

シールド掘進機に見る 機構の変遷

手掘りからメカトロ技術まで、深さ、長さ、速さを追求し続ける

時代の要求に合わせた機能と機構が満載されたシールド掘進機。黎明期からリニア中央新幹線用トンネルにつながる機械技術の進化をたどる。

各種機械はそれぞれの機能を果たすためのさまざまな構造や仕組みをもっている。そういう機械の構造や仕組みを「機構」といい、エンジンなどの回転を下げてその代わりに回転力を高める歯車機構、自転車のペダルの踏み心地と車輪の走行スピードの関係を最適にするためのチェーン機構やベルト機構などのほか、蒸気機関車や自動車でピストンの往復運動を回転運動に変えるためのリンク機構やカム機構などがある。実際の機械は幾つかの単純な機構やその組み合わせで成り立っている。必要な機能をいかに単純な機構で実現するかということは機械設計者が常に遭遇し、解決に知恵を絞ってきた課題の一つである。機構に注目した場合、IHIグループにもいろいろ興味深い機種があるが、ここでは「シールド工法」というトンネル施工法とそれに用いられる「シールド掘進機」（以下「シールド」という）を取りあげる。それぞれの時代の社会的背景のなかで合理化が求められ、さまざまな機能を取り入れて開発され実現されてきた機械の歴史を、機構という観点から振り返りたい。

シールド工法黎明期 ー手掘り式シールド

シールド工法とは、①掘削工事中のトンネルの先端箇所（「切羽」（キリハ）という）が崩落するのを防ぐために、掘りたてのトンネル内面にぴったり入る大きさのシールドと呼ばれる頑丈な筒を押し込んで一時的に

支え、②切羽の掘削とともにそれを前進させ、③シールドが一定距離前進するとその後方にトンネル内径に沿う円弧状のセグメントと呼ばれるブロック（鋼製または鉄筋コンクリート製）をリング状に組み立てて、順次堅牢なトンネル内壁を構築していく、というトンネル施工法である。シールド工法は、1818年にイギリスのM.I.ブルネルにより虫が材木に穴をあけるようすにヒントを得て考案された特許が出願され、1825年にはイギリステムズ河底道路トンネル工事で初めて使用された。

日本では大正9年（1920年）に国鉄羽越本線折渡トンネル（秋田県）の工事で初めて使用されたが、技術の未熟さから工事途中で中止された。次に東海道本線熱海～函南間の丹那トンネル（静岡県）掘削工事において、水抜き導坑工事として大正15年（1926年）にシールド工法によるトンネル築造が試みられた。残念ながら高水圧のため約90m掘進して放棄されたが、こ



セグメント

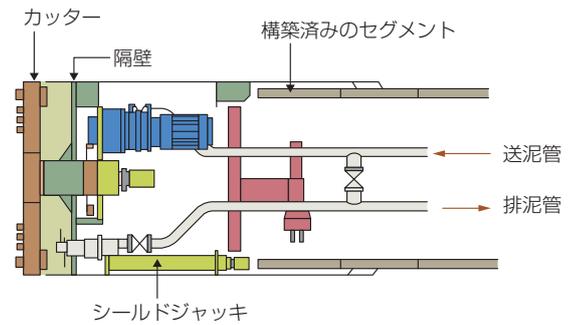
のとき使用されたシールドとセグメントは IHI 製であり、前者は IHI のシールド 1 号機であった。

1961 年に IHI は都市トンネル用 1 号機である名古屋市地下鉄トンネル向けの直径 6.57 m の円形シールドを製作し、施工延長 387 m を無事貫通している。当時のシールド工法は「手掘り式」であり、1978 年には東北新幹線トンネル用直径 12.84 m の世界最大級手掘り式シールドを納めている。手掘り式シールドの機構は、現在のシールドのようにメカトロ技術の満載ではなく、掘削は人力、土砂排出はベルトコンベヤー、装備するジャッキは手動切換弁操作、切羽安定には「圧気」(地山(天然の土層)の崩落や出水防止のため掘削作業空間に圧縮空気を注入して圧力を高めること)や地盤改良などの補助工法が多く採用され、工事の成否は機械技術よりも土木施工技術に負うところが多く、トンネルを施工できる条件は限られていた。

