

# TBMによる導水路トンネルの施工

## Construction of Intake Tunnel by TBM

三谷 裕次郎\*  
Yujiro Mitani

金子 豊\*\*  
Yutaka Kaneko

青木 実\*\*\*  
Minoru Aoki

岩永 克也\*\*\*\*  
Katsuya Iwanaga

### 要 約

多摩川冷水対策導水路築造工事（導水路延長約1100m）の内、トンネル区間713.5m（3カ所の急曲線部（ $R=100m$ ）を含む）にTBM工法が採用された。

本報文は、本工事の施工実績に基づき、また過去の施工実績をも参考にして、TBMの施工能率、直線施工と曲線施工の相違およびカッター消費量等についてまとめたものである。

TBMの施工能率として、最大月進275.3m、最大日進20.8m、平均日進11.0m、純掘進速度平均31mm/min、最大48mm/minという結果が得られた。

また、曲線部の掘進速度は直線部の80～90%であった。さらにカッター消費量は0.02個/ $m^3$ であった。

### 目 次

- §1. はじめに
- §2. 工事概要
- §3. TBM掘削の概要
- §4. 掘進速度
- §5. カッター消費量
- §6. まとめ

### §1. はじめに

小河内ダムは多摩川水系多摩川上流に位置する発電・水道用水供給を目的とした多目的ダムである。発電にはH.W.L.より約73.5m下方で取水した湖水を利用しており、その水温は年間を通じて $5^{\circ}C$ 前後である。このため、多摩川上流では夏期においても水温が $10^{\circ}C \sim 15^{\circ}C$ 程

度と低く、利水（漁業・農業）や遊水に好ましくない影響を与えている。この冷水状況を改善するために既設の第2取水設備（H.W.L. - 36.5mまで取水可能、当社施工（S50～54）と発電所を結ぶ導水路築造工事）が行われた。

本工事地点は、

- ①秩父多摩国立公園内であること。
- ②ダム・発電所や民家等の重要構造物に近接していること。
- ③掘削対象地盤が $\gamma$ 一軸圧縮強度 $1000kg/cm^2$ （約100MPa）程度でTBM掘削に適していること。

等により、導水路掘削にTBM（トンネルボーリングマシン）工法が採用された。

本報文は本工事におけるTBM掘削工法、特に曲線部の施工法、掘削効率、カッター消費量等について述べるものである。

\*関東(支)多摩川トンネル(出)  
\*\*関東(支)小河内(出)副所長  
\*\*\*関東(支)小河内(出)所長  
\*\*\*\*土木設計部設計課係長

## § 2. 工事概要

### 2-1 工事概要

導水路延長は1089.7mであり、トンネル構造および施工法の違いにより、導水トンネル区間 (TBM 掘削, RC ライニング区間), 鉄管トンネル区間 (NATM 掘削, 鉄管敷設), 水圧鉄管路区間 (開削, 鉄管敷設), 水管橋区間に分けられる。各トンネル区間の内径および施工延長は以下のとおりである。

導水トンネル 内径 2900mm,	延長 713.5m
鉄管トンネル 内径 3300~2900mm,	延長 130.5m
水圧鉄管路 内径 3300~1600mm,	延長 204.7m
水管橋 (別工事) 内径 3300mm,	延長 41.3m

本報文の対象とする導水路トンネル区間は TBM (掘削径3600mm) による掘削後、厚さ350mmの RC ライニングを行う。また、TBM 掘削延長713.2mの内、直線区間は412.7m、カーブ区間は300.5mとなっており、カーブ区間は全体の42%を占めている。カーブは全て曲率半径100mである。

全体平面を Fig. 1, トンネル縦断を Fig. 2 に示す。

### 2-2 地質

#### (1) 地質概要

当該地質は、中世代ジュラ紀の四万十累層帯・小河内

層に属し、砂岩および砂岩・粘板岩互層からなる。岩盤等級は  $C_M$  級 (電研式岩盤分類) のものが主体であり、部分的に  $C_L$  級が分布する。

砂岩は暗灰色塊状・硬質で風化および変質の程度は破碎帯を除けば軽微である。砂岩中には幅数mmの石英脈が多数見られ、長さ数cmから数10cmの微小クラックが発達する。粘板岩は黒色を呈し軟質で剥離性に富み、砂岩中にレンズ状に分布することが多い。TBM 掘削対象岩の大半は砂岩層であり、一部、砂岩が優勢な砂岩・粘板岩互層部である。

