

小口径用掘削機「マイクロジョン」搭載 マイクロジョン式シールドの開発

Development of Shield with "Micro John" a Small Diameter Tunnel Excavator

汐崎 実* *Shiozaki Minoru*

杉村信一* *Sugimura Shin'ichi*

シールド形式には、機械掘りシールド、半機械掘りシールド及び手掘りシールドがある。その中で、バケット式掘削機を搭載した半機械式シールドは応用範囲が広く、種々の地質が掘削の対象となる。日立建機株式会社は、バケット式シールドのシリーズ化を図る中で、小口径用のマイクロジョン掘削機を搭載したマイクロジョン式シールドを開発した。

本機は圧縮強度 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ の軟岩までを掘進する全断面掘削シールドで、掘削機をコンパクト化してなお全断面掘削が可能となる構造が特徴である。

種々の土質について計画掘進能力を実績と対比して検討した結果、所期の成果が達成されたことを確認するとともに、またコンクリート掘削実験により、軟岩層掘進が可能である見通しも得た。

1 緒 言

我が国で、上下水道、地下鉄、電話・電力ケーブルなどのトンネル施工にシールド工法を用いることが一般化して約20年になるが、初期は手掘りシールドが多く、近年は機械掘りシールド、半機械掘りシールドなど機械化シールドが増加している。

半機械掘りシールドは、油圧ショベルなどの掘削機を装備したシールドで、日立建機株式会社ではジョン式シールドの呼び名で、小口径から大口径までのバケット式掘削機付シールドのシリーズ化を図り、今回小口径用のマイクロジョン式シールドを開発した。本機の掘進実績も得られたので、マイクロジョン式シールドについて述べる。

2 シールドの形式と選定

シールドを大別すると機械掘りシールド、半機械掘りシールド、及び手掘りシールドに分類される。機械掘りシールドは、切羽面に密着したカッタヘッドを回転して、切羽全断面を連続的に掘削し、ズリ(muck)を後方に排出する機能を持つシールドである。半機械掘りシールドは、油圧ショベルや回転カッタなどの動力機械を用いて切羽の一部、又は大部分の掘削とズリの積込みを行なうシールドである。掘削、積込みに対し、つるはし、ピック、スコップなどを用いて人力で掘進するものを手掘りシールドという。

切羽が軟弱な地層に対して、切羽の崩壊を防ぐため、シールド前面に隔壁を設け土砂の流入を制限する形式を閉そく形と称し、そうでないものを開放形という。手掘りシールドの閉そく形をブラインドシールド、機械掘りに隔壁を設けて泥水加圧を行ない、切羽の安定を図る形式を泥水加圧シールド、また泥土加圧を行なうものを泥土加圧シールドという。

シールド形式の選定は、施工区間の地質条件、工期、延長、地表の状況、掘削や覆工などの施工性を考慮し、安全で経済的に工事を行なえるものを選定しなければならない。一般的な選定の目安は表1¹⁾に示すとおりである。

開放形手掘りシールドは、簡便で種々の地質に適用するが掘進速度は遅い。ブラインドシールドは、軟弱粘性土層に適

表1 シールド形式の選定 半機械掘りシールドの適用範囲が広い。

地 質	シールド形式	手 掘 り		半機械掘り	機 械 掘 り	
		開 放	ブラインド		一 般	泥水加圧
粘性土	軟弱粘性土	—	○	—	—	○
	固い粘性土	○	—	○	○	—
砂 層	ルーズな砂層	—	—	—	—	△
	締まった砂層	○	—	○	○	—
砂礫層	ゆるい砂礫層	△	—	—	△	○
	固結砂礫層	○	—	○	○	—
玉石、転石層	○	—	○	—	—	
軟岩、土丹、泥岩	—	—	○	○	—	

注：○印 適当，△印 可能

用し隔壁に空けた窓から土を絞り出して推進する。半機械掘りシールドは、開放形となるから自立しない切羽には向かないが、それ以外は粘性土から軟岩に至るまで応用が利くシールドである。一般機械掘りシールドは、自立する地層に適用し進行は速い。また泥水加圧シールドは、軟弱地質に適用する。表1はごく一般的な選定基準であって、地山安定処理の補助工法を含めて検討し形式を決定する。

3 バケット式掘削機付シールド

半機械掘りシールドは、切羽の安定する地山であれば、幅広い地質範囲に使用される。なかでもバケット式掘削機付シールドは、バケットでの掘削、積込みが兼用できること、玉石、転石層で、回転カッタ式はビットが玉石、転石に当たり破損しやすいという欠点を持つのに対し、玉石、転石を掘り起こす方法で掘削できること、硬土質に対してもリッパ力を上げて掘削できることなどの長所により、多用されている。

