

進化する トンネル掘削技術と シールドマシン

写真提供=三菱重工業株式会社

道路、地下鉄や下水道、その他ライフライン用に、都市部では網の目のようにトンネルが掘られている。そのトンネル建設に多用されるのが、シールドマシンという大規模な機械である。大深度化が進むなど制約が増える中、シールドマシンにはさまざまな工夫が凝らされるようになってきている。

軟弱地盤でも安全に掘り進む「シールド工法」

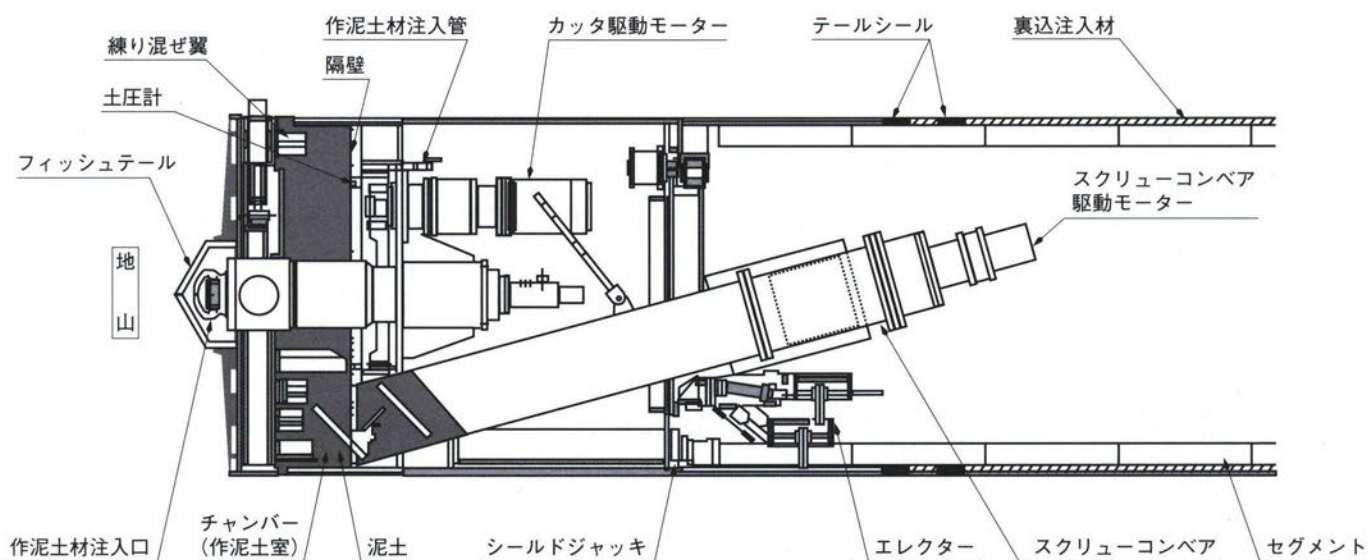
「シールド工法」とは、鋼製の筒（シールド）内部前方を掘り進むと同時に、後方に「セグメント」と呼ばれる分割されたブロックパネルをトンネル内壁に組み上げていく工法である。軟弱地盤・大深度でも安全にトンネルを掘ることができ、セグメントは工場で大規模生産できるのでコスト削減にもなる

という特徴がある。

シールド工法は1818年、フランス人のM.I.プルネルによって考案され、19世紀前半のロンドン、テムズ川の川底を横断するトンネルで初めて実用化された。初期には、トンネルの掘削自体は人力もしくは小型の携行工具で行われ、掘削している前面（切羽）崩落の主因である地下水圧力には、トンネル内の気圧を高めることで対処するのが普通であった。

前面を密閉した大型の掘削機（シールドマシン）を用いる、密閉型機械掘り式シールド工法が登場するのは1960年代のことである。これによって、トンネル工事の安全性・作業性は飛躍的に向上した。