断層・破碎帯は幅数10cm~1mの小規模のものが若干見られる程度であり、TBM 施工においては問題とならない。

#### (2) 岩石の物性

当トンネルの岩石の物性は Table 1 のとおりである。

## § 3. TBM 掘削の概要

### 3-1 TBM の特徴

本工事で使用した TBM は西ドイツの WIRTH 社製のものである。Table 2 に主要諸元、Fig. 3 に全体図、Photo 1 にカッターヘッドを示す。この TBM は1981年の新愛本発電所 (富山県: 関西電力) の導水路築造をはじめ、数カ所の施工実績を持つ。

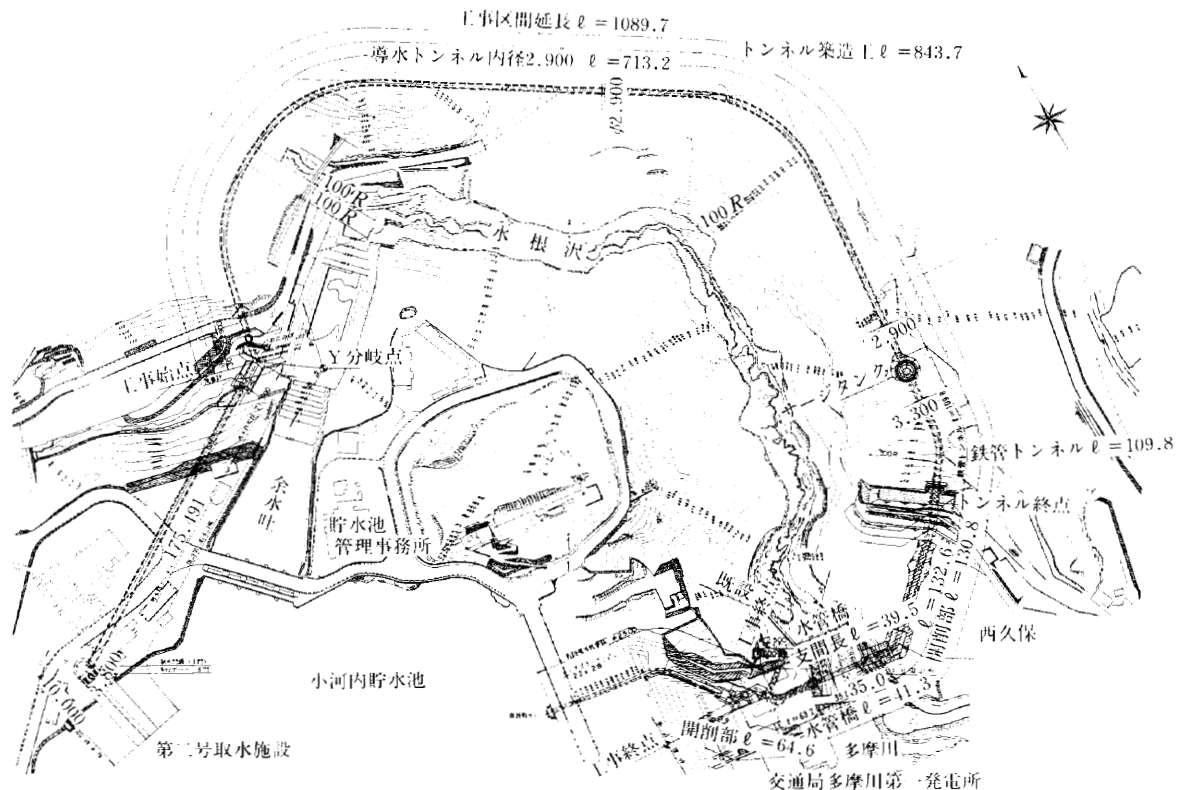


Fig.1 全体平面図

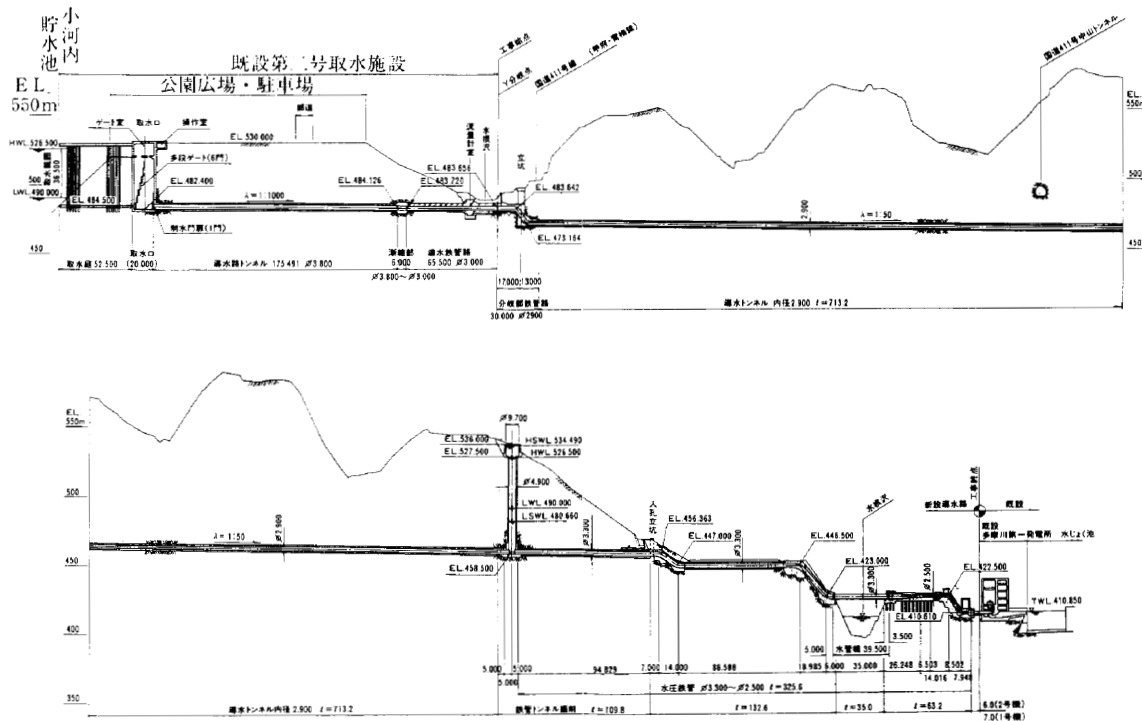


Fig.2 トンネル縦断面図

Table 1 岩盤の物性

岩石種	砂岩	粘板岩
単位体積重量(g/cm <sup>3</sup> )	2.648	2.702
ヤング率(GPa)	57.9	27.5
ポアソン比	0.197	0.177
一軸圧縮強度(MPa)	98.1	26.2
割裂引張り強度(MPa)	13.2	3.9
P波伝播速度(km/s)	5.4	4.36
石英含有率(%)	約10~20	約8

Table 2 TBM諸元

直径	3.6m