日立建機株式会社はバケット式掘削機付シールドのシリーズとして、ジョン式シールドとマイクロディック式シールドのシリーズ化を図っている。ジョン式シールドは、ビッグジ

* 日立建機株式会社土浦工場

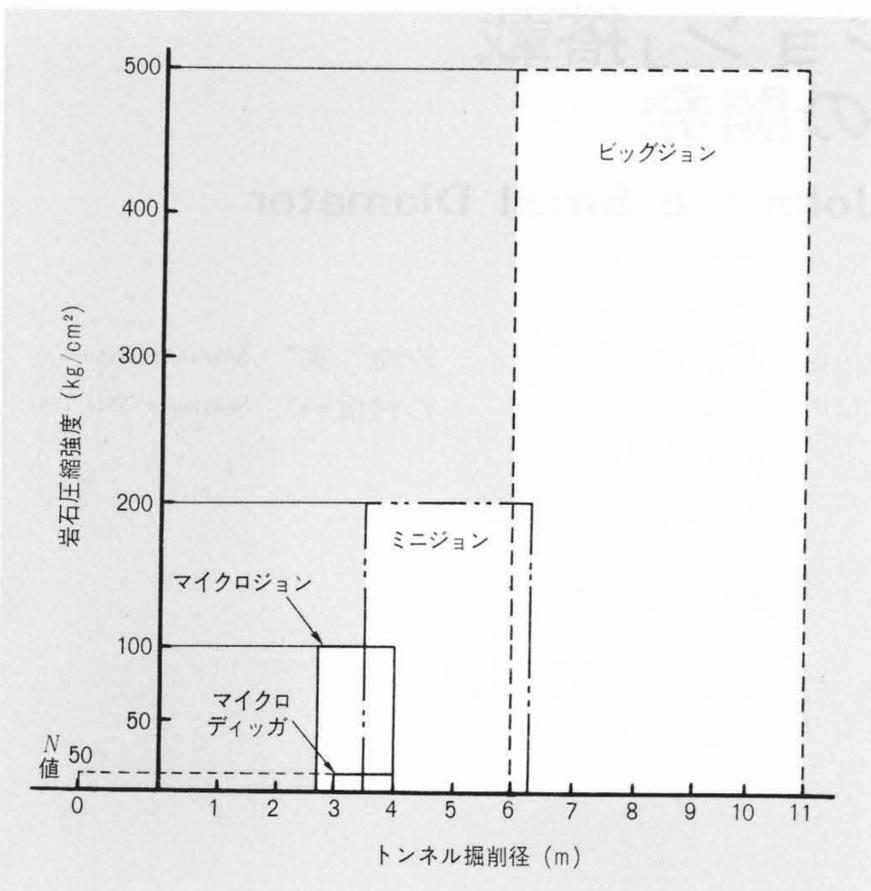


図1 バケット式掘削機付シールドシリーズの全断面掘削の場合の掘削範囲 適用岩石強度と掘削径の関係を各機種について示した。

オン、ミニジョン及びマイクロジョンの3機種であり、マイクロディッガが1機種である。図1は、本シリーズの全断面掘削の場合の掘削径と地質強度の適用範囲を、表2は、ジョン式掘削機的主要仕様を示すものである。

ビッグジョンは、大容量・大口径用で掘削径6mφ以上、500kg/cm²の中硬岩まで掘削できるが、それ以上の硬岩に対しては発破併用で掘進する。ミニジョンは、掘削径3.5~6.3mφ、圧縮強度200kg/cm²までの軟岩を対象とし、それ以上は発破併用となる。

マイクロジョンは、更に小形・小容量となり掘削径2.6~4.0mφ、土丹ないしは圧縮強度100kg/cm²までの軟岩を掘進する。マイクロディッガは、積込みを主体とした掘削機であるので、N値50以下の粘性土、砂礫層掘進に使用され、掘削径も3~4mφと限定される。

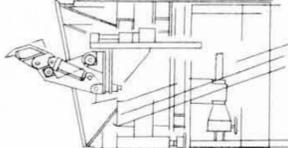
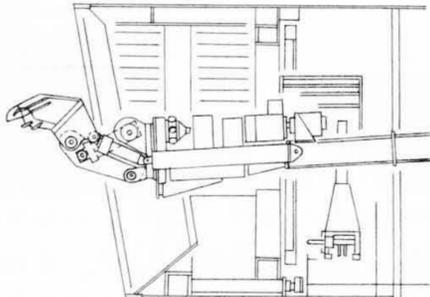
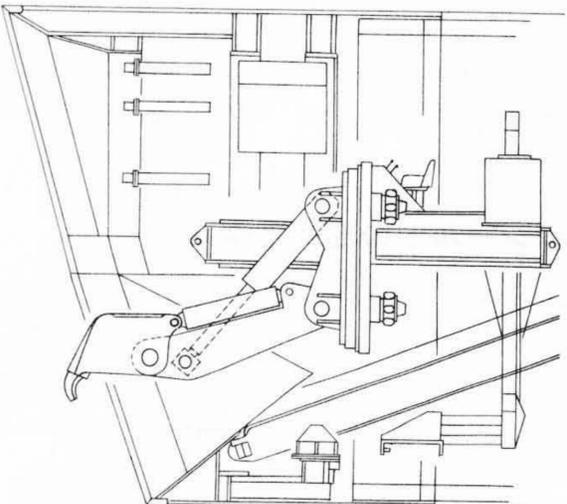
日立建機株式会社は、本シリーズの中でマイクロジョン式シールドを昭和50年に開発し、51年12月現在掘進完了が3件、稼動中が4件と掘進実績を得ている。

4 マイクロジョン式シールド

4.1 開発方針

シールド掘進機は狭いシールド空間中にコンパクトに装置をまとめ、単純化して故障率の低い機械で、かつ能力を発揮

表2 ジョン式掘削機の仕様 マイクロジョン、ミニジョン及びビッグジョンのシリーズとなっている。

項目	仕様	様		
形状及び仕様			 <p>下記の仕様は11mφ級ビッグジョンのものを示す。</p>	
適用地質	砂礫、土丹及び軟岩まで 圧縮強度=100kg/cm ² 程度	砂礫、土丹及び軟岩まで 圧縮強度=200kg/cm ² 程度	砂礫、土丹、頁岩、泥岩、凝灰岩、砂岩などの中硬岩まで 圧縮強度=500kg/cm ² 程度	
主要仕様	ブームジャッキ	46t×500s×1本	152t×710s×1本	1,000t×3,000s×1本
	バケットジャッキ	17t×375s×2本	78t×500s×2本	400t×1,100s×2本
	トラベルジャッキ	44t×910s×1本	78t×2,120s×2本	400t×3,300s×2本
	旋回	旋回トルク3t・m, 旋回速度4.0rpm	旋回トルク8t・m, 旋回速度5.7rpm	400t×1,250s×4本
	リッパカ	14t	50t(油圧350kg/cm ² 時)	350t(油圧350kg/cm ² 時)
	バケット容量	0.05~0.1m ³	0.38m ³	4.0m ³
	掻込容量	0.1~0.45m ³ /サイクル	0.4~0.8m ³ /サイクル	—
作業目的	掘削、積込	掘削、積込	掘削、積込	
作業範囲	掘削リーチ:最大2.1m 旋回角度:360度	掘削リーチ:最大2.55m 旋回角度:360度	掘削リーチ:6.7m(ただし、上方向4.3m) 旋回角度:左右110度	
適用トンネル径 (全断面掘削の場合)	2.6~4.0m	3.5~6.3m	6.0m以上	
実績最大日進	—	神奈川県相模川流域下水道4.6mφ掘進機 21m/d	国鉄山陽新幹線高塚山トンネル11m馬蹄形掘進機 24m/d	

