

硬岩層におけるTBM掘削について

——小河内ダム新放流施設導水トンネル——

内 田 克 己* 中 津 一 雄**
青 木 実***

要 約

TBM (Tunnel Boring Machine) は今から約120年前、アメリカで使用されたのがその起源とされ、その後数多くの機械が試作された。しかし現在にいたってもまだ断面の大きなトンネルや硬岩層においては十分な実績がない。

本工事は掘削断面径5m、一軸圧縮強度600～3,200kg/cm²の条件のもとで、掘削機として川崎ジャーバMK-17-500を使用した。その結果、MK-17-500は施工精度や破砕帯通過時の安全性、安定性においては独特のメカニズムを発揮し、好結果を得た。しかし一軸圧縮強度1,000kg/cm²以上の硬岩層において掘進速度の向上を図るには、衝撃吸収方法、カッターの形状、取付位置、取付数、取付角度およびスラスト荷重等に考慮の余地があることがわかった。

目 次

- § 1. まえがき
- § 2. 工事概要
- § 3. 施工実績
- § 4. 考 察
- § 5. あとがき

§ 1. まえがき

小河内ダム（奥多摩湖）は多摩川の上流に位置し、都の上水道水源のうちでは緊急時放水用貯水池の役割をになっている。普段は満水状態を保っておき、利根川水系、その他の渇水時にこの貯留水を一挙に放流して、都の給水計画に破綻のないように計画されている。このため現在のダム放流施設の放水量毎秒21.5tでは不足であり、新たに最大毎秒30tの放流が可能な取水設備を築造する必要があった。新取水設備築造工事は、取水庭、取水口、導水トンネル、バルブ室、放水庭から成る。この工事は、無効放流が許されず、常に満水状態で工事を行なう必要があり、かつ既存の諸施設、地盤に悪影響を与えないことが絶対条件になり、種々漸新なアイデアおよび工法が採用された。このうち、本報告書ではTBMによる導水トンネルの施工について述べ、掘削機の構造と施工結果を中心にまとめ、これらから得られた問題点と今後の対策について述べる。

§ 2. 工事概要

2-1 施工概要

本トンネル工事は、東京都西多摩郡奥多摩町原5番地先の秩父多摩国立公園特別指定区域に属する小河内ダムの上流左岸130m地点で、既存余水吐（当社施工）に平行し施工される。

掘削はφ5.0mのTBM(Tunnel Boring Machine)により施工する。これは、近隣する既存構造物（小河内ダム、余水吐等の重要構造物）の防護と、岩盤に亀裂が発生し湖水が漏水するのを防止するために採用されたものである。

掘削方法として、発進部に捨支保工を組立て、切羽部に鏡コンクリートを打設した後、坑口から直接TBMにより掘削を開始し、掘削終了後坑口までバックにて自走させ搬出する。

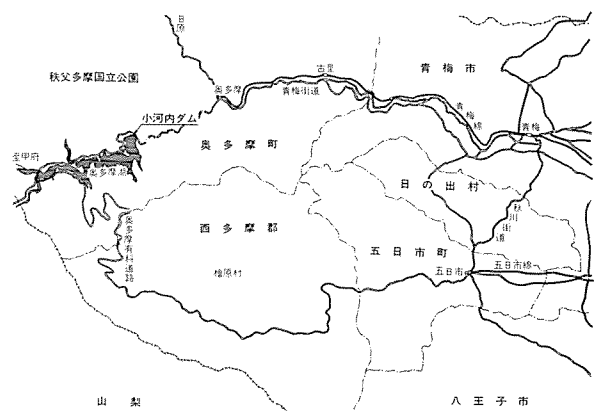


図-1 位置図

* 関東(支)小河内(出)
** 関東(支)小河内(出)機械係長
*** 関東(支)小河内(出)土木係長

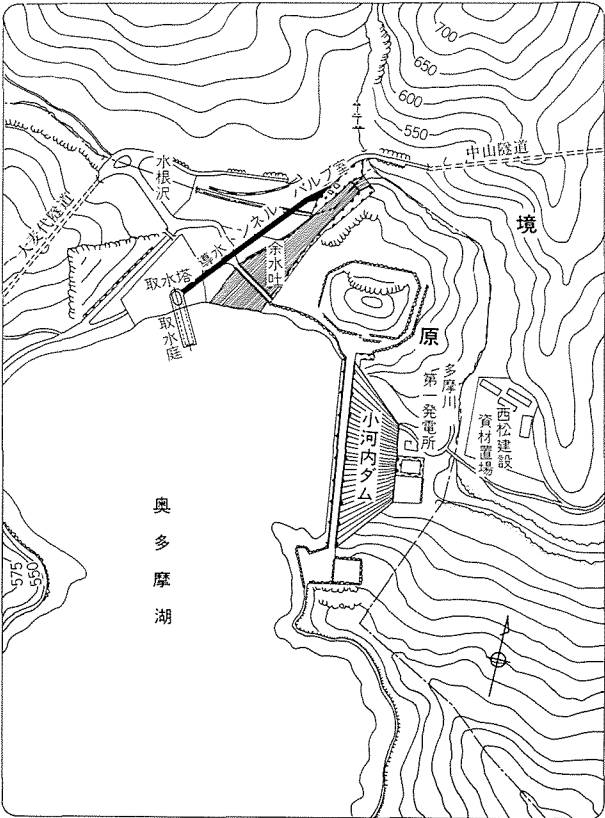


図-2 一般図

表-1 TBM施工工事内容

施 工 延 長	212.29 m
勾 配	1 / 1,000 上り
施 工 断 面	
掘 削 断 面 径	5.0 m
仕 上 断 面 径	3.8 m
覆 工 卷 厚	60 cm
支 保 工 (標 準 部)	円形 H-100 P-1.5 m

2-2 地質

小河内ダム工事誌によると、ダム地点の地層は中山層に属し、鳥ノ巣型石灰岩やチャートを挟む厚さ1,600mの砂岩、粘板岩層である。

掘削工事に先立ち、現地盤（E L 530）より検査ボーリング、水根沢坑口より水平ボーリング（ワイヤライン工法）を行った。

検査ボーリングの結果、取水口中心からトンネル中心線上35～55 mにかけて断層破碎帯があることが判明したので、岩盤強化のため、コンソリデーショングラウトを行った。

次に水平ボーリングの結果、トンネル全延長の岩盤は、局部的に亀裂の多い所もあるが、ほぼ良好であり、掘削に際し、肌落ち程度は考えられてもブロック状に落盤する可能性（危険性）は少ないことが判明した。しかし、