全長	約40.5m
本体機長	約7.5m
推進装置ストローク	1.2m(無段階変速)
最大スラスト	440tf
カッターヘッド回転数	0~10r.p.m(無段階変速)
総重量	約130tf
電動機出力	約460kW
センターカッター	ディスク6個
カッター	1枚刃ディスク28個
バケット	5個
グリッパー最大推力	1,130tf
グリッパー面積	51,480cm <sup>2</sup> (78cm×82.5cm×8個)
操行装置(フロント)	上下2個, 左右1個の油圧シリンダー
操行装置(リアー)	上下2個, 左右1個の油圧シリンダー

このマシンはボーリングヘッドとカッターに独特の工夫がなされ、硬岩への対応を考慮したカッター構造となっている。このため、過去の実績から判断しても、施工時の障害となる要因は岩盤が硬いことよりも、むしろ断層等地質が悪いことである。

同機種の硬岩での施工実績は最大一軸圧縮強度で2000kgf/cm<sup>2</sup>(200MPa)程度である。

このTBMの特徴は次のとおりである。

- ①センターカッター部が突出した構造となっている。岩盤掘削方法に発破工法の芯抜き工法の原理を採用することにより、硬岩の効率的な掘削が可能である。
- ②全油圧駆動であり、構造がシンプルであるためトラブルが少ない。
- ③グリッパー (Fig. 3 参照) が前後各4個、計8個あ