するものでなければならない。マイクロジョン式シールドの開発方針として次の3項目を立てた。

- (1) シールド内の装置はコンパクトで、かつメンテナンスが容易な構造とする。
- (2) 圧縮強度100kg/cm²の軟岩まで掘削でき、一般土質では十分掘進速度が確保できるものとする。
- (3) マイクロジョンは土砂に埋れて掘削するので、耐摩耗、土砂と配管の当たり、シリンダのシールなどを十分配慮する。

4.2 構造及び仕様

マイクロジョン式シールドは大別して、シールドとマイクロジョン掘削機とから成り、両者が有機的に構成されて能力を発揮するものである。図2に3.9mφマイクロジョン式シールドの組立図及び仕様を示す。

シールドは、地山の崩壊を防止するシールドハルの外周部にシールドジャッキを設け、セグメントに反力を取りながら前進する。セグメントはテール部でエレクタにより組み立てられトンネル壁として構築される。シールド前部刃口はコーン状にし、シールドの前進が容易な構造としている。刃口部上部には複数枚のポーリングプレートを設け、切羽に貫入させ切羽アーチ部を支えながら、安全に掘削を行なう。また切羽の鏡面を押さえ、切羽を安定させるフェースジャッキも設けている。

マイクロジョンは、シールド内空中央に設けたランウェイに懸架され、トラベルジャッキにより前・後進する。リッパ付バケットをブーム先端に設け掘削する。ブームは、シャボールに支持されて水平軸回りに360度回転し、リッパの掘削は切羽のどの方向にも向けられるので、全断面掘削が行なえる。掘削した土砂は、シールド下部に設置したコンベヤにバケットで掻込む。積込み作業はバケット掻込み動作によるので簡単で効率が良い。

マイクロジョンで掘削積込みを行ない、セグメント1リング分の掘削が完了するとシールドを推進させ、セグメントを組み立てる工程を繰り返す、トンネル施工を進めて行く。

マイクロジョンは、コンパクトでかつ切羽全断面が掘削できるようにシャボールに取り付けているのが特徴であって、マイクロディックは垂直軸回りに回転するので、切羽上部にバケットが届かないのと、ブームがテレスコピック構造で長くなるためシールドが長くなる。

マイクロジョンは切羽の土砂に埋もれたまま回転することもあるので、バケット、ブームジャッキともロッドを反切羽側に設け、油圧ホースも極力短くし土砂にもまれないようにしている。リッパは耐摩耗鋼の交換可能形を用い、ランウェイにも耐摩耗鋼を使用して、それぞれ摩耗対策を行なっている。図3にマイクロジョンの写真を示す。