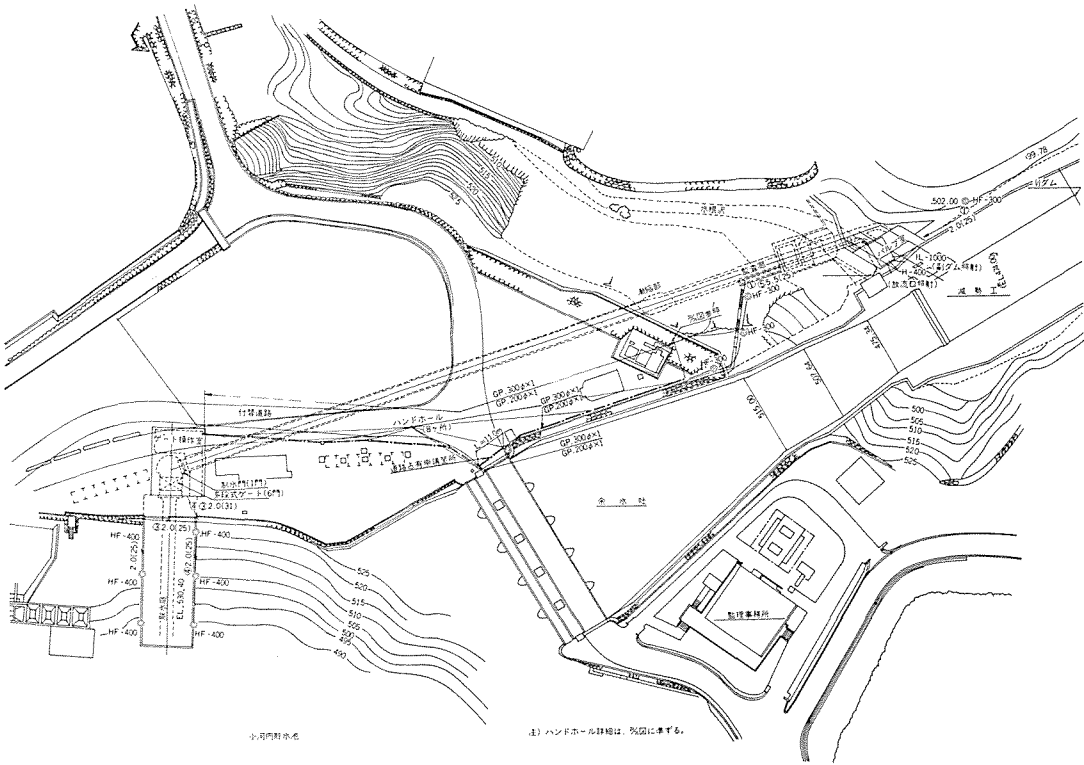


図-3 小河内ダム新取水設備平面図

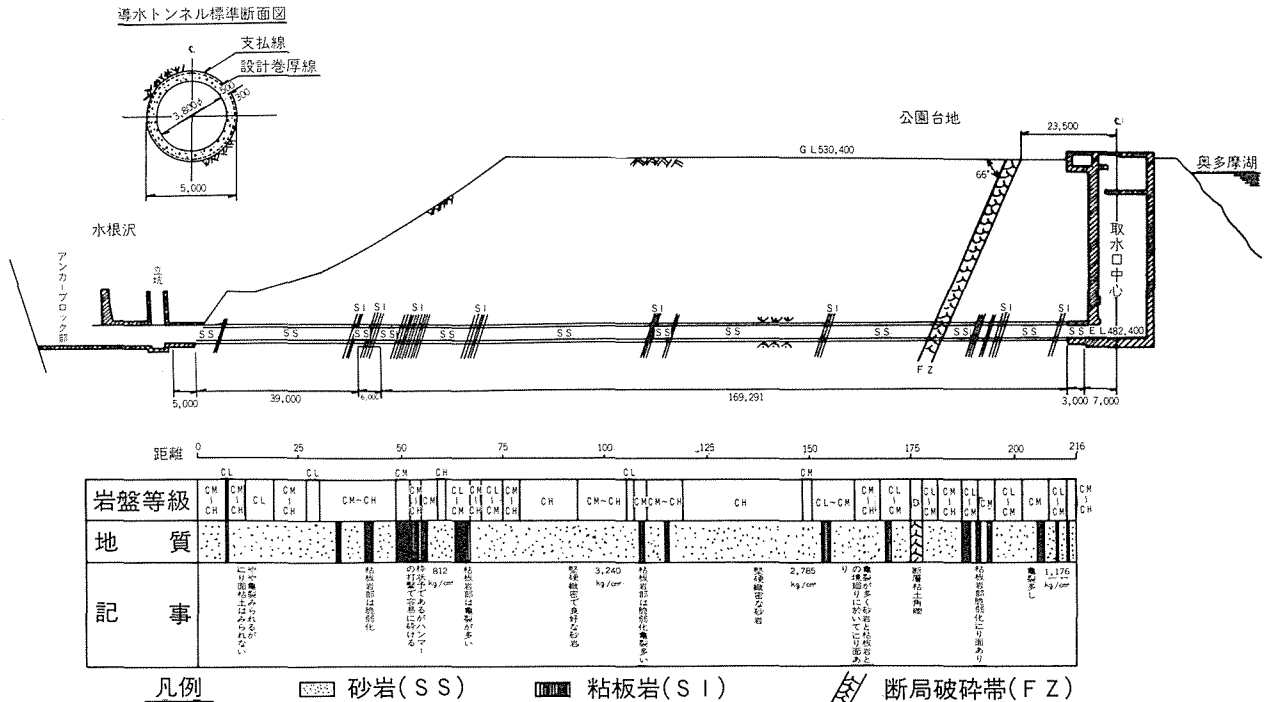


図-4 導水トンネル部地質図

地山深部に一軸圧縮強度が $1,500 \sim 3,200 \text{ kg/cm}^2$ の硬岩箇所が約100m(施工延長の約 $\frac{1}{2}$)に渡り介在していることや、石英含有量が35%であることも判明し、TBMの掘進に対する影響が心配された。

湧水は、常時 $100 \sim 150 \text{ l/min}$ 、最大時 $250 \sim 300 \text{ l/min}$ と推定され、それほど必配される量ではない。

§ 3. 施工実績

3-1 設備概要

本工事に使用されたTBMの主要諸元は表-2の通りである。

施工法の概要について述べれば、図-5の如くTBM本体、後方台車、トレンローダの順に配置され、TBMのカッターヘッド部分から出たズリは本体上、後方台車上、及びトレンローダのベルトコンベアで運搬され、 3 m^3 の鋼車4輛に積込み、 6 t バッテリーロコにて立坑部迄運搬し、立坑上の 25 t トラックレールにて巻上げ、 25 m^3 土砂ホッパーに貯蔵し 11 t ダンプにて捨土した。

排水設備は湧水量最大時 300 l/min と考え、 6 吋 水中

ポンプを立坑部ピット内に2台用意し、1台を予備とした。そして坑内には2吋3台を用意した。

給排気設備として、集塵装置がTBM本体に付属しているが、保安、測量推進管理用のレーザー光線透視度を考え、 $\phi 500 \text{ mm}$ のローカルファン2台を用意した。

給水設備は最初考慮していなかったが、掘進に伴い一軸圧縮強度が大きくなるにつれ、切羽部に集塵装置の能を越える粉塵が発生し、また切羽部とカッターとの間に摩擦熱が発生したため、粉塵処理、およびカッター冷却用として2吋パイプを配管し、切羽部に散水した。

3-2 TBMの構造及び特徴

本機はローラーカッターを岩盤に押し付け、カッターの転動等によって岩を圧壊するものである。そのため56個のカッターを持つカッターヘッドとそれを回転させる駆動部を一体とした摺動フレーム、および掘削機の回転トルクと軸方向スラストをトンネル坑壁に伝えるためのグリッパーを2組持つ本体フレームからなっている。

摺動フレームは、前方のカッターヘッド部、後方の駆動ギヤーケーシング、およびそれらを連結しているチュ

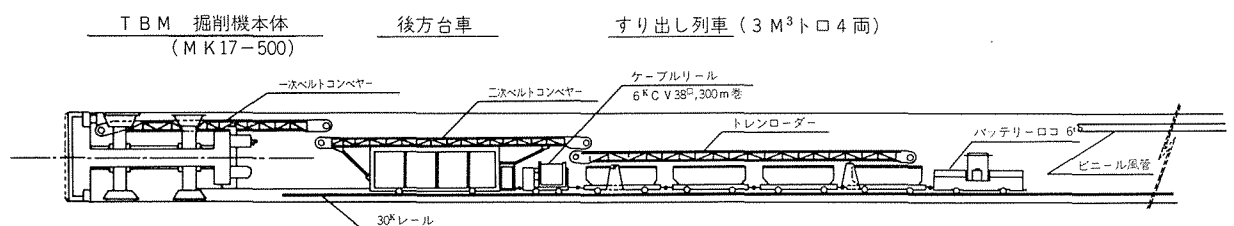


図-5 施工編成図

表-2 TBMの主要諸元

名 称	要 目
名 称	川崎ジャーバMK-17-500
掘 削 径	5.0m
後退径(アタッチメント取外し)	3.8m
全 長(第1コンベア終端)	14.2m
総 重 量(本体のみ)	188 t
回 転 数	7.3r.p.m.
カッター回転用モータ	90Kw×6台
全 推 力	750t(8シリンダー)
グリッパー押付力	1,600t(100t,2シリンダー,8レッグ)
カッターヘッドストローク	750mm
オイルポンプ	55Kw, 300kg/cm ²
起動用オイルモータ	電動機直結式
ト ラ ン ス	50サイクル,6,600V,750KVA
カ ッ タ ー	チップインサートカーフ型,56ヶ
ズ リ 出 能 力	200t/H