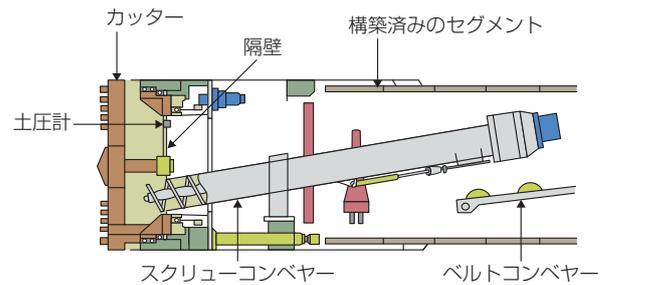
現在のシールド技術の基礎

インフラ整備が進むとともにトンネル工事が増加し、手掘り式シールド工法での圧気による作業者の健康と酸欠の問題や、地盤改良による井戸汚染が社会的問題とされはじめ、そのような補助工法を用いない機械掘りシールドの開発が強く囑望されるようになった。これに応えるべく、1960 年代後半に「泥水式シールド掘進機」が他社で開発された。泥水式シールドは、先端の切羽と隔壁との間の密閉室に泥水を注入し、カッターで切削した土砂を泥水状態にしてポンプにより流体輸送で排出する。切羽安定機構は、地山の土圧と水圧がバランスするように泥水圧を制御し切羽の崩壊を防止し、掘削土量と排土量を管理して地山および地表面の陥没を防ぐというものである。また、シールドの前進は油圧で伸縮するシールドジャッキによって構築済みのセグメントを後方に押すことで行う。

その後、IHI は泥水式シールドに対抗すべく、同じ密閉型機械掘りシールドでも、切羽安定機構を一新させた「土圧式シールド」を開発し 1972 年に実用化した。泥水式シールドとの違いは、切削した土砂を自然状態のまま取り込み、切羽と隔壁の間に土砂を充満させ、地山の土水圧とバランスさせて切羽の安定を図る。切削



泥水式シールド



土圧式シールド

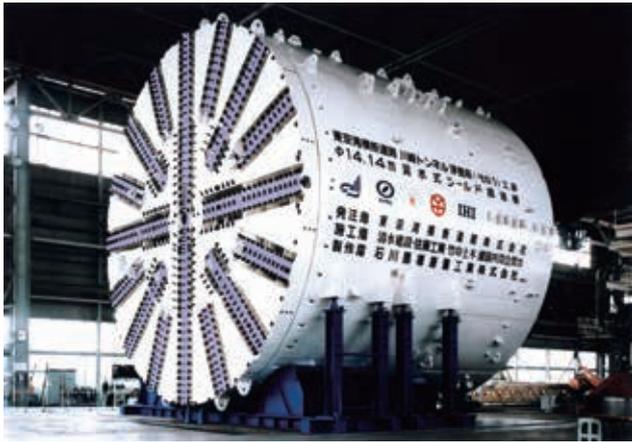
土砂は切羽の土水圧が下がらないようにスクリューコンベヤーという機構で土量管理をしながら排出する。この方法の採用で泥水式シールドに必要な流体輸送設備と泥水から土砂を分離する処理設備が不要となり、地上の設備を大幅に縮小することができた。IHI はいずれのシールドも自社で設計・製作ができる環境を保有しており、国内でのトップシェア争いをやっている。

これらの日本で開発された切羽安定機構はその有効性、信頼性、実績が広く認められ、今では世界で採用されるシールド工法の主流となっている。

シールドへのメカトロ技術適用

シールドにおける「地山を掘る」掘削機構、「シールド掘進機を前進させる」推進機構、「トンネル内壁(覆工)を構築する」セグメント組み立て機構という基本機構は主に油圧・電気制御技術で実現されるが、そのなかでも特に「セグメント組み立て」動作には精密な制御を実現するために大々的にメカトロ技術を導入した。その先駆けが、1994 年から工事がスタートした東京湾横断道路(アクアライン)トンネル用直径 14.14 m の大口径泥水式シールドである。

5 階建てビルの高さの直径を持つトンネルを安全に精



φ14.14m 泥水式シールド

度よく高速に構築することが求められたので、人手でセグメントを組み立てる従来型のエレクター装置を全自動化するシステムの開発が1982年から進められた。このシステムには、重量物の精密位置決め、セグメント位置の検出、組み立てボルトの無人締結などの機構が駆使された。