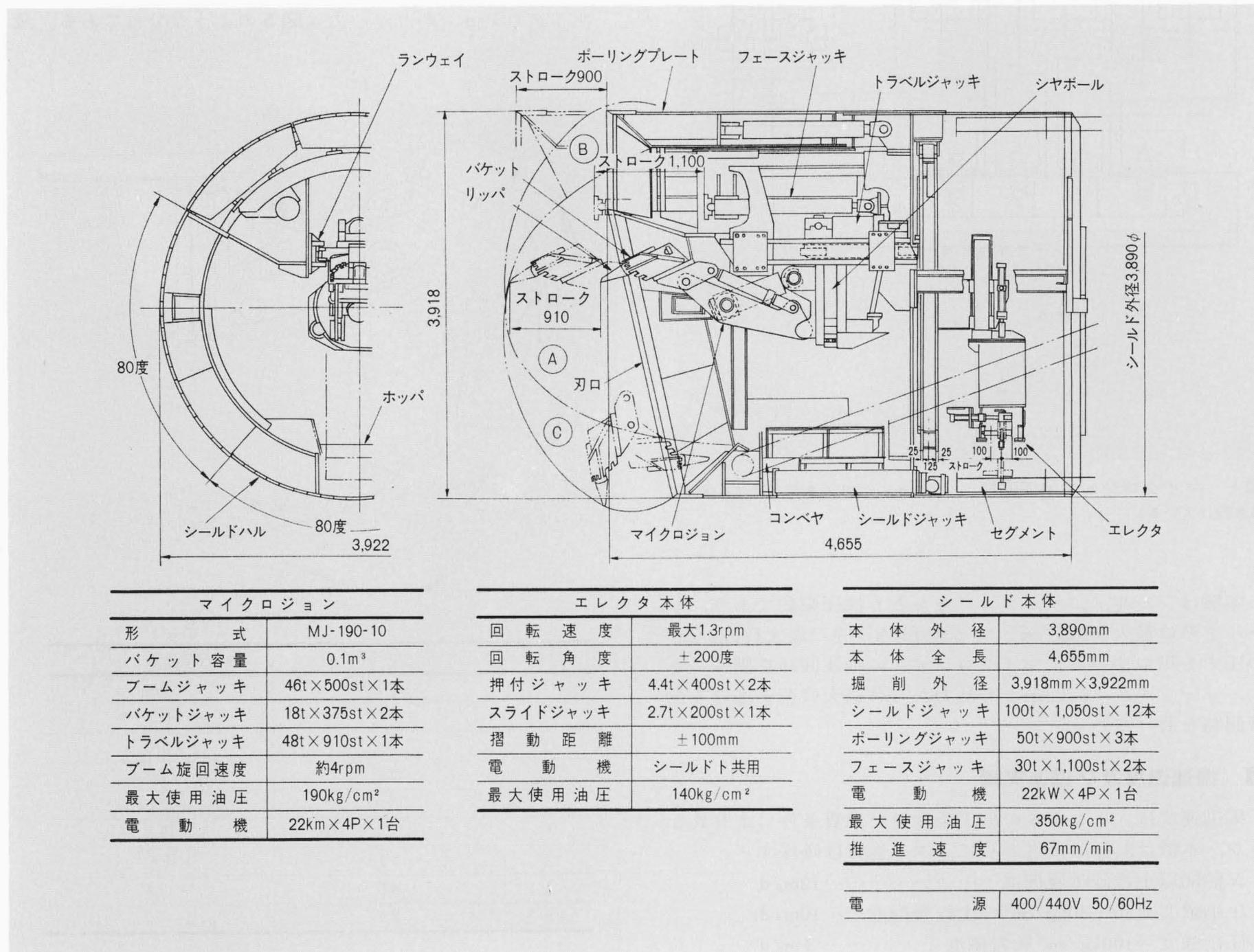


図2 3.9mφマイクロジョン式シールド シールド内空中央にマイクロジョンを懸架し、全断面掘削を行なう。

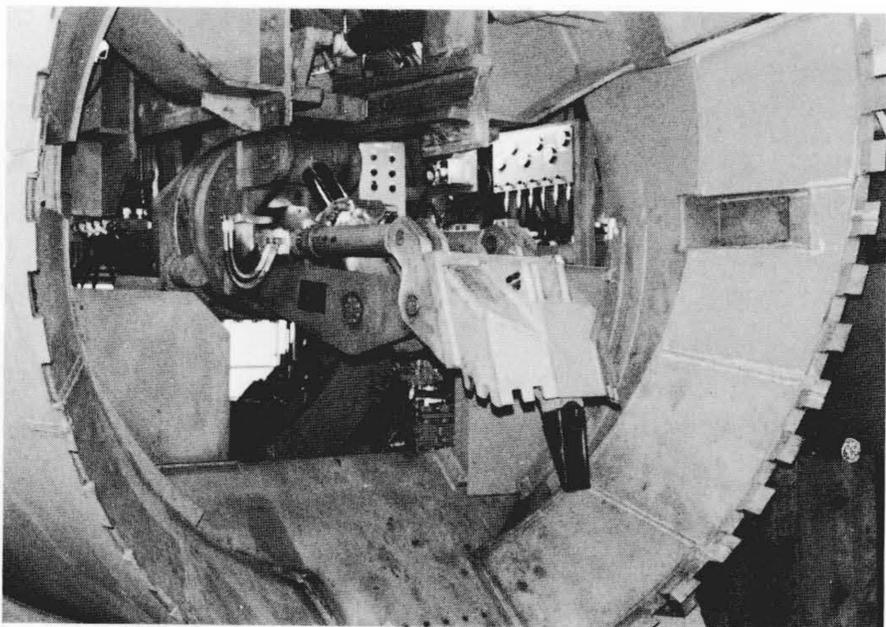


図3 マイクロジョン コンパクトにまとめ、ジャッキのロッド、ホースが土砂に当たらないようにしている。

りむしろバケットによる搔込みの積込み作業で掘進が進められる。マイクロジョンの搔込み容量は、(バケット幅0.8m時)

$$V_L = \text{バケット幅} \times \text{高さ} \times \text{ストローク} \times \eta \times \text{サイクル} \\ = 0.8\text{m} \times 0.75\text{m} \times 1.1\text{m} \times 0.65 \times 2 = 0.9\text{m}^3/\text{min}$$

3.5mφ断面、0.9m幅セグメント掘進として、1リング土砂容積は、 $V_R = \text{断面積} \times \text{セグメント幅} \times \text{膨張率} = 11.3\text{m}^3$

1リング積込み時間 = $V_R / V_L = 13\text{min}$ 、よって軟弱地層では掘削積込みを含めて20minあればよい。

シールド推進時間は、

$$T_S = \text{セグメント幅} / \text{ジャッキ速度} = 900 / 60 = 15\text{min}$$

1リングのシールド掘進時間は、

$$T_R = \text{掘削} + \text{積込} + \text{推進} + \text{セグメント組立} + \text{その他} \\ = 20 + 15 + 30 + 5 = 70\text{min}$$

1日20時間作業とすると、

$$1 \text{日あたり進行} = \frac{20 \times 60}{70} \times 0.9 = 15.4\text{m/d} \text{となる。}$$

株式会社間組厚木作業所の4.65mφ、N値=8~10のシルト層で、最大13.5m/dの実績があり、3.5mφに換算すれば十分上記の15.4m/dの値を達成している。

5.2 砂礫層及び土丹層の掘進

締まった砂礫層、土丹層の掘進は、図2でまずマイクロジョンで切羽中心部Aの心抜き掘削を行なう。次に切羽上部のポーリングプレートを貫入させ、B部を剪断で落とす。これは発破工法の心抜き発破と同じ効果である。最後に切羽下部Cの掘削を行なう。