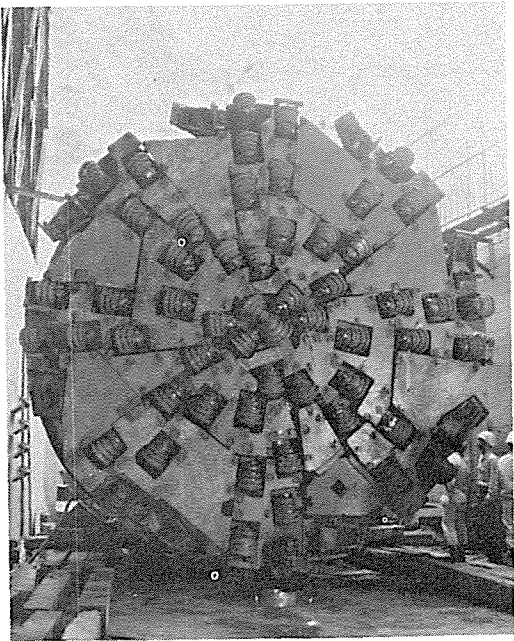


写真-1 MK-17-500

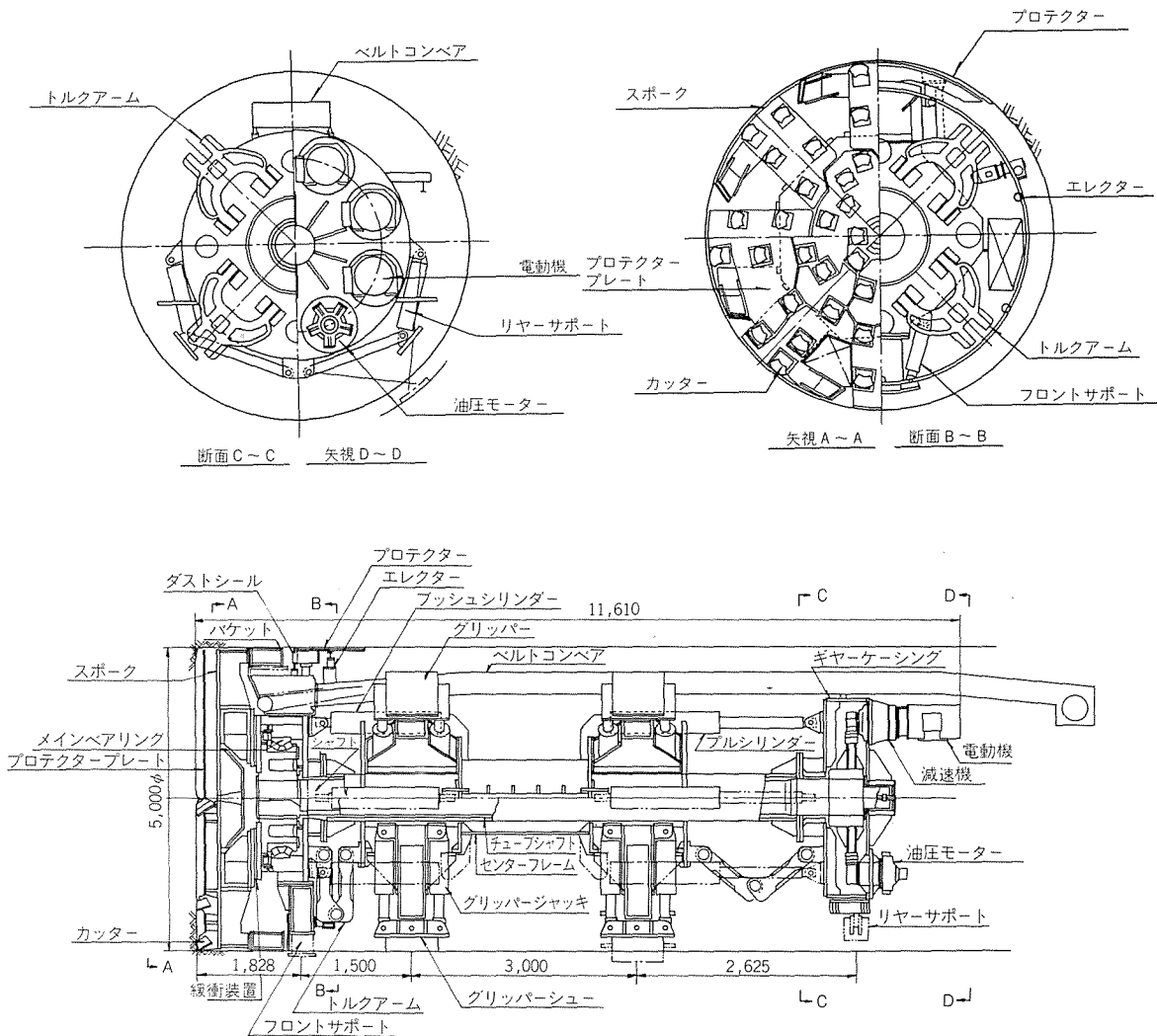


図-6 MK-17-500 全体組立図

ープシャフトからなる。このうちチューブシャフトは本体フレーム中央を貫通している。

本体フレームは、前後に円周方向4段1組のトルクアームを持っている。トルクアームは巨大な蝶番構造であり、摺動フレームの重量やカッターヘッドトルク等の反力を直接、グリッパーによって坑壁に固定されている本体フレームに伝達している。

したがって、回転軸（チューブシャフト）はモータトルクを伝達するのみでカッターヘッドからの曲げ応力を受けない。

カッターヘッドを岩盤に押し付けるための推力は、本体フレーム～カッターヘッド部間のプッシュシリンダーと、本体フレーム～後部ギヤーケーシング間のプルシリンダーによって与えられる。カッターヘッドを構成する各スポークには、ズリを掻き寄せるスクレーパとズリを入れるバケットがあり、ズリはカッターヘッドの回転によって最上部にてバケットから一次ベルトコンベアに排出される。

ここで本掘削工事における本機の特徴をいくつかあげてみると、

- ① 本体フレームの2点支持グリッパーと、摺動フレームのフロントおよびリヤサポートレグにより、支保工をまたいでの前後進、トンネル外での自走可能があげられ、発進段取時および後退時にその特徴が生かされた。
- ② カッターヘッド部はアタッチメントの交換方式によって、掘削径は3.8～5.0mまで変更可能であり、後退時にはアタッチメントを取外すことによって支保工を建込み、ライニングした状態であっても本体を解体することなく引出しが行えた。またカッターヘッド前面部は平板型であるため、ドーム型に比べ、切羽面は平坦で自立性が良く、カッター交換等の作業時スペースが広く取れ、安全性、作業性に富み、掘