るため、地質が部分的に悪くなっても、悪い部分を避けてグリッパーを張ることによって掘削が可能である。

- ④カッターヘッド後方に必要最小限の支保工組立空間を確保している。

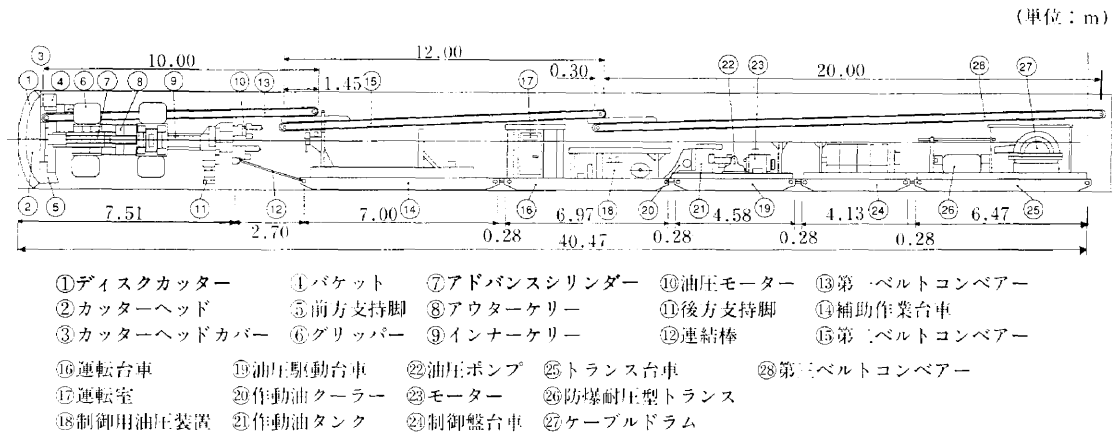


Fig.3 TBM全体図

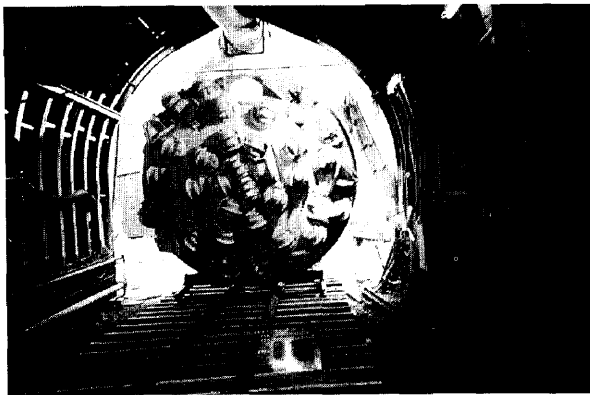


Photo 1 カッターヘッド



Photo 2 切羽状況

### 3-2 施工実績

#### (1) 掘削実績

Fig. 4 に掘削進行図を示す。掘削実績は月進最大275.3m、平均222.21m、日進最大20.8m、平均11.0m(稼働日当たり)であった。また、純掘進速度は平均31mm/min、最大で48mm/minであった。純掘進速度の標準偏差 $\sigma=5.6$ mm/min、変動係数0.18であり、ばらつきは小さく、一定の掘削管理の下に施工を行えたといえる。

Photo 2 に切羽状況を示す。

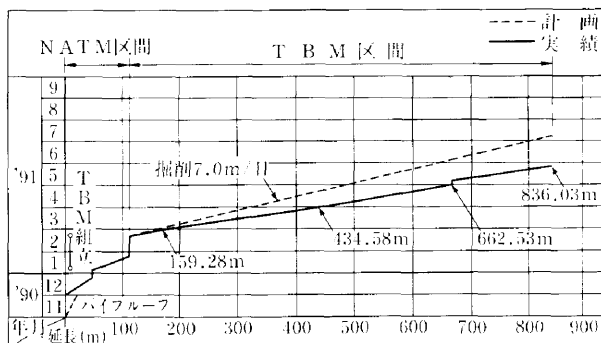


Fig.4 掘削進行図

#### (2) 施工管理方法

TBMと事務所をオンラインで結びリアルタイムで掘削管理を行った。計測項目は①掘進速度、②カッター圧力、③押付け圧力、④マシン姿勢(ピッチング角度、ローリング角度)であり、マシンに計測器(速度計・ストローク計・傾斜計・油圧計)を取付け、ケーブルでパソコンと接続した。なお、カッター圧力とはカッターヘッドの回転に必要な油圧であり、押付け圧力とはアドバンスシリンダーにかかる油圧である。Fig. 5 に計測データ例を示す。これは本工事における代表的な出力例である。