マイクロジョンのリッパ力は図5のような分布である。最

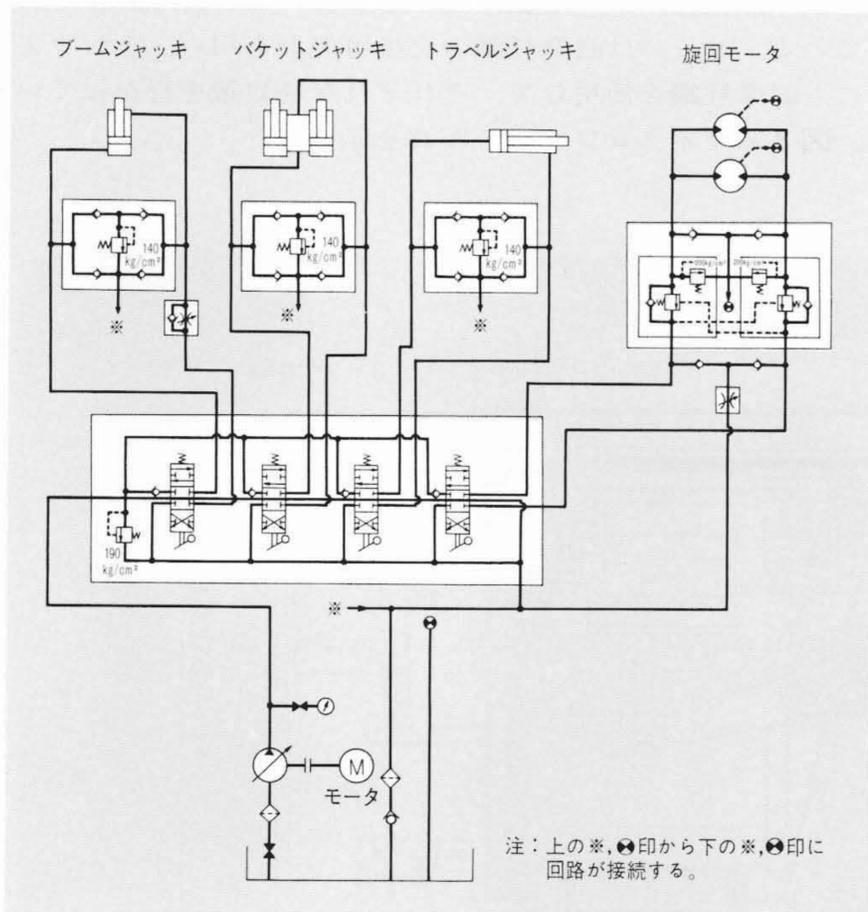


図4 マイクロジョン油圧回路 外力からの過大負荷を逃げる保護回路を設けている。

本機はシールド、マイクロジョンとも油圧駆動であり、シールド系は最大350kg/cm²、マイクロジョン系は最大190kg/cm²の圧力を用いている。マイクロジョンの油圧回路を図4に示す。ジャッキ系、回転系とも外力からの過大負荷を逃げる保護回路を設けている。

