

総論 小断面並列施工

地下空間築造に利用される推進技術の進化と今後の動向



さとう とおる
佐藤 徹

(株)イセキ開発工機
営業技術部部長



しまだ ひでき
島田 英樹

九州大学大学院工学研究院
地球資源システム工学部門准教授



ささおか たかし
笹岡 孝司

九州大学大学院工学研究院
地球資源システム工学部門助教



まつい きくお
松井 紀久男

九州大学大学院工学研究院
地球資源システム工学部門教授

1 はじめに

わが国は、地下空間に様々な生活基盤の充実に寄与するインフラ整備を実施し、地下空間非開削築造技術の主流であるトンネルにおいても多数の施工が実施された。その中で、小・中口径鋼管を組み合わせることで多様な断面を形成できるパイプルーフ工法は、様々な地下インフラに利用されてきた。また円形管敷設組み合わせのパイプルーフだけではなく、矩形断面の連続施工による方法も、鉄道下トンネル等の地下空間築造に貢献してきた。推進工法は、それらの技術の中で活用され、数々のトンネルが施工されてきたが、進化し続けている推進工法は、地下空間築造の利用に生かされる技術として、現在も注目されている。

今回は、地下空間築造に利用されている推進技術についての現状および今

後の動向について論ずる。

2 地下空間築造技術の種類と選定について

地下空間築造技術は、短中距離用に様々な施工方法が開発されてきた。以下に短中距離トンネルの代表的な施工方法を図-1に示す。図-1の内のシールドトンネル工法においては、基本的には線形が長大となる施工に対応する技術であるため、短中距離においては、工期、経済性にやや難があることから、推進工法での施工で実施されている施工例がある。

図-1のとおり、現在では様々な短中距離トンネルの施工方法が存在しているので、各々特長を良く捉え、選定には施工条件に合わせた最適な工法の選定を行うことが肝要となる。以下に代表的な選定項目について列挙する。

①近接構造物への影響

土被り、構造物容積（断面積）

②既存交通への影響

施工に必要なヤード面積

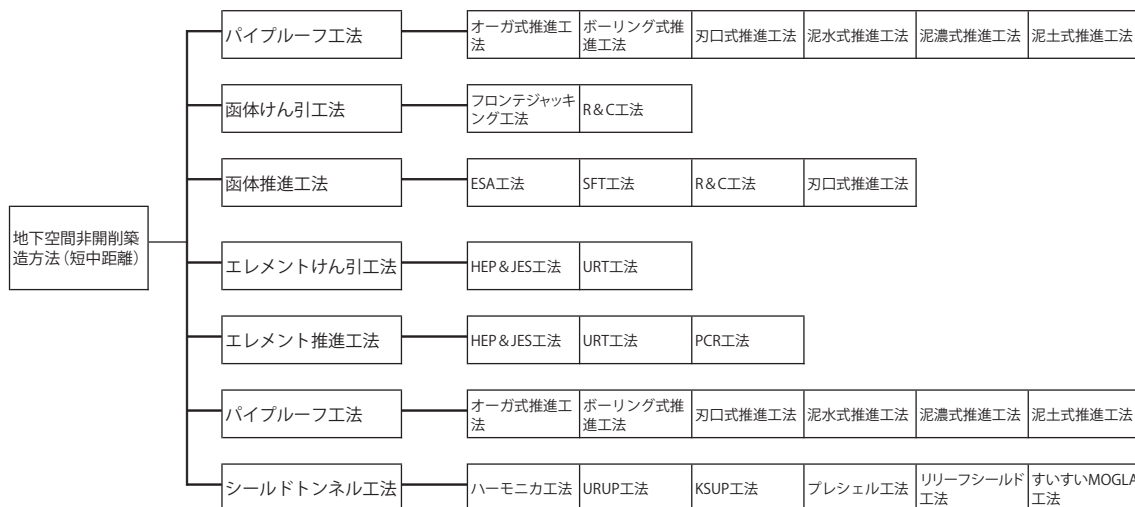
③施工可能延長

施工延長による経済性、施工可能な施工延長の確認

④土質、地下水への対応

他の補助工法の必要性、施工可能な土質の確認

特に都市部での施工を想定している場合には①、②の項目には留意が必要である。また、これらの工法は、推進技術が多く利用されているが、その掘削方法、推進方法の特長を捉え、③、④項目の検討を行うことが重要と考える。また、図-1に示すように同系列工法の中に多様な個々の工法があり、これらは単に掘削方法や推進方法だけの一般的な技術ではないノウハウや技術があることを踏まえての工法選定が必要となる。