写真-2 組立状況

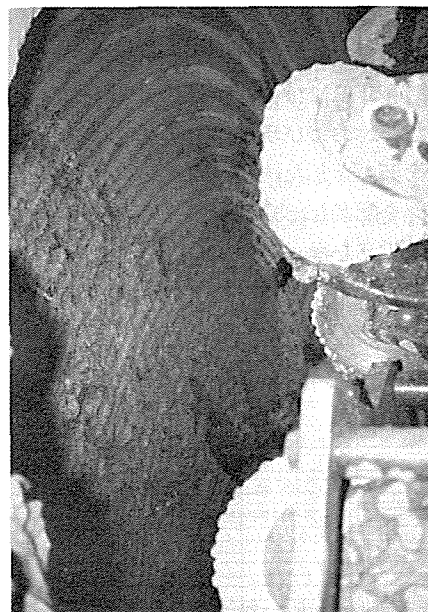


写真-3 掘削開始状況

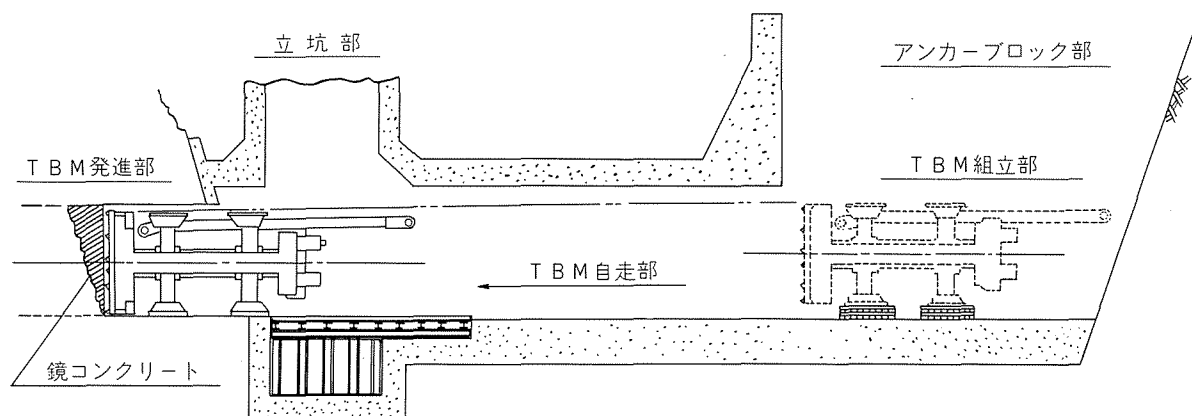


図-7 TBM発進段取図

削時に於ける二次破碎も比較的少なく、よって振動も少なかった。

- ③ カッターヘッド部と駆動部が前後に分けられ、その中間にグリッパー脚があるため、機械の重心位置は掘進前に於いて前後のグリッパー脚の中間にあり、掘進完了時に於いても前グリッパーの後端にあるため、機械は安定性が良い。従ってセンタリングや掘進時のステアリングが容易に行え、トップヘビーによって直進性が失なわれることはなかった。
- ④ トルクアーム部は前述のごとく大きなトルクに耐え、軸心を保持し、回転軸にカッターヘッド重量等による曲げ応力が生じるのを防いでいる。
- ⑤ グリッパーは本体フレーム前後の2点でX型に支持しているため、剛に支持でき、かつ天端を傷めずリセットと同時に方向修正ができた。
- ⑥ 駆動装置は油圧モータ起動のための電圧降下がなく起動時の衝撃がない。また長い駆動軸（中空軸）により、トルク等の変動に対して緩衝効果があった。

3-3 施工実績

M K-17型TBMは機体重量約188t（本体のみ）であるが搬入経路、および現地組立工事期間を考慮して最大分割重量を35tとした。現地には60t及び35tのトラッククレーンを配置し、立坑下部（アンカーブロック）約26m地点で組立を行った。

機体搬入開始日を昭和52年6月15日とし6月28日組立完了、調整運転ののち機体を切羽部まで移動し7月7日運転開始となった。

図-8に掘削進行状況図を示すが運転は大別して3期に分かれる。第1期は保守点検を主体に機械の馴らし運転、第2期はTBM後方の設備編成も整う本格運転、第3期は破碎帯付近から到達部における運転である。

① 第1期施工の特徴（7/7～7/16）

本期は岩盤の一軸圧縮強度が600～800kg/cm²と推定され、岩盤の肌落ちも激しかった。そのため支保工を75cmピッチとした。またグリッパーを坑壁に固定することができず、低負荷による運転技術の習得と機械の馴らし運転とに費やされた。スラスト圧は $\frac{3}{8}$ ～ $\frac{1}{4}$ （80～180t）を順次変化させ約26mを掘進したが、岩の崩壊によるカッタフェイス部の給脂用配管の破損とスラストシリンダー配管からの油洩れ等の事故が発生した。

② 第2期（7/17～9/28）

前期間中の掘削長（約26m）を加え、切羽部からアンカーブロック部までの約70m区間にてTBM施工編成（約45m）を整え本格運転に入った。掘削長46mにて最初のカッター交換を行い、60mにて2度目の交換を行なった。

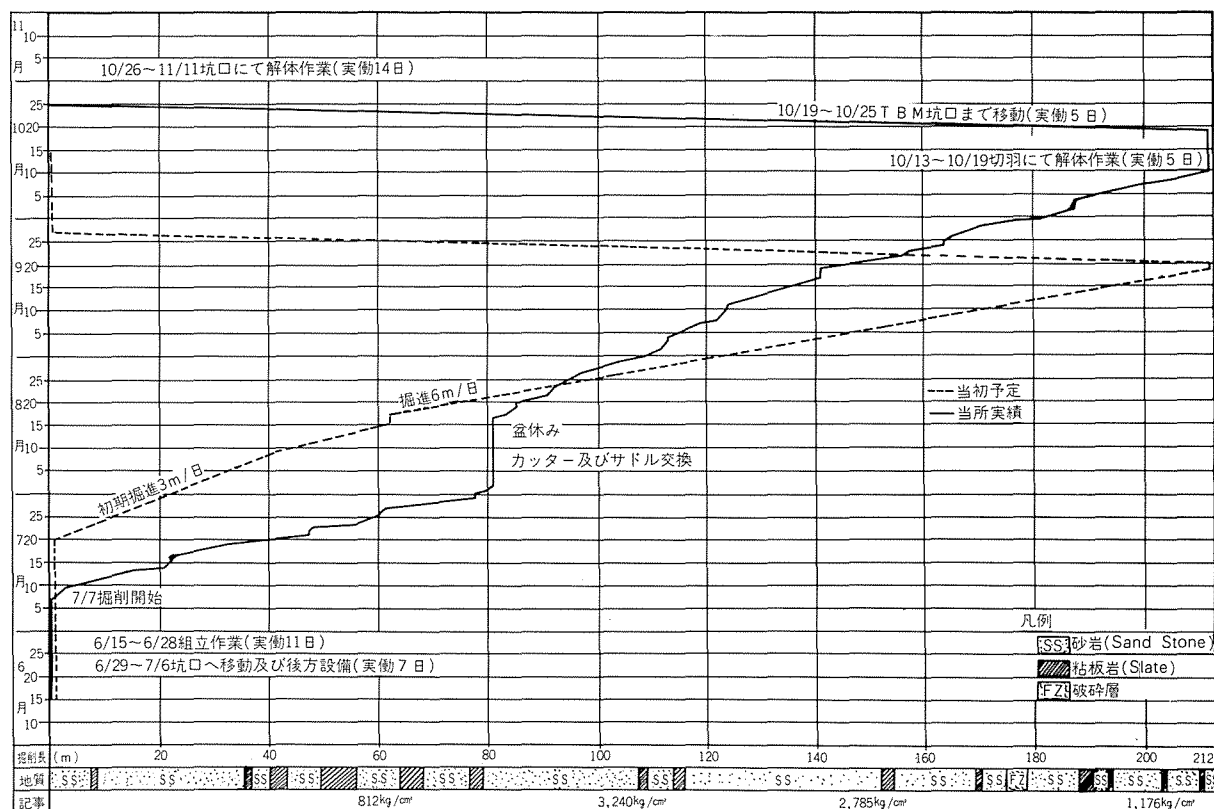


図-8 進行状況図

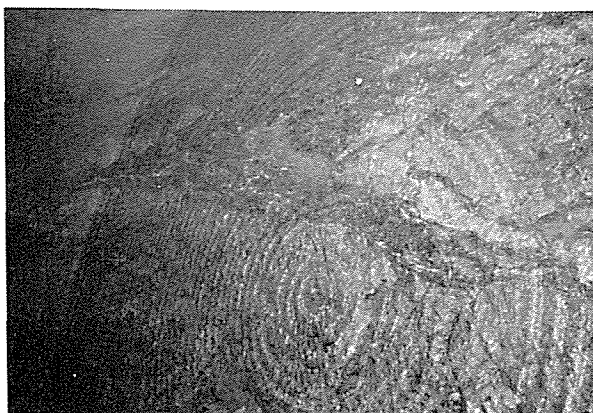


写真-4 石英層を含む切羽状況



写真-5 カッター破損状況

この頃から切羽部に石英層が目立ち、一軸圧縮強度も1,000kg/cm²を越えてきたので、これまでカッター一部点検および給脂を一方当り1～2回であったのを1ストローク(750mm)掘削ごとに点検および給脂を行うことにした。にもかかわらず、掘削長81m、一軸圧縮強度推定3,000kg/cm²にて写真-5のようにゲージカッターがサドル部も含めて破損した。その後掘削長170mまでインナーカッター41ヶ、ゲージカッター84ヶ、計125(2ヶ/日)のカッター交換を行った。スラスト圧は150～360t(全推力の $\frac{1}{3}$ ～ $\frac{1}{2}$)の間で適宜変化させた。