70年代前半では、まだ手掘り式・半機械掘り式が大半を占めていたが、後半には密閉型機械掘り式が急伸し、80年代に入る頃には構成が逆転した。現在、日本でのシールド工法の約97%（93～02年度）が密閉型機械掘り式であり、手掘り式・半機械掘り式はごく一部で行われるにすぎない。したがって、シールド工法と言えば、ほぼ「シールドマシンを用い



泥土圧式シールドマシン (左写真) とその基本構造 (上図)

前面のカッタで掘削された土砂は添加剤によって泥土になり、隔壁前方で切羽の圧力を支える。土圧計によって泥土の圧力をチェックし、掘削が進んだ分の泥土はスクリューコンベアで坑内を通過して排出される。

用いられ、トンネル建設のおよそ9割がこの工法である。とくに都市部では、トンネルの大深度化、地上の用地確保の難しさから、ほとんどシールド工法が用いられている（地下鉄駅の構築などには一部開削工法が使われている）。

世界的にみてもシールド工法は、日本国内より採用比率は下がるとはいえ、主要な工法である。

シールドマシンの構造とバリエーション

シールドマシンは一般に、特定の工事ごとに専用のものが設計・製作され、掘進の終了とともに解体される。

形状は円筒形が基本であり、最も一般的である。外径は、完成するトンネル内径よりも若干大きく、通常、下水道用トンネルで2m~4m、複線の地下鉄トンネルでは8m~10mのものが用いられる。東京湾アクアラインの川崎側海底トンネル工事では、直径14mを越す大型のシールドマシンが使用された。胴部の長さは、直径の1倍~3倍であることが多い。

マシン胴部外殻は、トンネルを掘り進む間、周囲の土圧・水圧に耐える役割を持つ。胴内部では、トンネル内壁となるセグメントが自動機器によって順次組み立てられ、シールドマシンが進んだあとは胴部に代わって土圧・水圧を支える。セグメントは鉄筋コンクリートのほか、鋼製や鋳鉄製のものも用いられる。

トンネルの切羽に接するシールドマシンの最前面（カッタヘッド）は、放射状に多数の掘削刃（カッタビット）を持ち、全体が回転する（回転速度は外周速で15~25m/分）。マシン後部には円周に沿って多数のジャッキが備えられている。



た掘削」を指す。

トンネルの主な工法としては、シールド工法のほか、次のようなものがある。

●NATM（新オーストリアトンネル工法）

強固な岩盤を持つ場所、特に山岳トンネルで主に使われる工法。ダイナマイトや掘削機による掘削後、壁面を吹付コンクリートによって素早く固めると同時に、ロックボルトを岩盤に深く打ち込み、岩盤にコンクリートを固定する。