5 掘進速度及び掘進実績

掘進速度は、トンネルの施工条件及び地質条件により異なるが、本機は3.5mφ掘進として、次の進行は確保する。

N値50以上の砂礫層掘進……………12m/d

圧縮強度=20~30kg/cm²の土丹層掘進……………10m/d

圧縮強度=100kg/cm²軟岩掘進……………3m/d

5.1 軟弱な自立切羽の掘進

切羽は自立するが、比較的軟弱である地層は、掘削するよ

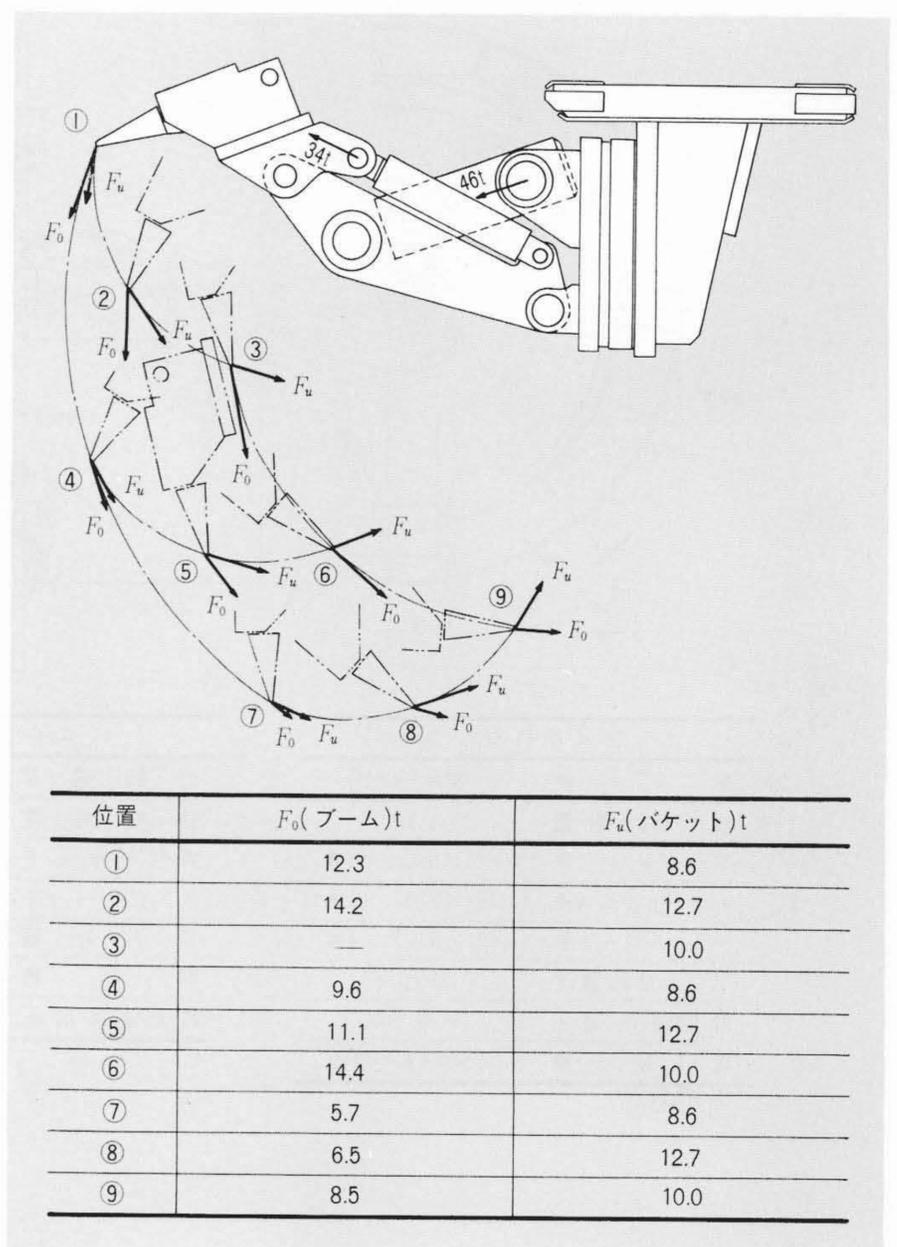


図5 マイクロジョン リッパ力 最大14.4tの強力なリッパ力を持っている。

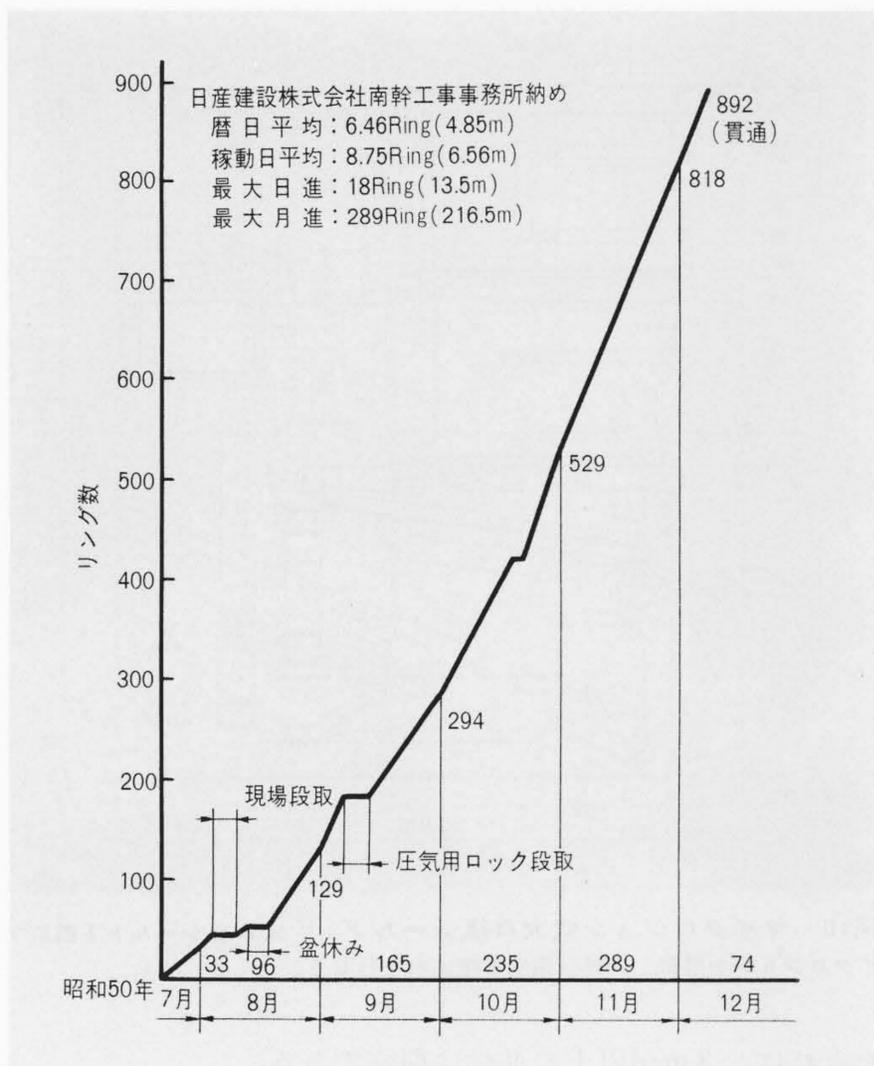


図6 2.9mφマイクロジョン掘進実績 土丹層掘進で最大日進13.5m/dを出している。

大14.4tのリップカは37t級ブルドーザの2本爪リップングの場合の13.4tクラスに相当する強力なものである。

リップカ F と土の圧縮強度 p の関係は、概略 $p = \frac{F}{xl}$ と置くことができる。ここに x は切込み深さ、 l はリップ幅である。リップカは図5の平均として $F = 9.6t$ 、リップ幅はバケット幅をとり $l = 0.6m$ 、圧縮強度 $p = 40kg/cm^2$ の土丹層を掘削するとすれば切込み深さは、

$$x = \frac{9,600}{60 \times 40} = 4 \text{ cmとなる。}$$

マイクロジョンの掘削容量は、

$$V_D = \text{深さ} \times \text{幅} \times \text{ストローク} \times \text{サイクル} = 0.04 \times 0.6 \times 2.5 \times 2 = 0.12m^3/min$$

3.5mφ掘削径のうち、マイクロジョンは3mφの心抜き掘削を行ない、残りはポーリングプレートで受け持たせるので、

1リングの掘削時間 = 3mφ断面容積 / $V_D = 50min$

これより、5.1と同様にして1リング掘削時間は、

$$T_R = 50 + 15 + 15 + 30 = 110min$$

1日当たり進行 = $\frac{20 \times 60}{110} \times 0.9 = 9.8m/d$ となる。この値は目標値10m/dより小さいが、株式会社奥村組東方作業所の掘削径3.4mφ、圧縮強度 = 30 ~ 40kg/cm²の土丹層掘進で最大12.6m/dの実績を挙げ、目標値を達成することができた。

5.3 掘進実績

これまでに完了した3件の掘進実績を、図6、7、8に、施工条件を表3に示す。

図6の2.9mφシールドは土丹層掘進で最大日進13.5m/dで、稼働日平均で6.56m/dである。

図7の4.65mφシールドは、シルト層及び砂礫層掘進で最大日進13.5m/d、稼働日平均4.87m/dである。この現場は湧水が多く、湧水対策のため平均進行は上がっていない。

図8の3.4mφシールドは土丹層、砂層の互層で、最大日進

12.6m/d、稼働日平均6.2m/dである。

この3例の実績から掘進は、地質、施工条件、運搬設備、稼働率などの条件により左右され、コンスタントに最大能力は発揮できないが、当初の目標能力をもつことは確認できた。これまでの使用実績から次の点について考慮を払っている。