TBM掘削ではカッターヘッドの回転数(本工事においては10r.p.m)、カッター圧力および押付け圧力を一定に管理することにより掘進速度を一定に保ち、安定した掘削が可能となる。

地山状況の変化により計測値は変動し、特に押付け圧力の変動幅が大きい。マシンの負荷の変動を小さくするためにはカッター圧力を一定に管理することが重要である。

また、オンライン計測の他に、レーザートランシット

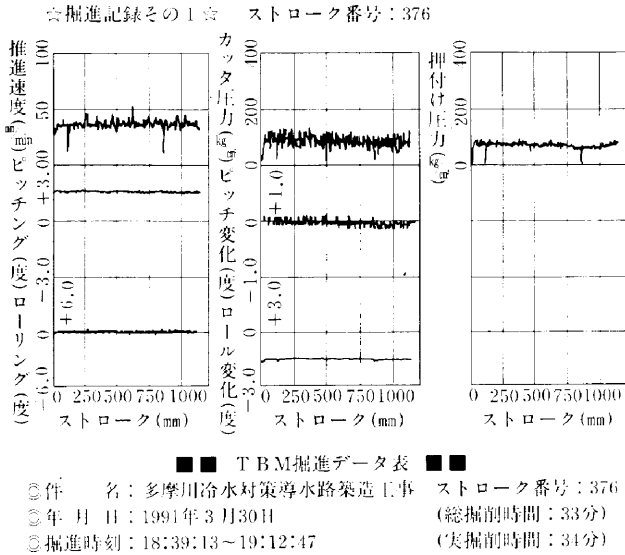


Fig.5 計測データ例

による測量によって姿勢制御を行った。これは、測定データを事務所にて設置されたパソコンに入力し、設計路線とマシンの姿勢・位置の関係を図示するシステムであり、次の掘削管理に利用するものである。今後、このシステムもオンライン化されれば、特に曲線区間では姿勢制御に有効であると考えられる。

(3) 直線施工と曲線施工との差異

本工事では曲線半径100mの急曲線をいかに能率よく、かつ正確に掘削できるかが大きな問題であった。曲線区間においても1ストロークの掘削は直線であるから、純掘進速度は直線区間と変わらなかった。しかし、以下に示す曲線区間特有の問題点が発生した。

- ① 1ストローク毎に掘削方向を正確に転換しなければならず、姿勢制御が直線と比べて非常に重要であった。したがって、1ストローク毎に姿勢制御の時間が必要であった。

② 曲線部では、10m程度の進行でレーザーが機体に当たり、測量ができなくなった。このため、レーザー移設を頻繁に行う必要があり、移設に少なくとも2時間を要したことが、掘削サイクルの中での測量時間の割合を増加させた。

また、本工事においては問題とならなかったが、曲線区間ではグリッパーのストローク不足のために、反力が十分取れなくなる可能性があり、木材等で補助する必要がある。

Fig.6に直線区間と曲線区間について作業時間の比率を示す。曲線区間における測量、位置修正、ケーブル盛替え等の合計は全作業時間の約2割であり、直線区間の2倍となる。このことにより、曲線部の掘進速度は直線部の80～90%に低下した。本工事における実績では、直線部の最大日進20.4mに対し、曲線部では17.7mであった。

TBM掘削において実際に掘削が行われている時間は、中硬岩では全体の2～3割程度である(硬岩で大きく、軟岩で小さくなる)。したがって、TBMの1日の掘進量を増加するためには、純掘進速度を上げるだけでなく、稼働率をいかにして上げるかが重要である。

§4. 掘進速度

掘進速度の推定はTBM工事での計画および施工管理上、最も基本となる項目の一つである。掘進速度の推定は経験的に行われているのが現状であるが、正確な推定方法が確立されれば、より合理的な工事が可能となる。ここでは、本工事および過去の施工実績<sup>13)</sup>に基づき、岩種と掘進速度の関係についてまとめる。