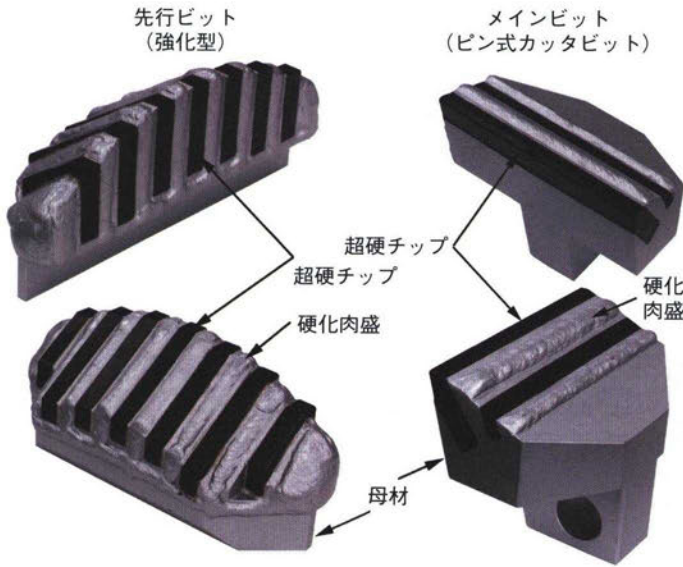
●開削工法（露天掘り）

地表から縦に掘り下げ、トンネル構造物を構築後に埋め戻す。一般に、地上に障害物がない場所で、深さ10mくらいまでを目安として使われる。

●沈埋トンネル工法

水底トンネルに使用される工法。水底に掘った溝に複数の箱形構造物を沈め、結合してトンネルにする。

軟弱・複雑な地盤が多い日本では特にシールド工法が広く



カッタビットとカッタヘッド

〔上〕メインビット (右) と先行ビット (左)。メインビットは超硬合金のチップを埋め込んだ差刃型で、耐摩耗性を上げるため、チップを“二枚刃”にしたタイプ。メインビット、先行ビットともに母材表面に摩耗・欠損を抑える硬化肉盛が施されている。

〔右〕泥水圧式シールドマシン (三菱重工業(株)製作で、東京湾横断道路に使用されたもの。直径約14m) のカッタヘッド。放射状の隙間の縁に沿っているのがメインビットで、左右回転どちらでも使えるよう、両方の向きに装着される。カッタヘッド面にやや小さく見えるのが先行ビットで、メインビットよりも前方に若干飛び出すように付けられている。



セグメントが1周分組み上がるたびに、このジャッキを設置し、その圧力でカッタヘッドを切羽に押し付け、掘削していく。つまり、掘進とセグメントの組み立てとを交互に繰り返しながら作業を進めていくわけである。掘り進む速度は、比較的軟らかい地盤で1ヶ月に300m程度が普通である。

密閉型機械掘り式シールド工法のなかで、現在主流となっているのは、「泥水圧式」「泥土圧式」の2方式である。日本国内を例にとると、93年～02年実績でシールド工事件数の26.1%が泥水圧式、70.8%が泥土圧式となっている。

前者は前面に泥水を送り込み、後者は掘削した土砂に添加剤 (作泥土材、加泥材などと呼ばれる) を注入して不透水性・塑性流動性を持つ泥土とし、それぞれその圧力によって切羽から受ける地下水圧・土圧を支えるものである。カッタヘッドの形状は、泥水圧式は円盤状、泥土圧式はビットが植えられた列の間が空いているスポーク状が普通である。

カッタヘッドの後方はチャンバーと呼ばれる空間を介して

隔壁があり、これが前方の泥水・泥土の圧力を受け止める。チャンバーは、泥土圧式では、カッタヘッド裏面の突起 (練り混ぜ翼) によって土砂と添加剤を攪拌するための空間でもある。

泥水圧式は前面の密閉度が高いので、40mを超える大深度や、地下水圧が高い場所です使われることが多い。泥土圧式は土質の適応範囲が広く、掘進も早いので、それほど深度の高くない中小口径のトンネル掘削に多用されている。

切羽の保持についてはこの2方式を基本とするが、地下鉄のホーム部分などの掘進に用いるために円形断面が2連以上組み合わせられたもの、円形以外の楕円形、角形などの特殊な断面を持つもの、あるいはトンネル自体が急角度に曲がるものなど、さまざまなニーズに対応したシールドマシンが製作されている。

例えば急角度で曲がるトンネルに対応して、マシンの方向転換用に立坑を掘る必要がない、急曲線用、直角用などのシールドマシンが作られている。

また、トンネルのますますの大深度化や、特に大都市圏での用地確保の難しさから、より長距離を掘り進むことができるシールドマシンの開発が大きな課題となっている。長距離化は、コスト削減にも繋がる。

従来は、1工区の掘削 (立坑から立坑まで) が1km前後から長くても2～3km程度であった。しかし、例えば2006年11月着工の首都高速中央環状品川線では、8kmの距離を一気に掘り抜く工事も予定されている。

現在のシールドマシンの主流である泥土圧式マシンや、円形以外の異形断面での掘進技術では、日本が世界をリードしている。シールドマシンの大手メーカー世界8社のうち5社が日本企業であり (ほか、ドイツ2社、カナダ1社)、国際プロジェクトに日本企業が参画するケースも数多い。

