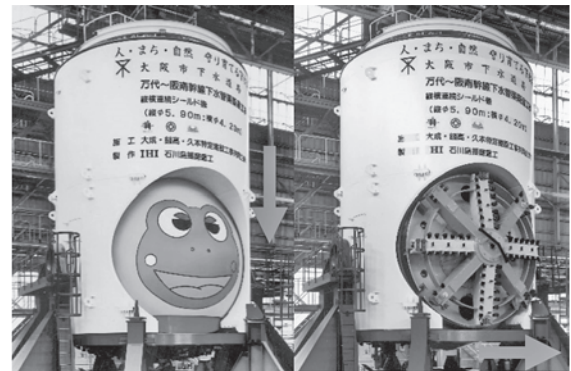
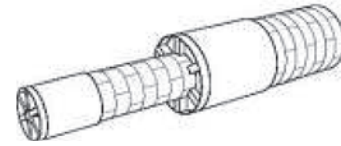


写真-7 球体シールド（ホルン工法：縦横連続掘進機）

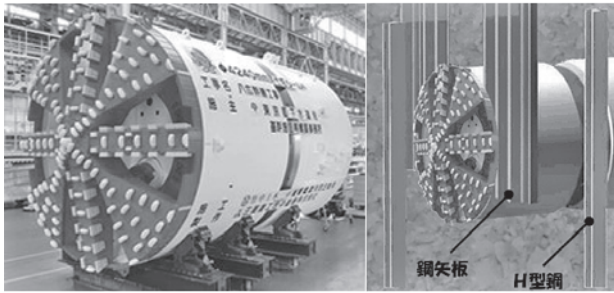
(1) 支障物切削シールドマシン

都市部の過密化に伴い、新規敷設するトンネルの計画路線上に各種の支障物が存在するケースが増えている。支障物とは、それ以前の他の工事で地中に設置された基礎杭、H鋼、鋼矢板、その他の各種杭等の残置物であり、材質も多岐にわたる。一般的なシールドマシンでは、これら支障物の切削は困難であり、従来は、路線の変更、支障物の地上からの撤去、地中での地盤改良後の撤去作業等の対策を要していた。また古い工事の支障物は、残置位置や出現の有無が不確定であり、想定外の支障物との遭遇は、工期を大幅に遅延させる要因ともなっている。

そこで、計画路線上に支障物が出現する（可能性が高い場合を含む）工事では、それらの切削が可能で特殊切削刃を装備したシールドマシン（写真-8 及び 図-6）を適用することで、支障物の撤去作業や路線変更を必要とせずに、通常工事と同様の工期での施工を実現している。

(2) 機械式ビット（切削刃）交換システム

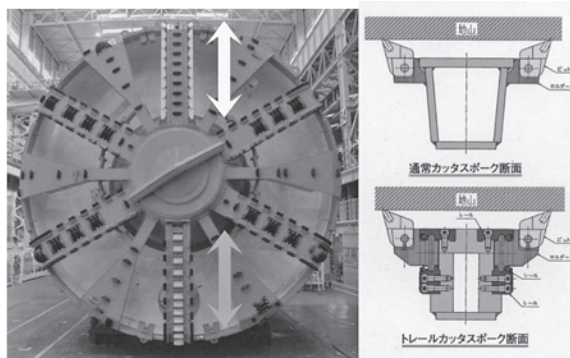
地中を掘り進むシールドマシンでは、切削刃（カッタービット／略称：ビット）が摩耗するため、長距離の掘進には途中でのビット交換が必要となり、切羽の