4-1 過去の施工実績データとの比較

Table 3に本工事と新愛本水力発電所導水路トンネ

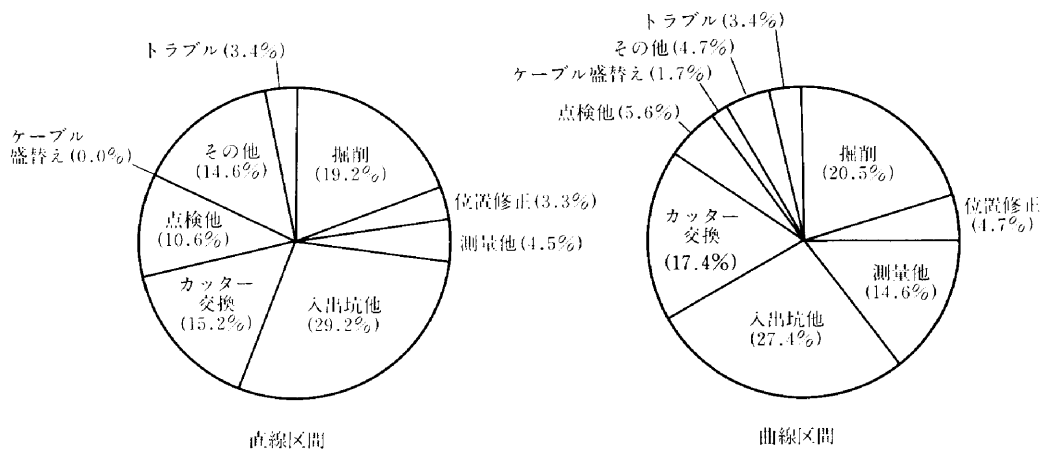


Fig.6 作業時間比率

Table 3 純掘進速度と稼働率の比較

岩 級	純掘進速度 (m/h)		稼働率 (%)	
	本工事	新愛本 <sup>1)</sup>	本工事	新愛本 <sup>1)</sup>
B	—	0.99	—	45.2
C <sub>H</sub>	—	1.46	—	34.0
C <sub>M</sub>	1.86	1.70	20.5	23.3
C <sub>L</sub>	—	1.84	—	16.7
D	—	1.35	—	8.4

ル工事の純掘進速度および稼働率の比較を示す。本表のデータは同機種・同径の TBM 掘削の比較であり、同等の実績であることが判る。

Fig. 7, Fig. 8 は圧縮強度および弾性波速度と純掘進速度 (純掘削量 (m<sup>3</sup>/h)) の関係について過去の施工実績から得られたデータと本工事で得られたデータを比較したものである。

両図を見ると、圧縮強度または弾性波速度が大きいほど、掘進速度が小さくなる傾向であり、定性的には岩盤強度と TBM 掘削能率には関係が認められるが、ばらつきが大きいので、その関係を正確に推定することは現時点では困難である。

これらのことから TBM は機械仕様 (あるいは機種) によって掘削性能の特性があり、掘進速度の推定においては仕様 (機種) 毎の整理を行う必要があると考えられる。

今後、多くのデータが蓄積されれば、これらの関係がより明確になるものと考えられる。

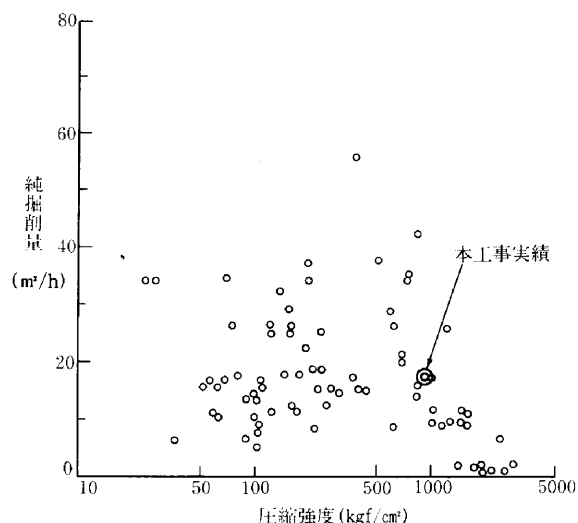


Fig.7 純掘削量と圧縮強度との関係<sup>4)</sup>

#### 4-2 掘進速度の推定

掘進速度は、主としてカッターがいかにか効率よく岩盤を切削していけるかにかかっている。掘進速度は、岩盤強度・組成等の掘削地盤の条件、カッターの配置・種類、機械の性能等の TBM の仕様など様々な要因に影響される。これらをカッターヘッド 1 回転当たりの切込み量 ( $p$ ) で代表させると、掘進速度は次式で表される。

$$V = p \cdot m \cdot \alpha$$

$V$  : 掘進速度 (m/h)

$p$  : 1 回転当たりの切込み量 (m)

$m$  : 1 時間当たりのカッターヘッド回転数 (r.p.m × 60)