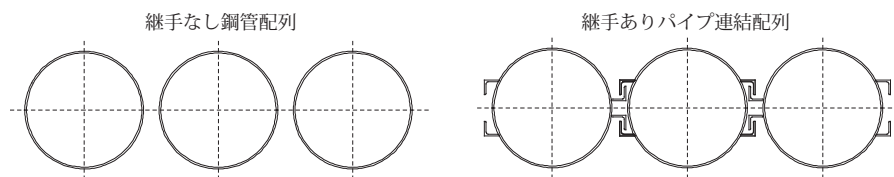
図ー1 地下空間非開削築造方法 (短中距離)

3 パイプルーフ工法技術の進歩

トンネル施工を補助する技術として利用されてきた推進技術の一つにパイプルーフ工法がある。工法の初期段階では、トンネル上部の緩みを抑制する利用が主な工法であったが、現在は様々な推進工法との融合により、土質の適用範囲や施工距離の自由度が広がり、より確実なトンネル形成のための工法として発展を続けている。

パイプルーフ工法とは、一定間隔にパイプを挿入配列し、地下空間築造における様々な影響を防ぐ一定の領域を形成するものである。パイプ配列には、継手（ジャンクション）で鋼管同士を連結する場合としない場合がある。図ー2にパイプ配列例を示す。前述したとおり、トンネル掘削断面上部にルーフ（屋根）を形成することでトンネル掘削の土留めとしての機能を持たせながら、地表面沈下対策、上部既設構造

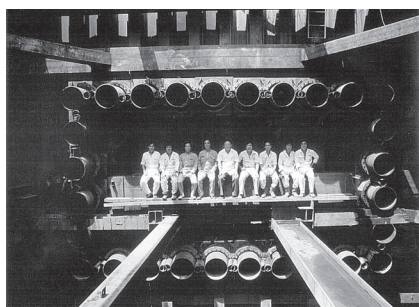
物防護等に利用されてきたことからパイプルーフ工法と呼ばれているが、護岸、立坑工事等に用いられている鋼管矢板工法と同様に、鋼管を継手（ジャンクション）で接続することで地山土砂や地下水を遮断し、内部掘削することでトンネルを築造する施工にも適用されている。また掘削するトンネル外周に沿った施工だけでなく、防護する側の構造物と新規に建設するトンネルの中間位置に打設し、相互の影響を抑止するアンダーピーニング等の遮断防護として適用されることもある。写真ー1、2に掘削断面上部のルーフ形成例、矩形配列の内部遮断防護例を示す。またパイプルーフ工法によるパイプ挿入配列パイプアーチ形成による遮断効果のイメージを図ー3に示す。



図ー2 パイプ配列例



写真ー1 掘削断面上部のルーフ形成例



写真ー2 矩形配列の内部遮断防護例

わが国において最初パイプルーフ工法が施工されたのは、1962年東海道新幹線第一熱海トンネル工事である。トンネル坑口部の上部重要構造物防護として、外径84mmの鋼管がトンネル上半アーチ120度、延長30mの範囲に打設された¹⁾。パイプルーフ鋼管の打設は水平ボーリング方式での施工である。この施工は、トンネル施工における矢板工法が主流であった

時における緩みやすい地山に対して、レールや鋼管等の長尺鋼材を打設する施工と同様の効果を求めて施工されたものであった。

継手で結合された連結式パイプルーフについては、1963年に地下道を建設する補助工法として採用したものが、最初の施工とされている。高さ3m、幅3mの馬蹄形トンネル沿って口径600mmの鋼管を打設し、鋼管の打設方法は、オーガ方式推進工法で施工している²⁾。

その後の1960年代は、主に小口径鋼管(318mm以下)のパイプルーフがボーリング方式で施工された。海底下の断層破碎帯トンネルでの施工、地すべり地帯での山岳トンネル防護への利用、シールド施工に伴う鉄道線路防護のための利用など、山岳トンネルから都市トンネルに至るまで様々な用途に採用され徐々に実績を積み重ね、パイプルーフ工法は地山の変状抑止や構造物等への影響回避の施工方法として、トンネル技術者の注目を浴びだした。