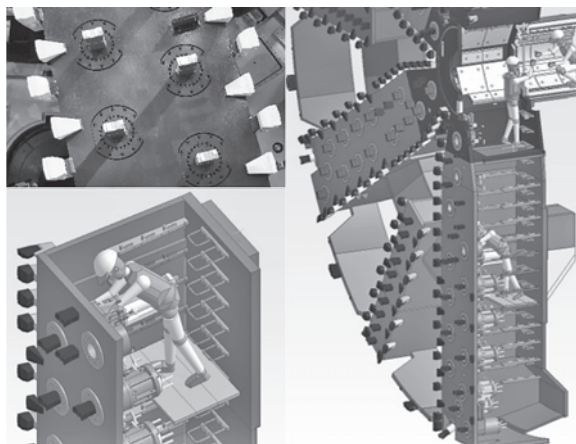
写真一八及び図一六 支障物切削シールド

自立性が期待できない条件下では、地盤改良や土留めにより安全な作業環境を確保するか、より安全な作業のために中間立坑を必要としていた。これらの対策を不要とし、立坑位置の制約も受けず、施工中の任意の場所で安全にビット交換を可能とする各種のビット交換技術が開発されている。

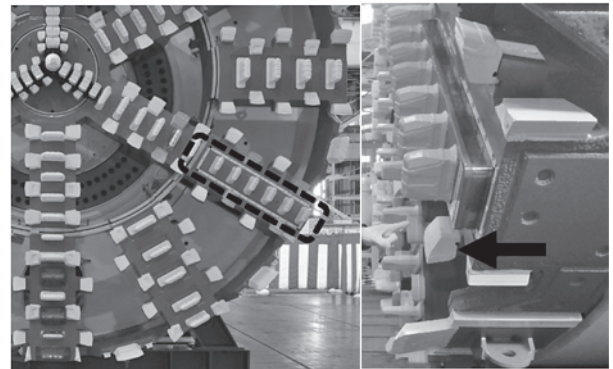
一例として、カッタースポーク上のビット全体をシールドマシン内に引き込んで交換するシステム（写真一九及び図一七）や、初期装備のビットが摩耗して交換が必要となった段階で、新しいビットを切羽側に出現させる各種システム（写真一十、十一及び図一八、九）等がある。



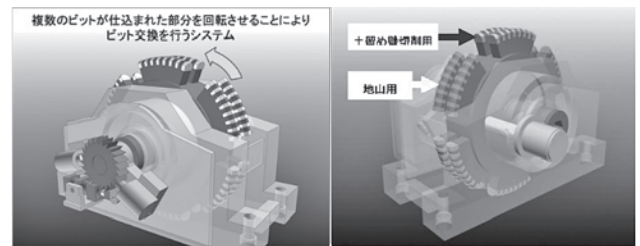
写真一九及び図一七 トレール工法
(矢印部の左のビット群をまとめて機内に引き込み、新品に交換後に戻す)



写真一十及び図一八 スポーク内交換型ビット
(安全なカッタースポーク内にビットを引き込み交換する)



写真一十一 可動式ビット
(退避していた予備ビット群（枠内）を、施工途中で切羽側に押し出す)