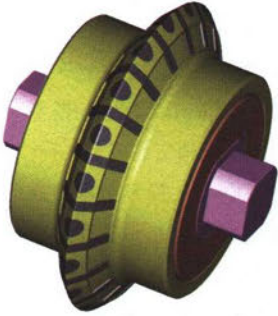
長距離掘削を支えるカッタビットの技術

カッタヘッドを含むシールドマシン本体主要部分は、一般構造用圧延鋼材 (SS400など) を用いて、溶接構造で製作される。

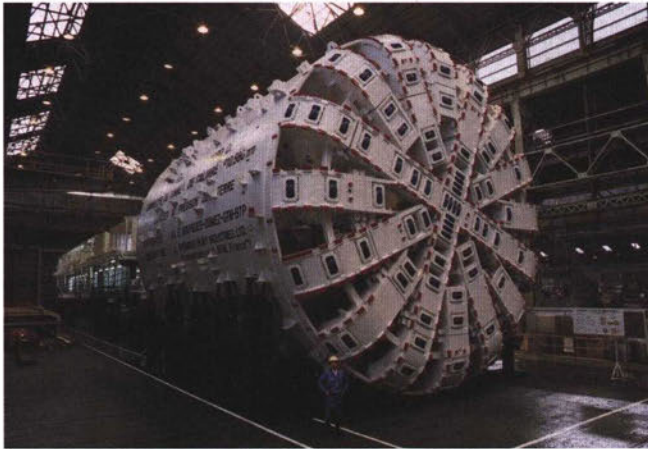
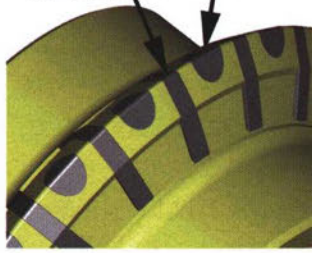
カッタヘッド前面には、地盤を掘り進むための刃、カッタビットが据え付けられる。ビットの形状は、対象とする地盤、シールドマシンの形式によってさまざまなものがある。

代表的なものは、メインビット (切削ビット。単にカッタビットと呼ばれることもある)、先行ビット (貝殻のような円弧状でシェルビットとも呼ばれる) である。標準的な大きさは、メインビットが幅100～200mm、高さ70～120mm、先行ビットは幅100～300mm、高さ100～200mm、厚さ50～70mmであ

強化型ローラーカッタ



円柱型超硬チップ
板型超硬チップ



ローラービット

〔上〕固い岩盤や礫・玉石地盤などの掘削に用いられるローラービット。標準的な大きさは直径12インチ（304mm）～17インチ（432mm）。図は石川島播磨重工業(株)、三菱マテリアル(株)の共同開発による強化タイプ。〔下〕ローラービットを装着した岩盤対応型シールドマシンは、カッタヘッドも外周部が丸みをおびたドーム型をしているのが普通。写真は三菱重工業(株)の製作でフランス・リヨンの2車線道路トンネルに使用されたもの。直径約11m。

る。先行ビットは、カッタヘッド上でメインビットよりも若干前方に突き出すように設置され、先に地盤に溝を掘ることで、メインビットの土砂のかき出しを助け、その負担を少なくする役目を担う。

ビットの数は、直径10m級のシールドマシンでメインビット250個、先行ビット100個程度で、カッタヘッドの面積とほぼ比例して増減する。

このほか、岩盤や大きな礫を含む地層に対応したローラービット（ローラーカッタ、ディスクカッタなどとも呼ばれる）もある。これはそろばん玉状の自由回転するビットで、切羽に押し付けると回転しながら岩石を破碎する。

カッタビットは、掘進に従って摩耗・破損するので、ある程度の距離を掘削した後は交換が必要になる。

立坑を掘る、切羽部分への薬剤注入で地盤を安定させてマシン側部を掘るなどして、カッタヘッドの前面に回ってビットを交換するのが普通だが、どちらの方法も安全性やコストの問題から好ましくない。そのため、できる限り交換頻度を下げたためのカッタビット長寿命化の技術開発が進められている。