1970年前半になると、パイプルーフで打設される鋼管径の大型化が進んだ。これは、大断面トンネルやアンダーピーニングに多く採用されることが多くなったためであり、これら大口径のパイプルーフは、オーガ方式推進または刃口式推進により施工が実施され、鋼管配列により周辺地山を防護するパイプルーフ工法は、注入工法などによる防護工と比較して確実な効果が得られる信頼の高い工法として定着していった。図-4に都市中心部の郵便局下基礎を支持するためにアンダーピーニングで使用されたパイプルーフ配置図を示す。

しかし、いくつかの課題が指摘されていた。その一つにパイプの打設精度がある。鋼管打設精度については、施工延長の増大とともに精度が悪化する

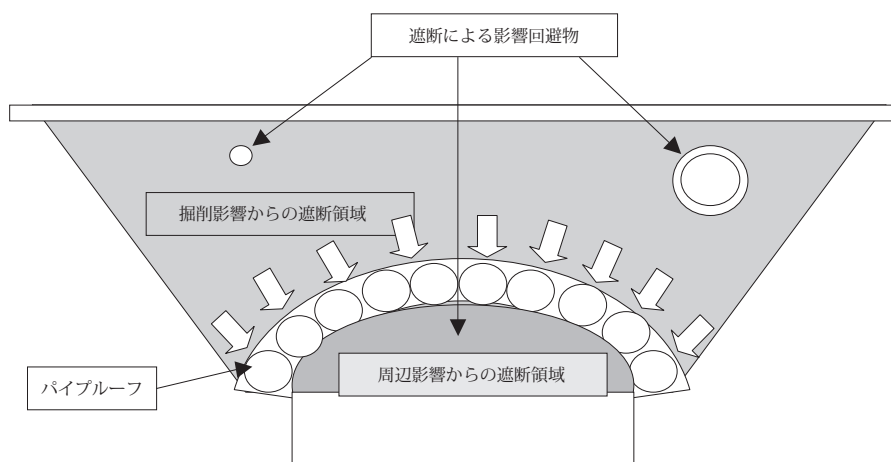


図-3 掘削断面上部のパイプアーチ形成による影響遮断

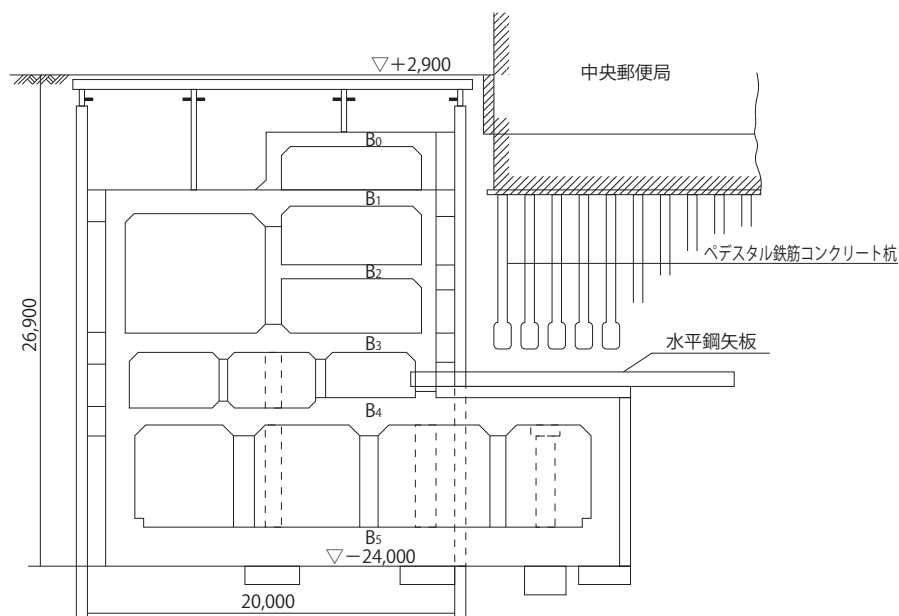


図-4 アンダーピーニングにおけるパイプルーフ配置図

との多くの報告があった。そのため、1970～1980年の鋼管の打設精度の指標は、表-1に示すような延長距離に対する精度指標となっている³⁾。よって、鋼管同士の間隔や鋼管と支保工との間隔が広がってしまう長距離施工では、パイプルーフの採用は見送られることもあった。