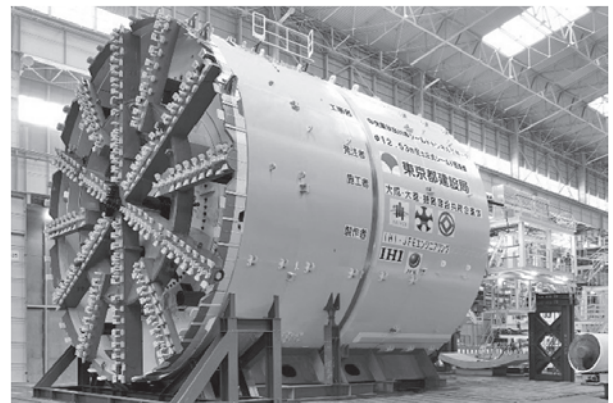


図一九 回転交換型ビット

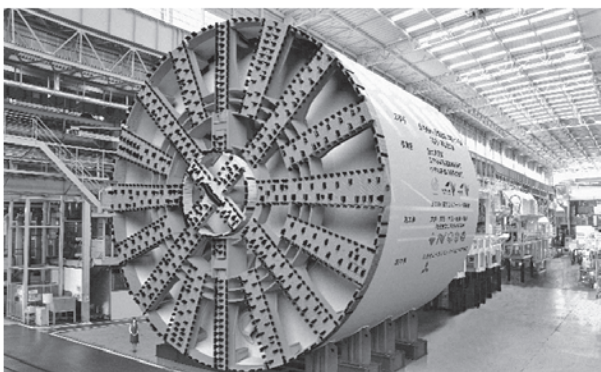
(3) 同時施工／掘削効率向上シールド

シールドマシンの前進の際、計画路線に沿わせる方向制御が必要であり、推進の反力部のセグメントリングを安定した状態にしておくことが望ましく、通常は、セグメント1リング分の組立と掘進の作業を交互に繰り返す。

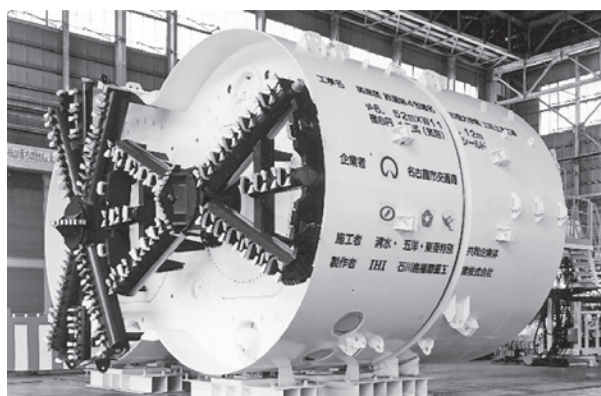
これらの作業を効率よく行えば、長距離を高速で施工することができるため、特に長距離工事では、組立と同時並行で、掘進（方向制御）の管理ができる特殊な制御システムを採用したシールドマシン（実績例：写真一十二、十三）を適用している。写真一十三のマシンでは、さらにカッターヘッド中央部と外周部を別々に回転させる構造を採用し、掘削効率の向上と電力消費量の抑制も実現している。



写真一十二 長距離・高速施工対応マシン

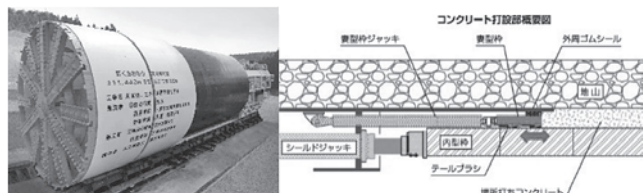


写真—13 長距離・高速施工マシン（掘削効率向上型）
（カッター中央部が独立して回転できる）



写真—15 DOT 工法用シールドマシン

この他、掘進と並行して、マシン後端側では山岳工法のようにコンクリートの直打ちでトンネルを構築できるシールドマシン（写真—14 及び図—10 / SENS 工法）などもある。



写真—14 及び図—10 SENS 工法用シールドマシン

5. 非円形断面シールドマシン

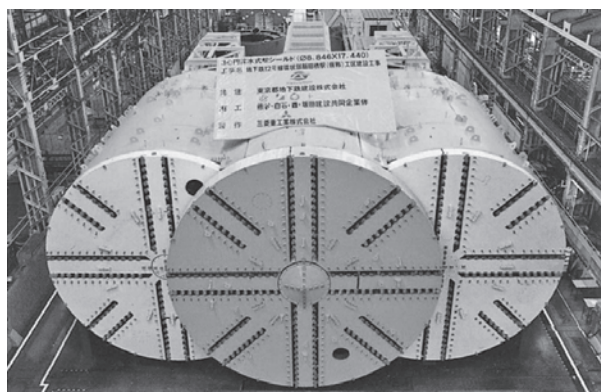
ここまでで紹介したシールドマシンは基本的に全て円形断面であり、これは周囲から土水圧を受ける環境下では円形断面が強度的に有利であり、切羽切削の点でも円盤状カッターヘッドの回転が効率的であることに起因する。しかしながら、地下空間の有効活用においては必ずしも円形断面が最適ではなく、排土量の低減を図る上でも、使用目的に合致した必要最小限の形状や面積であることが望ましい。ここでは、それらのニーズに応じた非円形断面の各種特殊シールドマシンの実績例を紹介する。