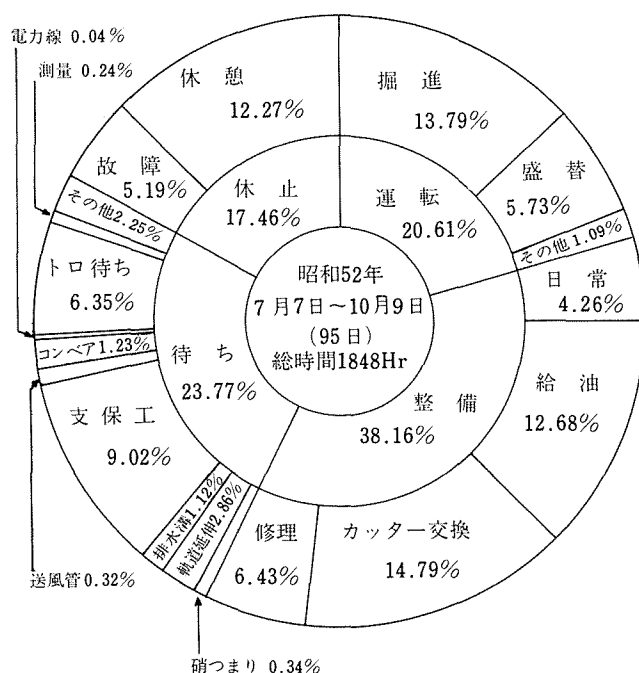
③ 第3期(9/29～10/9)

本期は破碎帯およびその周辺の岩盤部に粘土を挟んだり、小断層がみられるため入念な施工が望まれた。コンソリデーショングラウトを行っていたので、掘削に際して支障となることはなかったが、グリップー等による反力が取れずスラスト圧は第2期の $\frac{2}{3}$ 程度に減少した。本期におけるカッター交換数はゲージカッター8ヶのみである。

施工実績の一般的まとめとして表-3に掘削総括表を示す。

これによると昭和52年7月7日から10月9日まで総日数95日間の内の全休日等の休止時間を除く総作業時間1848時間の内、運転が20.61%、整備が38.16%、待ちが

表-3 TBM掘進総括表



52年7月7日～10月9日(95日間) 総掘削長212.29m				
日 数 内 訳			平 均 速 度	
区 分	全 体 計	区 分	掘 進 速 度	
総日数	95.0日	100 %	総日数当り日進	2.235m/日
掘 進	68.0	71.6	掘 進 日 平 均	3.122m/日
整 備	9.0	9.5	運 転 時 間 当	0.557m/H
山 留	0	0	掘 進 時 間 当	0.833m/H
段取替	7.0	7.3	同 上 毎 分 速 度	0.014m/min
休 日	11.0	11.6		
時 間 分 布	日 常	4.26	78-45	
	整 給	12.68	234-20	油 圧 系 18-25Hr (15.5%)
	カッタ交換	14.79	273-25	電 気 系 8-05Hr (6.8%)
	備 修	6.43	118-55	カッター系 78-50Hr (66.3%)
	計	38.16%	705-25Hr	ベルコン系 4-05Hr (3.4%)
	掘 進	13.79	254-50	モーター系 9-30Hr (8.0%)
	盛 替	5.73	105-50	
	そ の 他	1.09	20-10	
	計	20.61%	380-50Hr	
	硝つまり	0.34	6-20	
	軌道延伸	2.86	52-50	
	排 水 溝	1.12	20-40	
	支 保 工	9.02	166-45	バッテリー交換 3-55Hr
	送 風 管	0.32	5-50	機 械 等 洗 滌 10-15Hr
	電 力 線	0.04	0-40	矢 板 山 留 8-40 Hr
	コンベヤー	1.23	22-40	給 水 配 管 1-30 Hr
	ト ロ 待 ち	6.35	117-25	整 理 片 付 4-00 Hr
	測 量	0.24	4-25	後 方 設 備 9-00 Hr
	そ の 他	2.25	41-30	脱 線 4-10Hr
	計	23.77%	439-05Hr	
	故 障	5.19%	95-50Hr	
	休 憩	12.27%	226-50Hr	
	総 時 間	100.00%	1848-00Hr	

表－４ 作業員編成表

職 種	人数(人)	記 事
T B M 運 転 工	2	当社社員
作 業 長	1	坑 夫
バッテリーロコ運転	2	坑 夫
コンベヤ系統	1	坑 夫
硝 上 げ 工	2	坑 夫
クレーン合図者	1	坑 夫
クレーン運転手	1	25tTC.
作 業 員 合 計	10	

23.77%，休止が17.46％となっている。なかでも整備のうちカッター交換14.79％と給油（脂）12.68％は大きな割合を占めている。また、休止のうち故障5.19％はカッターサドル破損による部品購入のための休止を表わしている。

掘削記録として、総掘削長212.9m、平均掘削速度0.833 m/H、総日数当りの日進2.235 m/日（第1期2.58m/日、第2期1.92m/日、第3期4.29m/日）、稼動日当りの日進3.122m/日、最高日進8.6m/日であった。

作業員に関して、機械の運転士（当社社員）およびクレーン運転手を除く坑夫（作業長含）は7人/方であった。また、支保工組立、線路敷設、ダクト延伸等の作業は安全上から掘削を中止して、坑夫全員で行わせた。

単位掘削電力消費量は第1期で最低値9.17KWH/m³、第2期で最高値45.86KWH/m³を記録し、平均は19.32 KWH/m³となった。



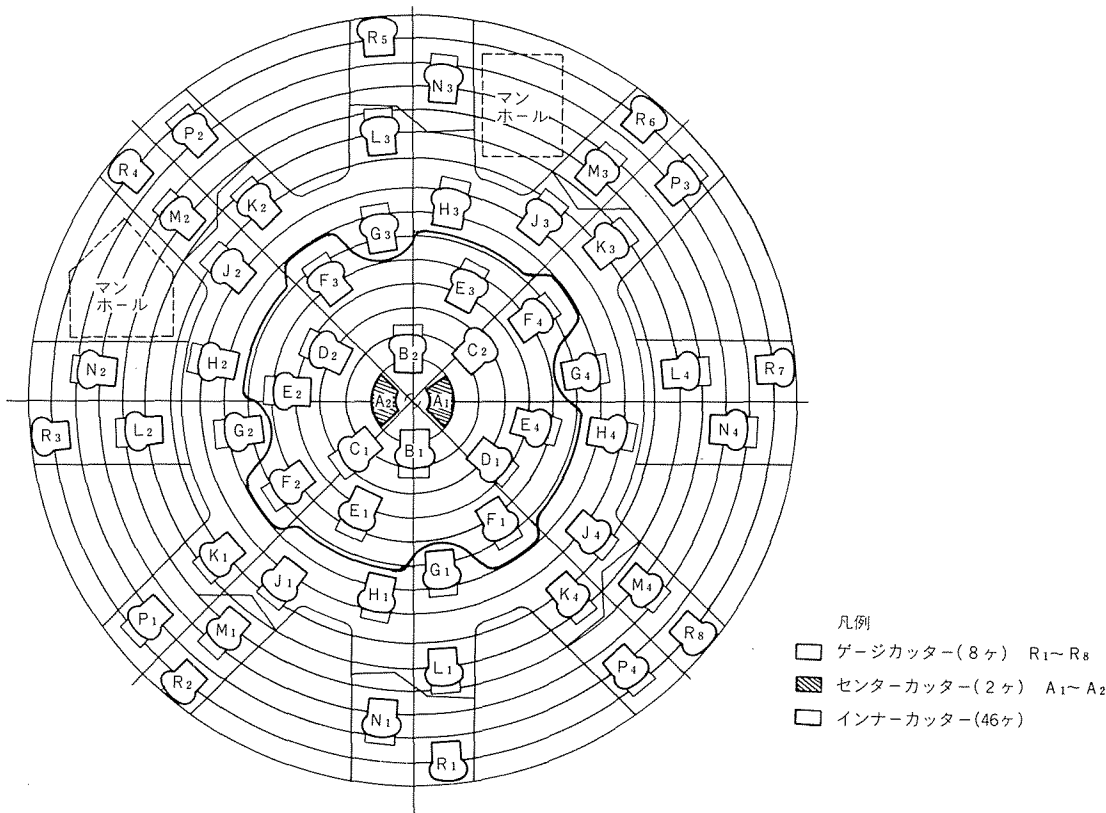
写真－６ 坑内状況

蛇行に関しては、本機を持つ安定性、およびガスレーザによる掘削方向のコントロール制御のため、トンネル中心から左右方向15cm、上下方向10cm以内に収まり、かなりの精度といえる。蛇行は切羽部の一軸圧縮強度の低い方へ惹起した。

§ ４．考察

４－１ メカニズム

本機は 3－2 TBM の構造および特徴で述べたように、機械本体については良く考慮されており、本工事における施工精度や破碎帯通過時の安全性、安定性は本機の特



図－９ カッター配列図

表-5 カッター使用実績

品 名	取付数(ヶ)	交換数(ヶ)	計
ゲージカッター	8	106	114
インナーカッター	46	55	101
センターカッター	2	0	2
チップインサート型カッター	—	8	8
計	56	169	225
カッター消費量	$225ヶ \div 212.29m = 1.06ヶ/m (0.054ヶ/m^2)$		
サドル	8	8	16