アクアライン用シールドを製作するほかのメーカーもこの技術を投入してきて、自動化装置のコンペとなった。IHI製のものは、最大重量10tもあるセグメントを、後方から組み立て装置に供給し、寸分の狂いもなく高速に組み立てることを実現し、実際の工事における1リング分のセグメントの組み立て所要時間が、他社の平均時間90～110分に対して、70分という圧倒的な性能をたたき出した。その驚異的なセグメント組み立て時間と、安定した掘進により、当初予定していた掘進距離をさらに延長して掘進するほどであった。それ以降、「大口径シールドといえばIHI」と言われるようになる。ア

クアラインの観光スポットである海ほたるには、当時の功績をたたえるようにIHIシールドのカッターを模擬したモニュメントが高く銀色に輝いている。

多種多様な地下構造物への挑戦

シールドは、通常の円形断面で1本のトンネルを構築するだけに留まらず、その時代のニーズに合わせて多種多様な地下構造物を構築するためにも採用されてきており、その都度、新たな機能や性能が要求され、さまざまな機構が採用され開発されてきた。

円形断面の掘削でできる無駄な空間を最小限にするために円形以外の断面のトンネルを掘削することも要求された。地下鉄などの上り線と下り線のトンネルを一気に構築するためのメガネ型の断面を掘削するため、一対のカッターを相互に干渉しないように同期回転させる機構を採用した「DOTシールド」を実現した。他にも四角いトンネルを構築するために揺動カッターを採用した「矩形シールド」、リンク機構をカッター駆動軸にして掘削断面よりひとまわり小さい相似形のカッターを回転させ、矩形などの特殊断面の掘削ができる「DPLEXシールド」などが実用化された。

シールド工法は、発進および到達のための立坑（垂直な坑道）を設けるのが原則であるが、地上環境やトンネル直上の既設地下構造物の影響で立坑が設けられない場合がある。従来、立坑を設けて施工されてきた地下構造物を、立坑なしで施工するために特殊なシールドが開発されてきた。



DOTシールド

さらに、大きい直径のトンネルを掘った後、引き続き小さいトンネルを掘る「親子シールド」、地中で2台のシールドがドッキングする「CID 工法」や「MSD 工法」などの地中接合シールド、構築済みのトンネルのセグメントを直接内側から切削して分岐発進する「分岐シールド」などが実用化された。

シールドの新たな課題

－ 大深度、長距離、高速掘進

シールド工法の成熟化・安定化により、都市部の地下には上下水道、地下鉄、電力ケーブル、道路などさまざまなトンネルが築造され、すでに過密状態である。新たなトンネルは必然的に既存のものを避けてさらに深い地下に作らざるを得ない。また、公共工事のコスト縮減という面から1台のシールドで長距離掘進し、使用する台数を少なくするニーズがある。20年前では2 km 以下が一般的な掘進距離であったが、最近の大型プロジェクトでは8 km から10 km と超長距離が要求されており、そのような長距離化のニーズとともに工期縮減というニーズもあり、シールドの掘進高速化が求められ

ている。これまで IHI が長い年月をかけて培ってきた大深度、長距離、高速掘進を実現するための技術、すなわち、カッターシールドなどの「シールド機構」、カッタービットなどの「掘削機構」、掘削 → 前進 → セグメント組み立てのサイクルタイムを短縮する「組み立て同時掘進機構」などの機構は、首都高速道路中央環状品川線トンネル用の直径 12.53 m の大口徑土圧式シールドに採用され、2010 年度からスタートした工事で施工延長 8 km の長距離を約 1 年半で貫通させることに成功した（東京湾アクアラインは約 4 km を 2 年半で貫通）。現在は国内最大直径 16.1 m の東京外かく環状道路トンネル用土圧式シールドを製作中であり、将来的には中央リニア新幹線トンネルなどビッグプロジェクトでもシールド工法の採用が計画されており、技術をさらに高度化して対応する必要がある。

人類は遠い宇宙にロマンを描き、宇宙空間を開拓してきた。同様に、IHI はそのシールドにおいても、第 1 号機の納入以来現在までの約 90 年間、さまざまな世の中のニーズに応えながら前人未到の地下空間の開発に挑戦してきた。その長い歴史で得られた経験、ノウハウを武器に、今後も地下空間のさらに高度な開発に挑む。



海ほたるのモニュメント