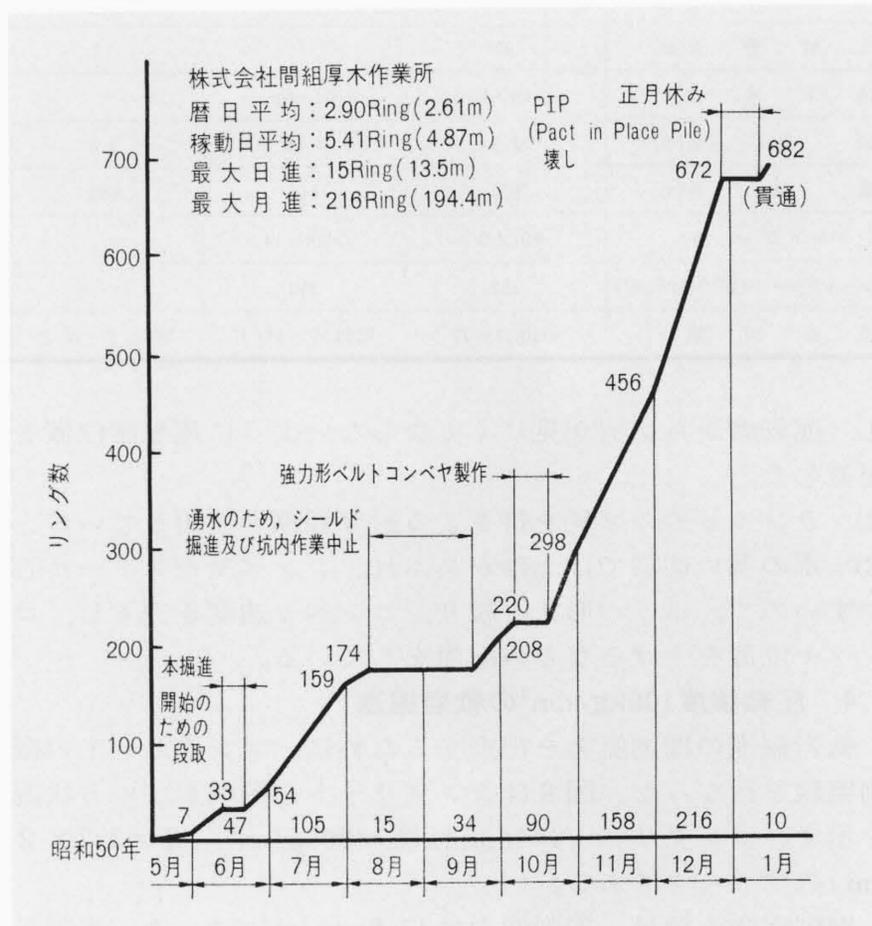


図7 4.65mφマイクロジョン掘進実績 砂礫層掘進で最大日進13.5m/dを出している。

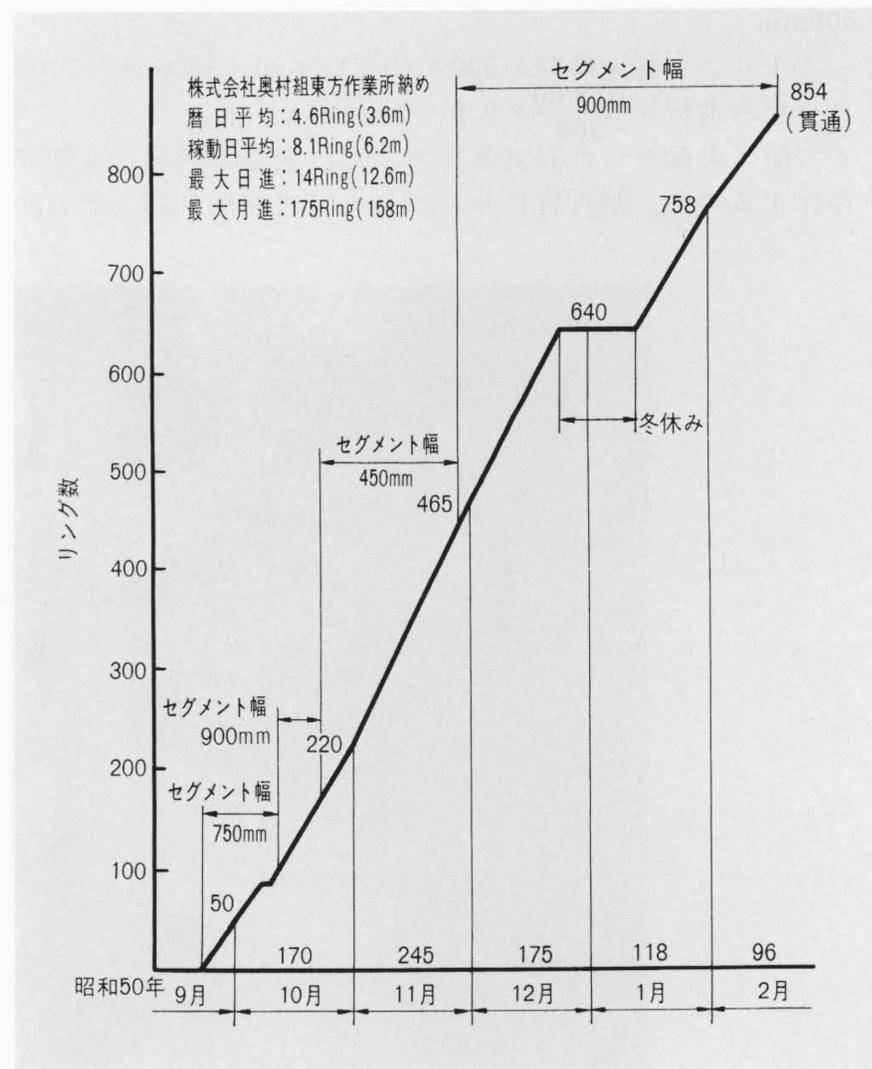


図8 3.4mφマイクロジョン掘進実績 土丹層、砂層の互層で最大日進12.6m/dである。

表3 施工条件 土丹層、砂礫層、砂層及びシルト層と各種の地質を掘進している。

使用現場名	日産建設株式会社(南幹)	株式会社間組(厚木)	株式会社奥村組(東方)
土質	土丹層、砂層、砂礫混じり土丹層	砂礫及びシルト	土丹層40% 互層砂層60%
硬さ	N>50 20~25kg/cm ²	砂礫N=30~50 シルトN=8~10	土丹層30~40kg/cm ² 砂層N>50
土被最大(m)	27	7	11
地下水位(m)	GL-1	GL-4m	—
掘削径(m)	2.9	4.65	3.4
掘削長(m)	670	614	650
シールドジャッキ	80t×8	100t×14	—
シールドジャッキ圧力(kg/cm ²)	350	350	—
掘進期間	昭50/7~12	昭50/5~51/1	昭50/7~51/2