その課題を解決する方法として、採用されたのが密閉型推進工法であった。海外においては、1982年にシン

表-1 パイプルーフ工法による鋼管打設(孔曲り)の精度

工種別	誤差
継手付き鋼管圧入工法	1/100～1/200
継手なし鋼管回転圧入工法	1/200～1/300

ガポールの繁華街における歩行者用地下通路で、泥水式推進工法によるパイプルーフ施工が実施されていたが、国内で密閉型推進工法によるパイプルーフが本格的に利用されたのは、1990

年代になってからであった。下水道管路を高精度に敷設可能な方向制御機能を有した密閉型推進を利用することで、長距離施工のパイプルーフでも、高精度の鋼管敷設が実現可能であると考えられたのである。ただし、採用に当たっては、単に下水道で利用されている掘進機を利用するのではなく、パイプルーフの継手凸部も掘削可能な掘進機とし、凸部の抵抗が掘進方向制御に影響を及ぼさない掘進機が開発された。図-5に継手凸部掘削装備掘進機を示す⁴⁾。この掘進機を用いて、1993年に約130mのトンネルで泥水式推進工法によるパイプルーフ施工が採用され、初めて1スパンで100mを超えるパイプルーフ施工が行われた。また密閉型推進工法の利用は、打設精度や施工延長の改善だけではなく、打設する土質の適用範囲も拡大し、地下水のある未固結地山においても地盤改良を実施せずにパイプルーフ工法が施工可能となった。

上記に述べたように密閉型掘進機のパイプルーフへの適用は、パイプルーフ工法が初めて採用されてから約25年が経過している。その理由の一つとして、密閉型掘進機は到達立坑が必要

である掘進方式であったことが挙げられる。一般的に先受け工法として用いられていたパイプルーフ工法は、到達立坑の概念はなく、山岳工法などの到達立坑がないトンネルにおいては、密閉型掘進機の採用は不可能であった。しかし、高精度なパイプ打設が可能で地下水下でも施工が可能な密閉型掘進機での良好な実績が確認されると、直に到達立坑が不要な回収型密閉型掘進機の需要が高まり、1995年には到達立坑が必要のない推進管内回収型泥水

式掘進機が開発され、到達立坑がない場合でも、パイプルーフの施工が可能となり、それ以後密閉型推進工法を利用したパイプルーフの採用は増え、最近では、1スパン150mのパイプルーフが実施されている。また掘進技術だけではなく、鋼管接合においても技術の進歩がみられる。パイプルーフ鋼管接合は溶接で実施されていたことから、鋼管径が大きく、鋼管が厚くなると溶接に時間を要し、大断面トンネルでパイプルーフの施工本数が多い場合は工期が長期になってしまう課題があった。しかし、2000年に入ると、パイプルーフの鋼管接続方法も溶接接合を必要としない機械式継手の接合方法が適用され、工期の短縮が可能となった。図-6にパイプルーフ鋼管継手例を示す⁵⁾。

パイプルーフ工法は、一般的には比較的土破りが少ない場合での地下空間築造技術であったが、近年では、土破りが深い場合における地下空間築造にも活用されている。トンネルの分岐合流部や接続トンネルの施工を非開削で実施するための技術としてのシールドトンネル間接続トンネルやシールド間