写真-7 カッター使用実績

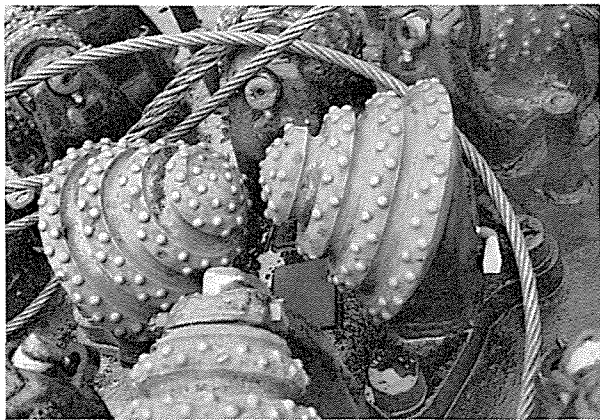


写真-8 センターカッター

つ独特のメカニズムに依るところが大きかったと思われる。

しかし本機も他機種と同様、本体フレームをトンネル壁に強力に固定し、トルクやスラスト圧の反力をとる構造となっている。そのため弱盤層（第3期）や施工条件によってグリッパーが使えない場所（第1期）では、所定の推力が得られなかったり、振動の発生によって坑壁を傷めてしまう危険性があるので考慮の必要がある。

トラブルの多くは組合せ部分に多く発生した。特に苦労したのがカッター系統であり、一軸圧縮強度1,000kg/cm²以上の岩盤においては発生頻度が激増し、これの交換等に多大な労力、時間（実績、総時間の約35%）を費した。

これの改善策としてカッターヘッドの内周部の周速差の改善、およびそれに伴うカッター形状、取付位置、取

付数、取付角度等があげられる。

チップインサートカーフ型のセンターカッターとインナーカッターをフリーの状態ですべてを回転させてみると、その軌道の直径はセンターカッター約0.5m、インナーカッター約2.0mとなった。

センターカッターは取付位置と、この軌跡がほぼ一致し、カッターヘッドの周速も小さい。実績として一度も交換することなく破損箇所もほとんどなかった。

インナーカッターはこの軌跡がほぼ一致する取付位置は図-9中のFラインである。

Fラインより内側に取付けてあるカッターは軌跡が違って周速が小さいなどの理由により、交換した個数は少ない。また交換したものはカッターのシール類の摩耗によるものであるFラインより外側に取付けてあるカッターは軌跡の違いや周速大の条件により、取付数を考慮しなければならない。B～Dライン2ヶ、E～Pライン4ヶとなっており、EとPラインでは1ヶ当りの負担量差が大きい。実績では、わずかではあるが交換したカッター数がPラインに近いほど多くなった。

インナーカッターは切羽部に直角方向のスラスト圧のみを考慮すれば良いのに対し、ゲージカッターは蛇行等によって生じる側壁からの力も考慮しなければならない。

そのほかの改善策としては、推力増大に伴うカッター1個当り、チップ1個当りのスラスト荷重、トルク等に対する考慮、カッター各部の強度増、シール類や油脂類開発等があげられる。

その他のトラブルとしては、油圧系、ベルトコンベア系であった。

油圧系統は全て第1ベルトコンベア下に配管されていたので、油漏れ等の発見、補修増締めが困難であった。また、掘削終了後、TBMをバックさせたがフロントサポートへの配管が低位置のため、残土によって破損した。

この残土は、カッター冷却、粉塵処理を目的として切羽部に給水を行ったため、機械本体下に堆積したものである。掘削際は水と共にバケットによって第1ベルトコンベアに昇り、TBM本体、後方台車等を泥で汚し作業環境を悪化させた。また、ベルトコンベアの故障等については全て前記事項に起因したものであった。

坑内排水については、排水中にかなりの量の油類を含み、濁度も2,000～3,000ppmあったため、放流前に処理する必要があった。本工事では幸い、取水庭、取水口掘削工事用に最大1,440m³/Hの処理能力を有する濁水処理設備を設置していたのでこれを利用した。

4-2 純掘進速度

当所における実績は純掘進速度0.833m/H、純掘削量速度16.35m³/Hである。この値を過去の全断面掘削タイプ

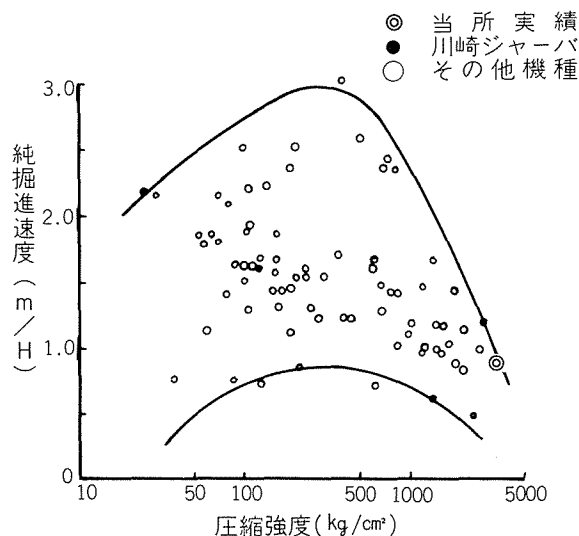


図-10 純掘進速度と圧縮強度

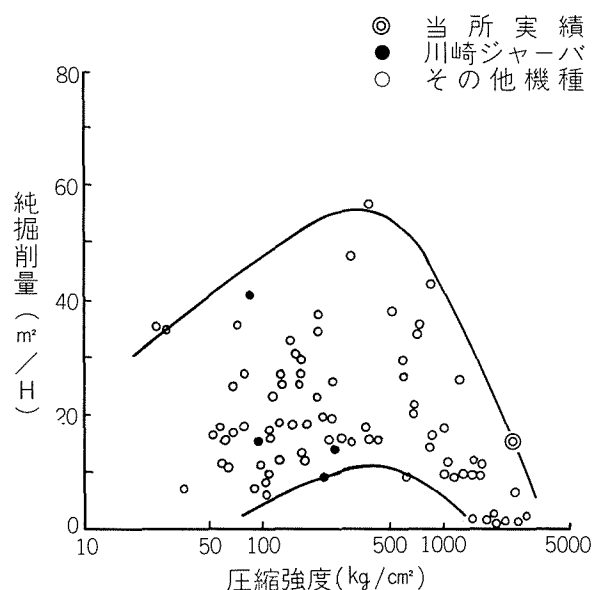


図-11 純掘削量と圧縮強度

ブTBM実績と比較すると一軸圧縮強度との関係は図-10、図-11のようになる。当所における実績値は数値的には低い図-10、11でわかるように、一軸圧縮強度を考慮するとかなり低いとはいえない。一般的に高い実績値を示しているのは一軸圧縮強度100～1,000kg/cm²の範囲である、この範囲の掘削実績割合は90%以上を占めている。過去にMK-17-500を一軸圧縮強度100～1,400kg/cm²の範囲で使用した例を表-6に示す。この実績は破碎帯による待ち時間が全体の43.55%になっているが掘削速度や日進においては好結果を得ている。一軸圧縮強度100～1,000kg/cm²の範囲で不整層、断層等による掘進中断作業の少ない岩石隧道や、一軸圧縮強度1,000kg/cm²以上の範囲における市街地の民家下、重要構造物の

表-6 実績比較表

	当所実績	過去実績
総掘削長さ	m 212.29	1,000.00
総日数	日 95	232
総時間	H 1.848	4.199
運転時間	% 20.61	24.24
整備時間	% 38.16	20.82
待ち時間	% 23.77	43.55
休止時間	% 17.46	11.28
実掘削平均掘削速度	m/H 0.833	1.350
総日数当りの日進	m 2.235	4.320
稼働日数当りの日進	m 3.122	10.300
最高日進	m/日 8.60	40.50
使用電力平均KWH/m³	19.32	13.20
一軸圧縮強度	kg/cm² 600～3,200	100～1,400