- (1) 運転席から切羽が見にくくならないように運転席位置を配置した。
- (2) ランウェイの摩耗を押さえる耐摩耗鋼を使用している。
- (3) 水の多い切羽では土砂があふれ、コンベヤがストールしやすいので、ホッパ形状を絞り、コンベヤ速度を速くし、コンベヤ位置を上げるなどの配慮をしている。

5.4 圧縮強度100kg/cm²の軟岩掘進

軟岩掘進の掘進能力を把握するために、コンクリートの掘削実験を行なった。図9はコンクリートを掘削している状況を示す。コンクリートは圧縮強度=90kg/cm²、2×3.7×2(m)のブロックである。

掘削実験の結果、掘削能力は37.6min/m³であった。掘削径3.5mφのうち、マイクロジョンによる掘削を3.4mφ、ポーリングプレート、シールド刃口により残り0.1m分を掘削する。マイクロジョンによる掘削時間= $(\frac{3.4}{2})^2 \times 3.14 \times 0.9 \times 37.6 = 300\text{min}$

よって1リング掘進時間=300+15+15+30=360min

1日当たり進行= $\frac{20 \times 60}{360} \times 0.9 = 3\text{m/d}$ となる。

この値は実験からの計算値であって、実際の岩層には節理が存在するので、割れ目にリップを当て岩を掘り起こす方法



図9 コンクリート掘削実験 圧縮強度100kg/cm²級の軟岩掘進の可能なことが確認された。

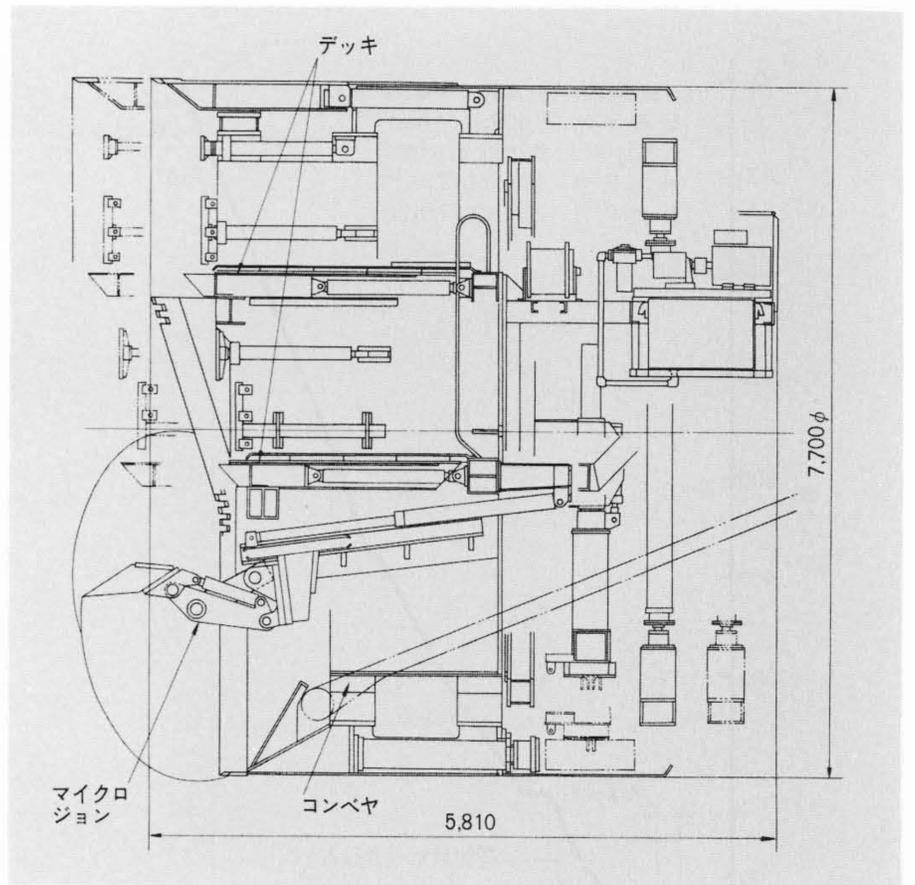


図10 マイクロジョン式大口径シールド 大口径シールド下部にマイクロジョンを搭載し、部分掘削と積込みを行なう。

をとれば、3m/d以上の進行は期待できる。

我が国の地質は変化に富み、土質トンネルルートに100kg/cm²の軟岩層が出ることがあり得る。マイクロジョン式シールドでは進行速度は低下するけれども、なんとか掘進を継続し、残りの区間で進行を挽回することがこのような場合できる。トンネル全長にわたり軟岩層である場合は、むしろ発破工法で掘進したほうが有利である。このことから、軟岩掘進で3m/dの進行があれば十分我が国の地質に対処できる。

6 マイクロジョン式大口径シールド

マイクロジョンで全断面掘削を行なう場合は、2.6~4.0mφである。大口径シールドでは図10に示すようにデッキを設け切羽分割を行ない、シールド下部にマイクロジョンを搭載する。マイクロジョンは下部の掘削積込みを受け持ち、デッキ上段は手掘りする。安定した地山の場合には、デッキを後退させ、デッキ上方をマイクロジョンで掘削し能率を上げる。

地山が硬い場合には、シールドサイド部まで掘削できるようにマイクロジョンを横行させる例もある。

7 結 言

自立する土質から100kg/cm²の軟岩層まで幅広い地質を掘削対象とした小口径トンネル用のマイクロジョン式シールドを開発した。掘進を完了した3件の実績でも種々の土質に対して成果を挙げている。3.4mφ土丹層掘進で最大12.6m/d、4.65mφシルト層掘進で13.5m/dと所期の目標を達成した。コンクリート掘削実験の結果、100kg/cm²の軟岩掘進で3.5mφ、3m/dの進行が期待できる。

最後に現場稼動に当たり適切な助言をいただいた顧客各位にお礼を申し上げるとともに、更に多くの日本の地質現場を経験していっそう改良を図る考えである。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書(シールド編)・同解説〔昭和52年版〕, p. 66