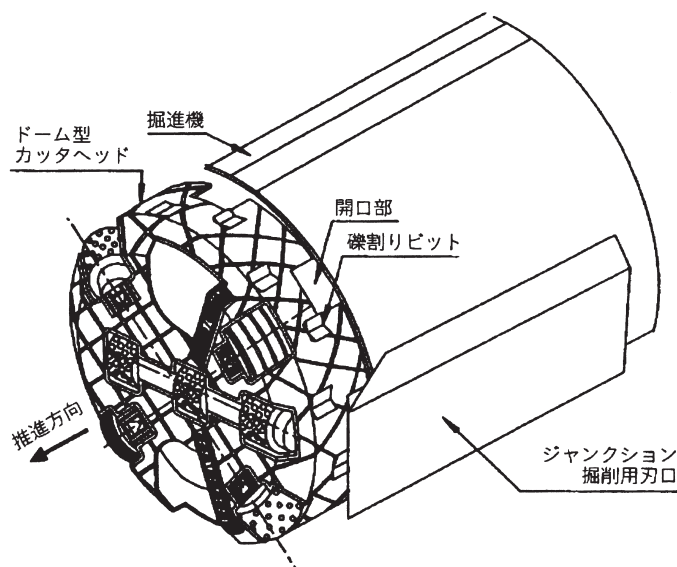


図-5 継手凸部掘削装備掘進機

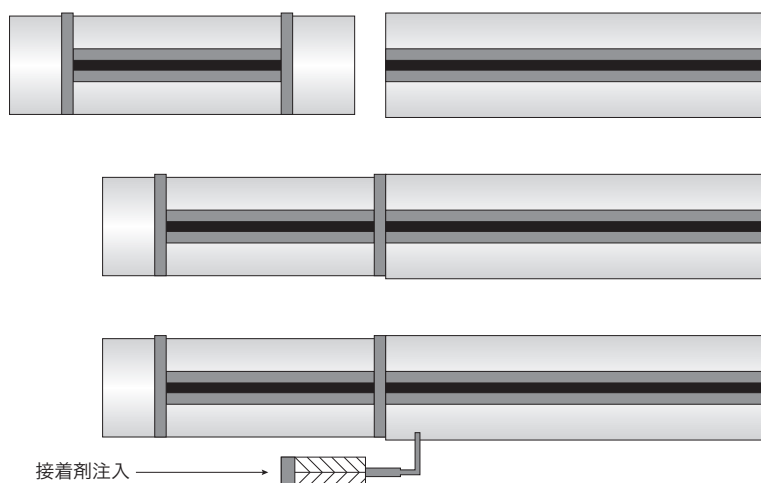


図-6 パイプルーフ鋼管継手例

の切掘り工事へ適用などである。小口径管を曲線で敷設し、一定空間の防護を行う NEW TULIP 工法やシールド間切掘りのための先行切梁工法などがある。これらの施工は、工期短縮のためのシールド施工との同時施工とシールド間鋼殻の高精度な施工が求められているが、これらにも推進技術の応用が使用され、狭い空間の中での施工は、下水道推進で培われた推進設備小型化の技術、高精度施工についてはトータルステーションによる自動測量技術が取り入れられたことで実現されている。そして、これらの技術は、トンネル掘削のための補助工法からパイプルーフで閉合された大断面トンネル空間築造や大深度施工においても適用される工法として、注目されている。図-7に曲線パイプルーフ施工による非開削地下大空間構築例を示す⁶⁾。