材料・形状の改良によるカッタビットの長寿命化

カッタビットは、その基本形状を作る母材と、刃先となるチップの2つの部分からなる。母材には主に強靱性の高い中空鋼鋼材（SKC）、ニッケルクロム鋼鋼材（SNC）、ニッケルクロムモリブデン鋼鋼材（SNCM）などが用いられる。

チップは超硬合金であるタングステンカーバイド・コバルト系合金（WC-Co）で、JIS分類E3～E5が主に使われる。従来はこのうち、超硬合金としては比較的軟らかいE5（硬さHRA86以上）が最も一般的だった。これは、

*硬さが高いほど耐摩耗性は優れるものの、靱性が低く、欠けやすくなる。

*同じく硬さが高いほど、チップと母材との熱膨張率の差が大きくなるため、加熱接合部の歪みが出やすい。

などの理由による。より硬いE4（HRA87以上）やE3（HRA88以上）は、石英（HRA80）を多く含むマサ（花崗岩が風化した土砂層）など、チップの摩耗が激しい地盤が対象であった。

しかし最近では、高い硬さ（耐摩耗性能）を持ちながら、靱性を高めた材料の研究開発が進んだことにより、次第にE4～E3が主流になりつつある。

タングステンカーバイド・コバルト系合金のチップは、粒度4.2～12.0μmのタングステンカーバイド粉にバインダとしてコバルト粉を加え、成形・焼結して作られる。焼結温度は真空下で1300～1500℃が一般的である。

“焼き物”であることから、内部に微小な隙間が発生し、欠け・割れの原因となることがある。これを抑えるため、高温・高圧のガスを使ってチップの組織を緻密化するHIP処理が行われる。通常のHIP処理は焼結後に改めて行われるが、最近では、焼結と同時にHIP処理を行い、微小な隙間の発生自体を抑えるSinter-HIP処理なども用いられ、チップの靱性

超硬合金分類表

(JISM3916「鉱山工具用超硬チップ」)

JIS			参考表(JIS)		
分類記号	硬さ HRA	抗折力 N/mm ² (kgf/mm ²)	化学成分 (%)		
			W	Co	C
E1	90以上	1177以上 (120)	87～90	4～8	5～6
E2	89以上	1373以上 (140)	85～89	5～10	
E3	88以上	1569以上 (160)	83～87	7～12	
E4	87以上	1667以上 (170)	82～86	8～13	
E5	86以上	1961以上 (200)	78～85	9～17	

向上に寄与している。

メインビットの形状には、チップを母材表面に貼り付ける「貼付け型」、あるいは埋め込むように差し込む「差刃型」がある。いずれの型でも、母材とチップは銀ロウ付けによって固定される。また、長寿命化のため、チップ部分は大型化の傾向にある。

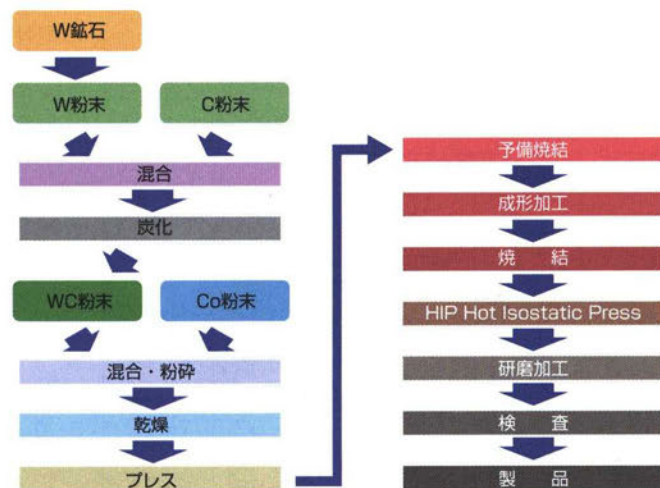
貼付け型のビットは、超硬合金のチップ面積を大きくでき、耐摩耗性が高い。ただし、チップと母材、銀ロウそれぞれの熱膨張率が異なるため、歪みが出やすく、衝撃に弱い。差刃型はロウ付け面積が大きいので歪みが出にくく、礫が出るような場所での掘削に使われるが、形状が複雑なため製作コストが上がる。