$\alpha$  : 同一カッター軌跡上を回転するカッター数

切込み量  $p$  は、上記のような種々の要素によって異なる値をとる。定性的には加圧力を増加すれば  $p$  の値は増加する傾向にあるが、機械の能力によって上限は制限される。また、安定した掘削を行う上でも切込み量を管理する必要がある。

今回の実績から切込み量を試算すると 3.2mm となり、過去の実績からも適当な値と判断できる。Table 4 に同機種 (掘削径は 3300mm) での施工実績との比較を示す。

TBM 掘削能率に影響する要因は岩の性状、機械の性能等、多岐にわたり、施工管理は経験に負うところが極めて大きい。今後、TBM の施工が増加する中で、各要因と切込み量  $p$  との関係を把握し、いかに精度よく切込み量  $p$  を推定することができるとが課題である。

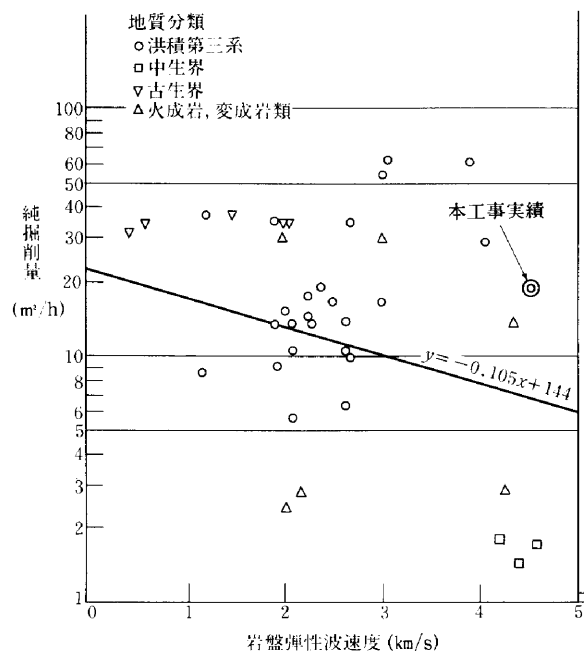


Fig.8 岩盤弾性波速度と純掘削量<sup>4)</sup>

Table 4 切込み量の比較

	本工事	秋葉放水路 <sup>3)</sup>
岩種	砂岩	黒色片岩
一軸圧縮強度 (MPa)	98.1	80以下
割裂引張り強度 (MPa)	13.2	11以下
P波伝播速度 (km/s)	5.4	3~4
切込み量 (mm)	3.2	2.8~3.2

§ 5. カッター消費量

カッターはTBM掘削の中で重要なファクターである。カッターが摩耗すると掘削能率が低下するため、摩耗が基準値以上になると交換する必要がある。本工事では5mmの摩耗を交換の目安としたが、カッターの交換基準としては絶対的なものではなく、経験者の判断により行った。

カッター交換は工程に直接影響し、本工事では稼働日のうち1割弱を占めた。カッターの交換回数が減る(カッターの寿命が延びる)と、また、交換が簡易にできると掘削能率を上げることができる。

カッターの寿命の指標としては、転走距離Sと掘削体積Vとがある。

(1) 転走距離による指標

転走距離Sは次式で表される。

$$S = 2 \pi r \cdot a \cdot H$$

ここに、r : センターからカッターまでの距離

a : 回転数 (r.p.m)

H : 稼働時間

Fig. 9 に本工事でのカッターの転走距離の分布を示す。本工事でのカッターの平均転走距離は350kmであった。

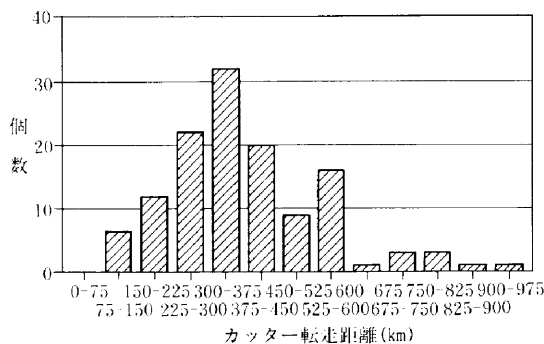


Fig.9 カッター転走距離

(2) 掘削体積による目安

カッター1個の掘削体積は次式で表される。

$$V_k = \pi/4 \cdot (r_{k+1} - r_{k-1}) \cdot (r_{k+1} + 2r_k + r_{k-1}) \cdot L$$