(1) DOT シールド

写真—15 に DOT (Dobule-O-Tube) 工法用シールドマシンの一例を示す。2つの円形の一部を重ねた断面形状であり、マシン前面部にて、同一平面内に配置した隣り合うカッターヘッドを歯車が噛みあうように同期回転させることを特徴とする。写真のマシンは、地下鉄の複線部分を同時施工し、1つの円形大断面に比べて、不要な断面が少なく専有面積の小さい合理的な施工を実現している。

(2) MF シールド

写真—16 に MF (Multi-circular-Face) 工法用シールドマシンの一例を示す。これも DOT と同様、複数の円形を重ねた断面であるが、前面部のカッターヘッドを前後にずらすことで、カッター同士の干渉防止の同期回転を不要としている。写真の3連型は地下鉄の駅部構築に使用され、ホーム部と上下線部を同時施工したものである。



写真—16 MF 工法用シールドマシン

(3) H&V シールド

写真—17 及び図—11 に H&V (Horizontal variation & Vertical variation) 工法用シールドマシンの一例を示す。2連の円形断面を連結し、各円形の前部を個別に傾斜可能な構造とすることで、掘進に伴い「スパイラル状の回転力」を発生できることを特徴とする。掘進しながら、縦2連⇔横2連の姿勢変化が可能のため、各駅部の構造上の制約により、駅間で2本のトンネルの相対配置を変更する必要がある場合などに効率よく施工できる。またこの工法では、施工途中で2台を分割すれば、中間立坑を必要とせずに分岐したトンネルを構築することもできる。



写真-17 及び図-11 H&V 工法用シールドマシン

(4) DPLEX (偏心多軸) シールド

写真-18 及び図-12 に DPLEX (Developing Parallel Link EXcavating) 工法用シールドマシンの一例を示す。複数の駆動軸に偏心リンクを介してカッターヘッドを支持させて、全ての駆動軸を同一方向に回転させて平行リンク運動を行うことを特徴とする。平行リンク運動によりカッターヘッドとほぼ相似形の断面を掘削でき、その特性を活かして円形から矩形までの各種断面の施工実績がある。

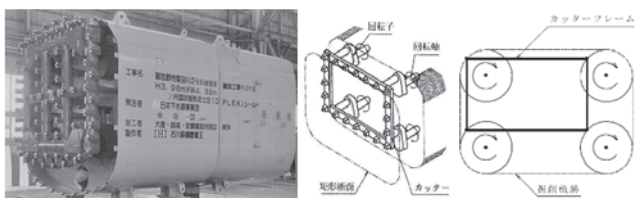


写真-18 及び図-12 DPLEX 工法用シールドマシン

6. おわりに

本稿では、都市部のトンネル工事において、地下空間の有効活用に貢献する（機械構造として特徴的な）特殊シールドマシンの各種実績例を主に紹介したが、今後の課題としては、ソフト（システム）面での充実を図る必要性が高まっていると考える。

特に都市部では周辺環境への配慮（振動、騒音、沈下防止, その他）が益々重要になってきており、また、労働人口や熟練工の減少に対応するためにも、シールドマシンには、自動運転や施工管理での支援、遠隔操作・メンテナンス対応等の充実が求められている。

そのため、今後もシールドマシンをハード/ソフトの両面で進化・発展させ、人々の生活を豊かにするインフラ工事等に貢献していきたい。

JICMA

【筆者紹介】

西淵 雅之（にしぶち まさゆき）
JIMテクノロジー株式会社
川崎事業所 機械設計部
部長