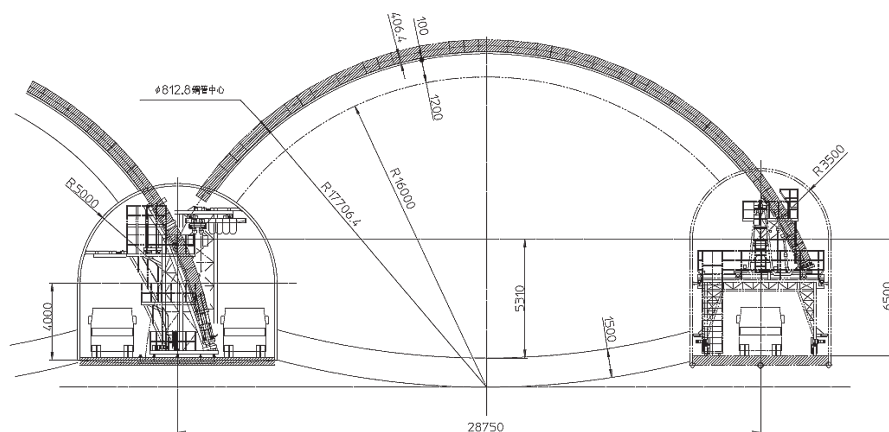


図-7 非開削地下大空間構築

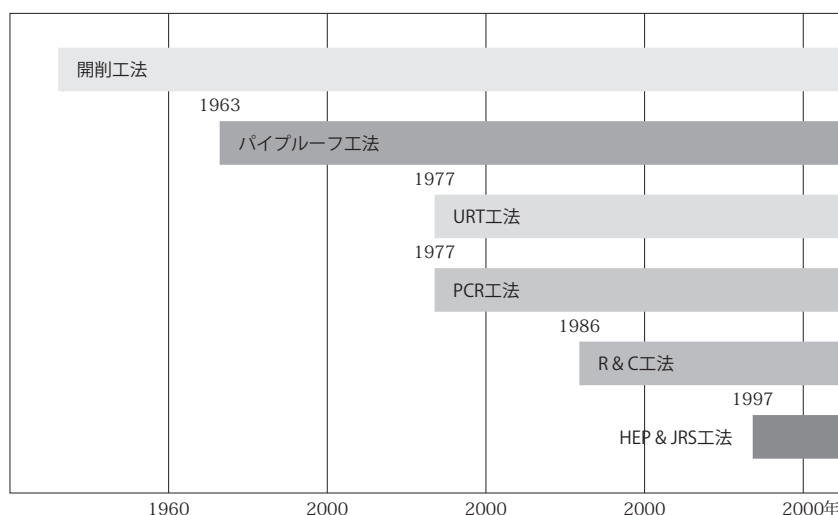


図-8 交差構造物の各構築工法の変遷

4 矩形掘進による地下空間築造

矩形型推進による地下空間築造は、主に鉄道下のトンネル築造で利用され、パイプルーフ工法の施工から約15年後の1977年にURT工法、PCR工法による施工が実施されている。それ以後、1986年にR&C工法、1997年にHEP&JES工法が順次開発されている。図-8に交差構造物の各構築工法の変遷を示す⁷⁾。

パイプルーフ工法との相違は、パイ

プルーフ工法のほとんどはトンネルを掘るための仮設工であるが、これらの工法で敷設されるものは、直接本設利用される構造物や本体構造物と置き換えることが可能な工法である。このた