先行ビット（シェルビット）では、円弧状の基本形状の母材に、何枚もの超硬チップが進行方向と直角に埋め込まれるのが普通である。

刃先であるチップが摩耗・欠損・剥離するだけでなく、母材自体が摩耗欠損することもある。この母材の摩耗欠損をなるべく抑えるため、母材表面に硬化肉盛を行うことも一般的になっている。肉盛には、硬さHV600～1000のマルテンサイト系溶接材料や、HV1800程度のタングステンカーバイド粒子を混合したタングステンカーバイド分散溶接材料が用いられる。

カッタビット交換システム

カッタビットの寿命は地層に大きく左右される。柔らかい粘土層なら、シールドマシンの掘進距離で数kmを交換なしで掘削した事例がある一方、礫層では100mでビットの交換を迫られることもあるという。ごく一般的な地層で考えた場合には、1000m以下というのが従来のカッタビットの寿命であった。



超硬チップ製造工程

チップ製作の一般的な工程。成型の際に均等に圧力をかけること、材料粉末の混合を均質にすることなども、仕上がりの硬さや靱性に影響する。

しかし、カッタビットの材質の向上による高硬度・高靱性化や、形状の改良により、現在では2km～3kmの長寿命達成の実績も出てきている。こうした事例も踏まえ、カッタビットを製作するメーカーでは、「掘進距離3km以上」を長寿命のひとつの目安数値として、研究開発を進めている。

もちろん、カッタビットの耐摩耗性向上・長寿命化が進んでも、それ以上に長距離の工区、礫層を含むなど条件が過酷な工区では、ビット交換が避けられない。そのため、ビット交換のしやすいマシンの機能向上を目指して、メーカーやゼネコン各社でさまざまな検討が行われている。その例としては、次のようなものがあげられる。

(1) あらかじめマシンに予備のビットを持ち、自動で交換できるもの。

* 当初のビットが摩耗したときに、あらかじめカッタヘッド部に内蔵しておいた予備のビットを押し出す。

* カッタヘッドのビット装着した列が回転式になっており、最初のビット列が摩耗したとき、これを回転させて裏側の予備のビット列を前面に出す。

(2) マシンの前面に出なくても交換を行えるようにしたもの。

* カッタヘッド中心側から、交換用カッタビットを1つずつスポークに挿入できる。新しいビットを挿入すると、摩耗の激しい外周側から、順次古いビットが押し出される。

* カッタヘッドのスポーク部がレール式になっており、連結されたカッタビット列を機内に引き込み可能にしている。

* カッタヘッド前面に固化剤を加圧注入しながら、カッタヘッドをマシン内に後退させる。

* シールドマシン前部に球状の構造体を持ち、ビット交換時にはカッタヘッドを球体に格納、坑内側に回転させる。

複数回のビット交換が自由に行える(2)の方式では、長距離掘削で土質に変化がある場合、常にそれに適したビットを使えるメリットもある。

経済発展による地下開発ニーズの伸長、そしてもともと複雑・軟弱な地盤の多い事情が相まって、日本のシールド掘進技術は大きく進展してきた。

近年、土木事業の活況が伝えられるのは中国市場であり、例えば上海や広州、北京の地下鉄工事にも、日本のシールドマシンは活躍している。中国市場では現地メーカー・施工会社の成長もあり、今後、日本企業の参入が難しくなることも予想される。しかし、特に難易度が高い先進の技術開発では、日本が今後とも世界をリードしていくことが期待されている。

[取材・文＝川畑英毅]

取材協力・写真提供＝三菱重工業株式会社、三菱マテリアル株式会社