ここに、

$r_k$  : センターからカッターまでの距離

$r_{k+1}$  :  $r_k$ の一つ外側にあるカッターまでの距離

$r_{k-1}$  :  $r_k$ の一つ内側にあるカッターまでの距離

L : カッター交換までに進行した距離

Fig. 10 に本工事でのカッター1個当たりの掘削数量分布図を、Fig. 11 に圧縮強度とカッター消費量に関して本工事と過去の実績<sup>4)</sup>の比較を示す。

本工事でのカッター1個当たり(センターカッターを除く)の平均掘削体積は50.6m<sup>3</sup>/個(0.02個/m<sup>3</sup>)であった。

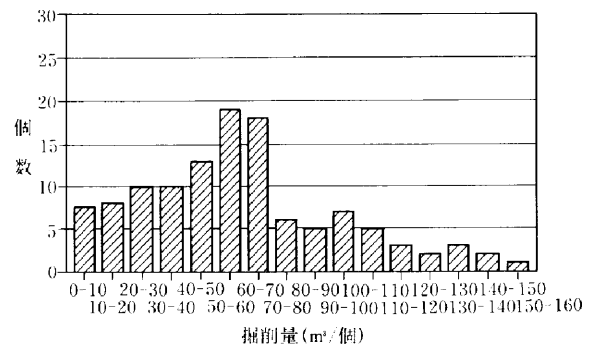


Fig.10 カッター1個当たりの掘削数量

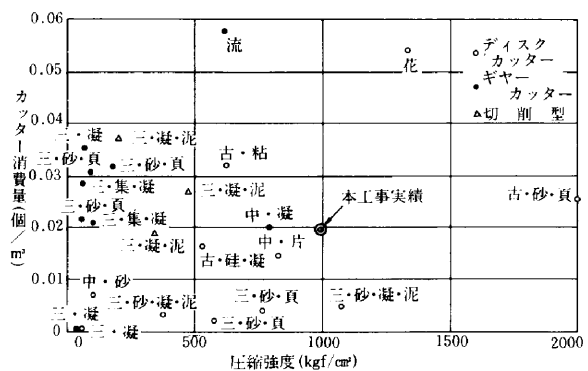


Fig.11 カッター消費量と圧縮強度の関係<sup>4)</sup>

§ 6. まとめ

(1) 掘進速度およびカッター消費量について

TBM掘削の施工能率やカッター消費量は経験上設定しているのが現状である。その意味では本工事での実績は貴重なデータになると思われる。しかし、工事を計画、実施する上では、これらの値を岩盤の性状や機械仕様をパラメータとして推定する方法が確立されることが

望ましい。

本工事における TBM の純掘進速度、カッター切込み量、転走距離、および消費量は以下のとおりであった。

- ①純掘進速度；平均31mm/min，最大48mm/min
- ②カッター1回転当たりの切込み量；3.2mm
- ③カッターの転走距離；350km
- ④カッター消費量；0.02個/m<sup>3</sup>

これらは、限定された条件下での値であり、これらの値にどの程度の汎用性があるか不明である。今後、これらの値の推定方法を確立していく上では、岩盤性状や機械仕様の色々なパラメータ毎の実績を整理し、データを収集することが必要である。

#### (2) 曲線施工について

曲線施工の純掘進速度は直線施工と同等であるが、測量等のマシンの姿勢制御に必要な時間が直線施工の2倍程度となり、工程管理上の影響は大きい。この影響で掘進速度は80～90%に低下する。

#### 参考文献

- 1) 杉本 清・吉川 太：新愛本水力発電所導水路トンネルの急速施工，土木学会論文集，第355号，VI-2，pp. 82～90，1985.
- 2) 西田 孜・松村義章・宮永佳晴：TBMによる斜坑への挑戦，土木学会誌，Vol.66，No.9，pp.16～24，1981.
- 3) 渡辺邦男・山田秋夫・砂道紀人：TBM（パイロット機）による導坑掘削 秋葉第三発電所放水路トンネル，トンネルと地下，Vol.21，No.3，pp.43～51，1990.
- 4) 西松建設株式会社：TBM 施工マニュアル，昭和63年11月.
- 5) 三谷裕次郎・川村正身・青木実：導水路トンネルのTBMによる施工，第10回西松建設トンネルシンポジウム論文集，平成3年11月.