近接地等で爆薬等による発破振動等を絶対さなければならぬ一定延長以上の岩石隧道では、その採用について充分検討されるべき工法といえる。

4-3 単位掘削電力消費量

一般的に一軸圧縮強度が増加すれば単位掘削電力消費量も増加することは容易に想像される。しかし過去の実績よりこの関係が認められたのは、一軸圧縮強度100kg/cm²以下の掘削に使用される自由断面タイプのTBM（ロードヘッダー等）においてのみである。それに比べ、全面掘削タイプのTBMの場合、一軸圧縮強度が100～200kg/cm²の範囲ではほぼ一定しているにもかかわらず単位掘削電力消費量は3倍近い違いを示す事例や、一軸圧縮強度が3～6倍も変化するにもかかわらず単位掘削電力消費量はほとんど変化しない事例、さらに一軸圧縮強度が増加するにしたがい単位掘削電力消費量が減少している事例もある。このように全断面掘削タイプのTBMは過去の実績から、一軸圧縮強度に対する相互関係を求めるのは現在の段階では困難とされている。

図-12に3機種の実績を示すが、各機種ともかなりのばらつきがあり、一軸圧縮強度に対する相互関係を求めることは困難である。

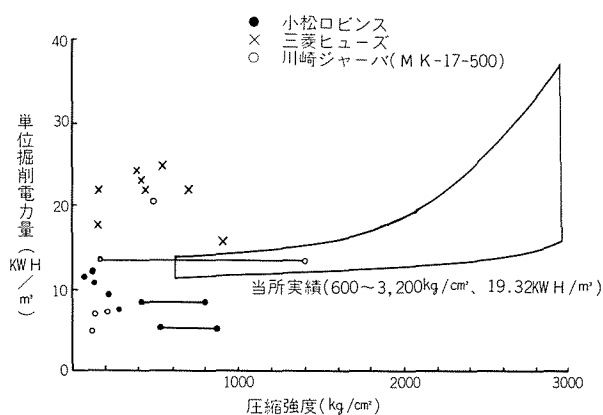


図-12 単位掘削電力消費量と圧縮強度

本工事における実績は平均19.32KWH/m³であり、他機種に比べ決して高い値ではない。一軸圧縮強度600～1,200kg/cm²においては値がほぼ一定であり、これは第1期および第3期掘削に対し、本機の安定性が電氣的にも窺える。しかし一軸圧縮強度1,200kg/cm²以上（主に第2期掘削）においては一軸圧縮強度が大きくなるに従いばらつきが大きくなっている。これは一軸圧縮強度、掘進速度、スラスト圧、カッターヘッド一定回転等の作用によるモータの電氣的負荷のばらつきを示している。

4-4 カッター消費量

TBMに用いられる掘削カッターは表-7のごとく一軸圧縮強度により区別している。

表-7 カッター分類表

分 類	一軸圧縮強度(kg/cm ²)	カッター型式
軟岩～中硬岩	850以下	歯 型
中 硬 岩	850～1,800	チップインサートカーフ型
硬 岩	1,800以上	チップインサート型

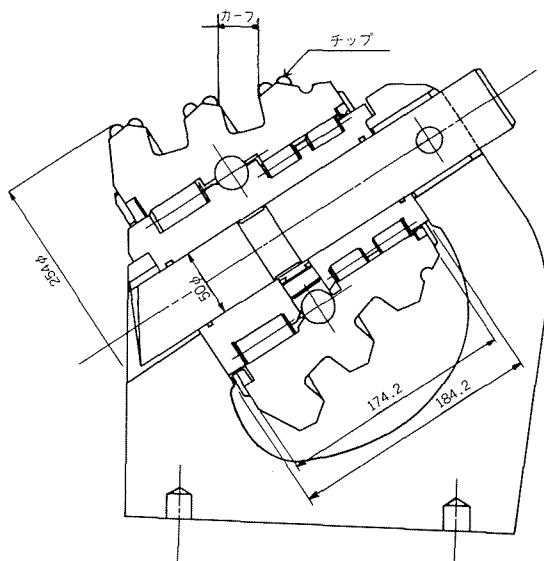


図-13 QKCカッター組立図

本工事では一般にチップインサートカーフ型カッターを使用したが、掘削長90m、推定一軸圧縮強度2,500kg/cm²にて試験的に硬岩用チップインサート型カッターをゲージ部に使用した。チップインサート型カッターはその形状より判明するようにカッターチップ列と隣接するカッターチップ列の空隙（カーフ）が非常に小さく、岩を粉砕しなければTBMを掘進させることができない。

チップインサート型の実績について調査したところ、我国ではリーマ孔に垂直引上げで拡大孔を施工した例のみしかないとのことであり、いずれにしても岩を破砕するチップインサートカーフ型に比べチップインサート型は、岩を粉砕するため多大のエネルギーを要し、掘進速度もきわめて低下した。

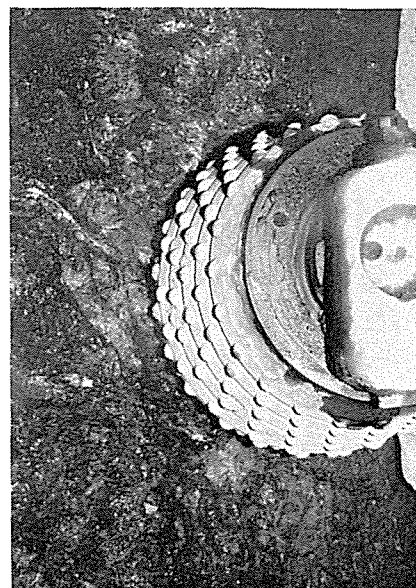


写真-9 チップインサート型

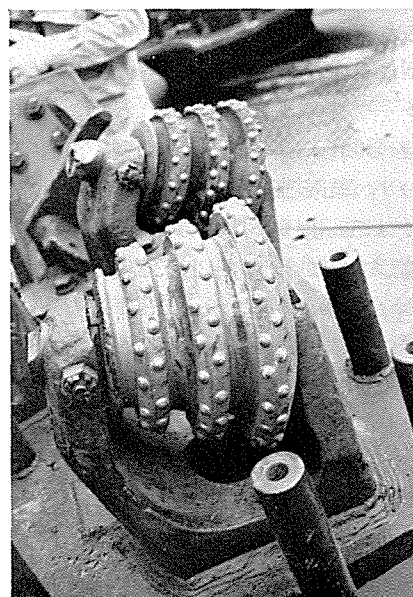


写真-10 チップインサートカーフ型

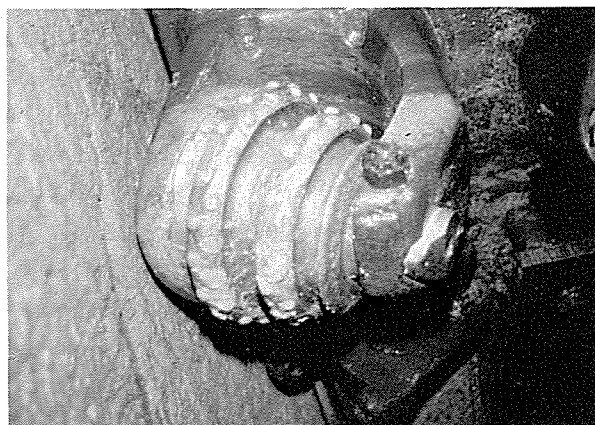


写真-11 カッター摩耗状況

本工事における実績として、純掘進速度 $0.1\text{m}/\text{H}$ （チップインサートカーフ型、純掘進速度 $0.833\text{m}/\text{H}$ ）であり、最終的にベアリング破損による片へり状態を惹起した。

チップインサートカーフ型は切羽面にギヤ型の突出した刃先（チップ）を圧着させることによって全推力を刃先（チップ）の点に集中させ、切羽表面部を引張作用によって圧碎、破壊する。圧碎力は圧着点から周辺に伝達され隣接した刃先圧碎痕の方向に剪断破壊によるきれつが発生進行し表面層はある深さの範囲で剝離し離脱する。従ってカッターの形状における、チップの突出長、空隙（カーフ）の大きさ、シェル（チップ取付部）の厚さ等一つがカッター消費量に対し重要な要素となる。

本工事において、カッター消費量を大きくさせた要因として、①チップ破損または脱落によるカッター外部摩耗（写真－11）、②ベアリング破損によるカッター外部の片へり、③シール類の破損によるカッター内部の摩耗等があげられる。通常の掘削状態ではチップ突出長の約80%を切羽に貫通させ、衝撃荷重等は残り20%の範囲で切羽へのチップ貫入により弱められる。つまりチップの完全な切羽への貫入は、シェルが切羽に接触することを意味しており、結果としてシェルの摩耗によるチップ脱落やベアリング破損（切羽からの衝撃荷重を直接ベアリングに伝達してしまう）が発生する。