め、土被りや既設構造物までの距離が少ない場合でも施工できるのが大きな特徴である。写真-3に矩形型ルーフ配置例、図-9にパイプルーフ工法との土被り比較を示す⁸⁾。

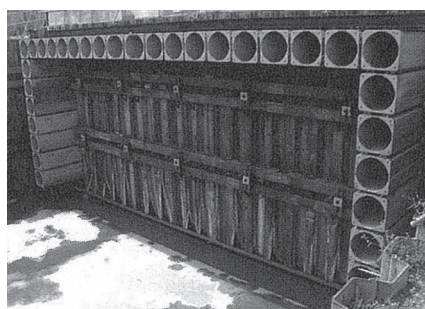


写真-3 矩形型ルーフ配置例

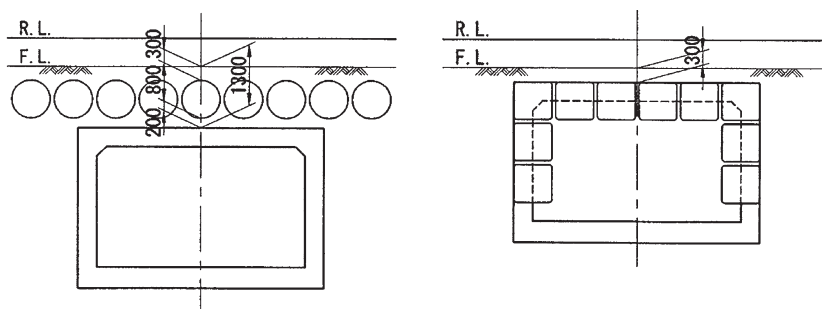


図-9 パイプルーフ工法との土被り比較

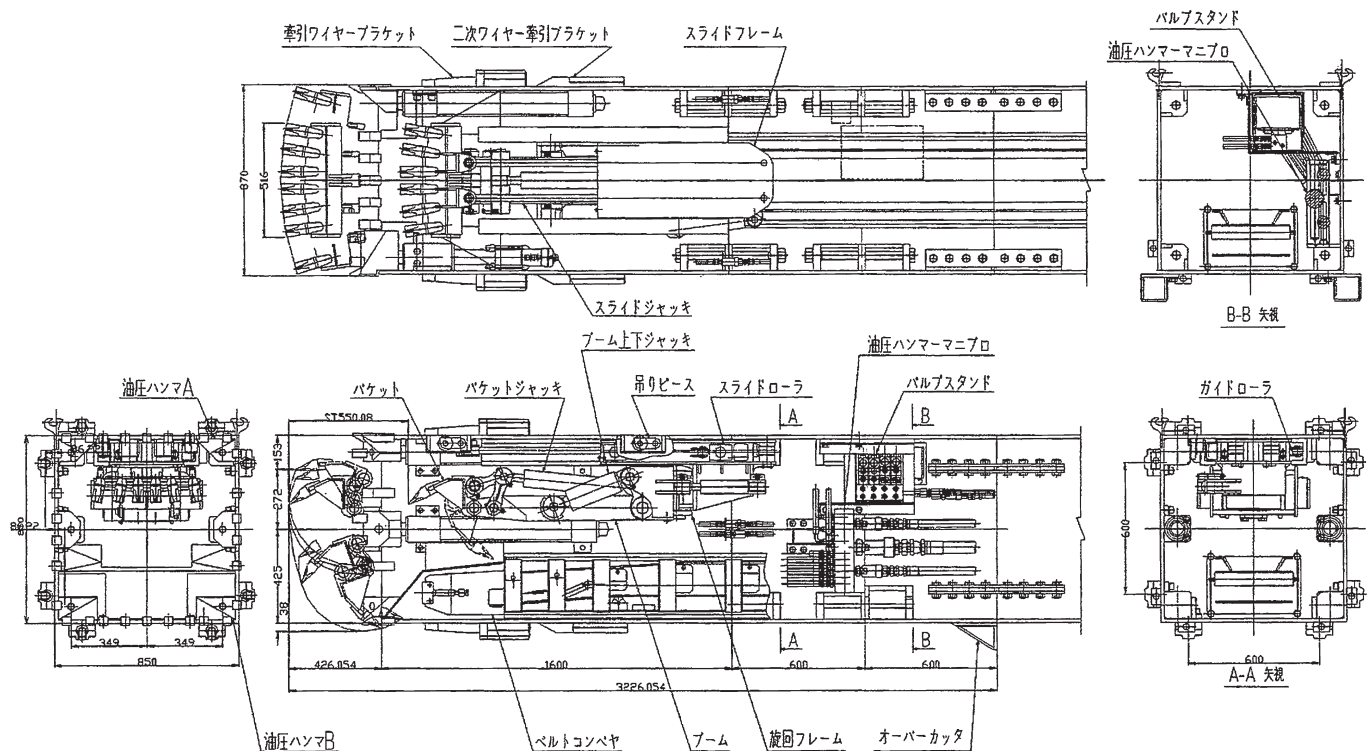


図-10 ハンマバケット式掘削機械

これらの工法は、直接本体利用されることから、高精度な施工が求められるため、一般的には普通推進（人力施工方式）を用いての慎重な施工が必要としている⁸⁾。しかし、機械式掘削方式についても、独自の矩形断面掘削機推進技術の進歩が図られ、R&C工法についてはパドル式掘削機、HEP&JES工法については礫対応掘削機械等が開発され人力掘削では断続的であった礫質土の掘削を効率的に掘進できる掘削機が活用されている。図-10にハンマバケット式掘削機械を示す⁹⁾。

矩形掘進による地下空間築造については、小断面矩形断面掘削の組み合わせによるトンネル築造が行われる一方、近年では、中断面矩形掘削の組み合わせもしくは単独矩形断面によるトンネル築造も増加している。これらの数メートル角の中断面矩形掘削機は、小断面矩形推進とは異なり、普通推進のような開放型ではなく、土圧式等

の密閉型掘進機の採用が多くなっている。これは、掘削面が大きくなることによる周辺への影響を考慮しての施工であると考えられる。また最近の各々の掘進機には、精度確保のためのローリング制御機構が備えられている。かつての矩形掘進では、敷設精度を確保するのが課題であった。それは矩形掘進特有であるローリングが推進精度に与える影響への対処が十分でなかったことが考えられるが、現在はその対処も進み、矩形断面掘削対応への推進技術の進歩がみられる。

また矩形掘進においては、さらに斬新なトンネル形成方法を行う工法が開発されている。コンパス工法、SFT工法など、周辺地山に対しては、推進技術を利用した小断面掘削を行うことから、その後に、断面全てを新しい構造物に置き換える方法であるが、これらの方法も外周面と内周面の施工共に

推進技術が活用されている。

5 小断面掘削の融合による地下空間築造

パイプルーフに代表される推進工法による小断面掘削の連続による地下空間築造は、様々な用途に利用されてきた。これらの工法は、単に推進技術だけで成り立っているのではないが、その要素技術としての推進技術の役割は、非常に大きく、下水道等の管路敷設の推進技術進展が他の技術と融合して、小断面掘削によるトンネル築造工法が多く開発されてきた。これらの工法が採用される理由としては、下記のような項目が挙げられる。

- ①推進機を汎用的に利用するこれらの工法は、距離10mから300m程度の小距離トンネルでは、シールド工法などと比較すると経済的に築造できる
- ②都市部では、すでに地下建築物が輻輳しており、大断面での掘削は困難

である

- ③限定された施工ヤードからの需要に対応できる
- ④密閉式掘進方式の活用で、土質や地下水の有無に制限されことなく、施工が可能となった
- ⑤小規模断面での施工のため、周辺地山や近接する既設構造物に対して与える影響を軽減できる

しかし、⑤については、小断面の施工の場合でも、広範囲に複数連続的に地山掘削する本工法は、開放型掘進方式、密閉型掘進方式で影響の大小差はあるが、施工本数の増加とともに、周辺への影響が大きくなることが分かっている。このため、いずれの掘削方法においても、周辺影響予測ならびにモニタリングは極めて重要であると考えられる。

今後の本技術の動向としては、パイプルーフや小断面矩形推進においては、普通推進で2連式断面での施工が実施され、その施工効率を上げている例があり、密閉式掘進機においても、近い将来には採用される技術であると考えられる。写真-4に密閉型泥水式2連掘進機を示す。

次に小断面での掘削では、狭い空間ゆえの機械製作に工夫の限界があることもあるためか、高速掘進に着手する研究開発が見当たらないが、目的とするトンネル築造の工期、工費短縮に繋がる重要な項目であり、こうした研究が進展することが期待される。

最後に、周辺地山に対する影響抑止の技術である。周辺への影響軽減に関しては、裏込め注入の役割が重要との認識は嘗てからあり、いくつかの技術開発が行われていた。しかし、実施工

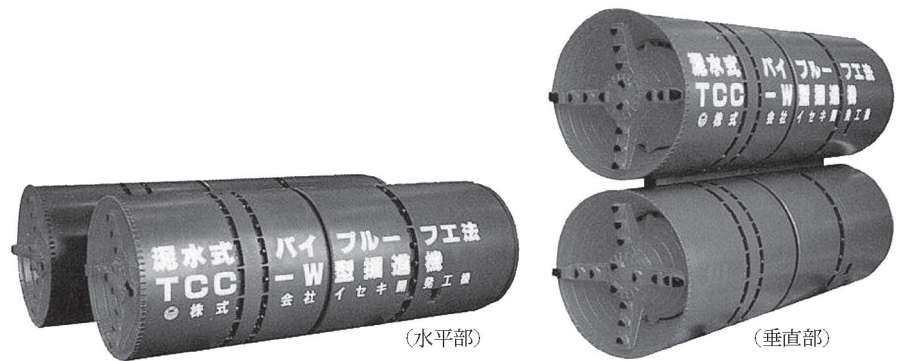


写真-4 密閉型泥水式2連掘進機

での裏込め注入による効果が確認できるデータや報告は少なく、周辺地山の影響効果のある裏込め注入の材料や方法の開発は遅れていたと言わざるを得ない状況である。周辺地山への影響を抑止できる方法は、地下空間築造工法の重要な要素技術であり、今後の進展が期待される。

これからも、地下道路トンネルの築造や交通機関の連携強化のための接合部や分岐・合流部の施工、道路、鉄道等で分断されている生活路線の確保など、これからの社会生活を豊かにするための地下空間利用の需要は多くある。そして、地下構造物の施工は、地下構造物の輻輳化による立地条件の厳しさから、さらに非開削工法での施工が求められており、その要望に応えるべくさらに地下空間築造技術が進展することが期待されている。

【参考文献】

- 1) 斎藤重治：トンネルにおけるパイプルーフ工法・地盤、理工図書、pp.20-22,1982
- 2) 山田幸夫：ケーモ工法とその応用「土木技術」、pp.54-62,Vol.52,No.4、土木技術社

- 3) 萬沢哲雄：パイプルーフ工法入門「トンネルと地下」、pp.47-50,Vol.8,No.12、土木工学社
- 4) 楮山誠他：泥水式アングルモール「土木技術」、pp.63-71,Vol.52,No.4、土木技術社
- 5) 並川賢治他：異型式鋼管接着継手を有するパイプルーフ工法、pp.541、土木学会第57回年次学術講演会
- 6) 曲線パイプルーフ技術資料、ジェオフロンテ研究会、pp.43,2005
- 7) 渡辺明之：閉合形状に曲げ加工した鉄筋の重ね継手の耐力に関する実験的研究、pp.3,2004
- 8) アンダーパス技術協会：アール・アンド・シー（R&C）工法技術資料・積算資料、2008
- 9) 長尾達児：急がれる立体交差化整備事業“アンダーパス工法”急速施工への展開「日本プロジェクトリサーチ」、pp.40-51,2006
- 10) 岡本隆史他：ボックスカルバート推進工法による矩形空間の構築技術「月刊推進技術」、pp.6-19,Vol.52,No.4,2010