ゆえにカッター消費量はカッター1ヶ当りにかかる推力にかなりの影響を受けることがわかる。またカッター軸の角度不整合状態を防ぐことも重要なことである。これはカッターに対する推力を不均等に配分し、急速に①②の要因を惹起してしまうためである。

土木的要素として、従来のカッター消費量は掘削しようとする岩石の一軸圧縮強度を一つの目安としていたが、TBM実績がかなり得られるようになった今、一軸圧縮強度よりの推定値と実績値が必ずしも一致せず一軸圧縮強度のみから判断することは不適當であることが認識されはじめた。現在では一軸圧縮強度の他に、石英含有量、岩盤きれつなどに大きく影響されると考えられている。

過去の実績を調査すると、カッター消費量は最大 $0.04\text{ヶ}/\text{m}^3$ 、平均 $0.02\text{ヶ}/\text{m}^3$ となっている。この実績は4－2純掘進速度の項で述べたように、大部分が一軸圧縮強度 $1,000\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下のものであり、異例として花崗岩部（石英含有量大）では $0.054\text{ヶ}/\text{m}^3$ となっている。

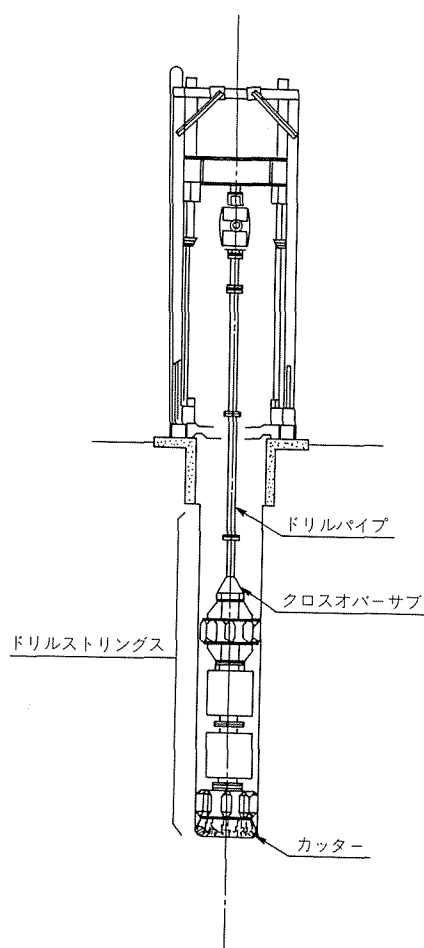
本工事におけるカッター消費量は一軸圧縮強度 $600\sim 3,200\text{kg}/\text{cm}^2$ 、スラスト圧（第2期掘削時） $150\sim 360\text{t}$ 、カッター1ヶ当り $2.68\sim 6.43\text{t}/\text{ヶ}$ 、石英含有量35%、および岩盤きれつが大などの条件により $0.054\text{ヶ}/\text{m}^3$ となった。

4－5 衝撃吸収方法

当所は取水庭、取水口の掘削工事に大口径掘削機V・B・M（Vertical Boring Machine, MD－150, MD－360, L－4）を使用しているのでTBMと比較してみると、水平、鉛直の差異はあるが、岩掘削に対するいわゆる建設機械（TBM）と、採鉱機械より発達した機械（V・B・M）の考え方の差異が感じられた。

すなわち、TBMはグリッパーによって掘削機本体を岩盤に固定し、後方から推進力とカッターフェイスの一定回転数により切羽に押し付けたカッターに与えるトルクで岩を圧裂しようとする機構であり、カッターに対する岩盤強度の不均質、大小、および振動吸収に対する考慮は、カッター形状差（チップ、カーフ等）並びにカッターヘッド内に取付けられたウレタン等弾性クッション材のみであり、いわば土木式（力に対するには力）の機械であると思われる。

一方、VBMは一部孔壁にTBMと同様のグリッパーなどで推力を取るものもあるが、一般的（MD－150、



図－14 VBM（MD－150）

M D—360, L—4)には、ドリルストリングスを垂架し重力方向にその重量により方向付け、その $\frac{1}{2} \sim \frac{3}{8}$ を上方に吊り上げ、あくまで重錐効果(Pendulum Effect)を発揮できる型式になっている。掘削カッターに対する岩強度の不均質、振動吸収に対する考慮はカッター形状のみならず、掘削面に対する载荷重、すなわち推力調整(懸架フレームに取付けたジャッキで自由にできる)、およびドリルパイプが掘削ヘッド等に比べ剛性が小さいので、いわゆるショックアブソーバー(衝撃吸収装置)の役割を果たすのに効果がある。

VBMによる岩盤一軸圧縮強度は $600 \sim 2,500 \text{ kg/cm}^2$ 、掘削断面径M D—150—1.5m、M D—360—3.6m、TBMによる岩盤一軸圧縮強度は $600 \sim 3,200 \text{ kg/cm}^2$ 、掘削断面径5.0mであり一軸圧縮強度、掘削断面径など条件に差異はあるが、表—8に示すよう、TBMの特徴はカッター1ヶ当りのスラスト圧を大きくして純掘進速度を伸ばそうとする機械であるがカッター交換を含む整備点検時間(38.16%)の増加により、結果として純掘進速度0.833

表—8 TBM、VBM実績比較表

	TBM	VBM(MD-150)	VBM(MD-360)
掘削断面径 m	5.00	1.50	3.60
掘削長 m	212.29	2,040.00	752.00
カッター取付数ヶ	56	10	26
回転数 rpm	7.3(一定)	5~14	3~5
スラスト圧 t	150~360	10~30	15~60
純掘進時間割合 %	13.79	66.80	76.10
整備点検時間割合 %	38.16	6.20	10.00
純掘削速度 m/H	0.833	0.322	0.125
運転時間当速度 m/H	0.557	0.250	0.113
作業時間当速度 m/H	0.139	0.215	0.095
" m/H	2.730	0.380	0.966
カッター1ヶ当スラスト圧 t/ヶ	2.68~6.43	1.00~3.00	0.58~2.30
カッター1ヶ当掘削面積 $\text{m}^2/\text{ヶ}$	0.350	0.177	0.391
一軸圧縮強度 kg/cm^2	600~3,200	600~2,500	

m/Hを記録したが、全作業当りの掘進速度は0.139m/Hとかなり低い値となっていた。

VBMはTBMに比べ、カッターの許容範囲内(カッターチップの地層への貫入量80%)でカッターにスラストをかけ、整備点検時間を少なくし、確実に掘り進む機械であり、結果として、純掘進速度はM D—150で0.322m/H、M D—360で0.125m/Hではあるが、全作業当りの掘進速度はM D—150で0.215m/H、M D—360で0.095m/Hとなり、TBMとあまり変わらない。よって、TBMは整備点検時間・割合をどのように減らすかが問題とされ、カッター消費量がいかに重要なポイントであるかがわかる。



写真—12 かん通

§ 5. あとがき

我国の地質は複雑で、1km毎に1つの断層破碎帯が存在し、数kmに渡って均質な地質は連続しないといわれている。このような地質に対応する機械工法は一朝一夕に開発されるものではないが、今回の非常に貴重な経験から、今後の技術的課題をいくつかあげることができる。それは、より一層安全確実な機種選定による掘進速度の向上、カッターの開発、掘進作業の能率化である。このためには、①弾性波、水平ボーリング等による前方地質状況のより迅速、正確な情報把握と判断能率の向上。②断層破碎帯等地質不良の個所、および止水のためのより高能率なグラウト技術や特殊工法の開発。③トンネル掘削を含む掘進作業システム全般についての総合的なオペレーション管理の効率化がさらに検討されねばならない。

最後に、掘削断面径5mという我国最大級のTBMによるトンネル掘削は、岩盤の一軸圧縮強度、および石英含有量など多くの問題を含み予想外の難工事であったが、初期の目的を達成したことは工事に従事された諸氏、並びにご指導ご鞭達をいただいた関係者各位のご努力の賜ものであり、誌上をお借りして心から感謝の辞を表すものである。

参考文献

- 東京都水道局：小河内ダム工事誌 昭和35年6月
- 日本工営：導水トンネル地質湧水調査報告書
- 土木学会：わが国におけるトンネル掘進機の実績と展望
岩盤力学委員会編 昭和51年10月