

TBMの基本仕様の傾向と掘進性能の実績 BASIC SPECIFICATIONS AND EXCAVATING PERFORMANCES OF TBM

菊地富良 ・ ・ 東海林良美 ・ ・ 川北真嗣 ・ ・ ・ 中島英輔 ・ ・ ・
Tomiyoichi Kikuchi, Yoshimi Toukairin, Masatsugu Kawakita, Hidesuke Nakashima

Recently, the tunneling method of TBM has been introducing actively into the mountain tunnel construction to reduce the total cost, because the method can achieve the construction more speedy and safely compared with another tunneling method.

Authors has been researching to select the best application type of TBM suitable to the geological conditions and the performances to be called for, according to the investigation of construction reports of TBM applied recently in Japan and overseas.

This paper shows the basic specifications corresponding to the TBM type and the machine diameter, and excavating performances (thrust, torque, and speed, etc) of 5m class TBM in diameter.

1. まえがき

TBMとは、カッタヘッドに取り付けたローラカッタを岩盤に押し付けて圧砕しながら掘進する全断面掘削機であり、掘削速度が速い、硬岩掘削が可能である、安全である、等の特徴があり、しかも地山を傷めない利点もある。この利点を生かし工事費の削減を目的として、最近我が国においてもTBMの山岳トンネル工事への積極的な導入が図られている。

国内のTBMの施工実績は、円形の掘削断面をそのまま利用できる導水路トンネルでは従来より用いられている。最近では、道路トンネルにおいても長大トンネルの避難坑掘削にφ4.5m級TBMが、第二東名、名神高速道路の超大断面トンネルの先進導坑掘削にはφ5m級TBMが採用され、施工実績も着々と増えつつある。

そこで筆者等は、最近におけるTBM施工実態を調査し、それらの施工実績をもとに、TBMの地質条件に応じた型式選定や仕様の決定とこれに基づく性能検討、TBM工法の施工計画などを行っている。また、TBMの地山の急激な変化への対応、大断面化等の課題にも取り組んでいる。

本稿は、これらの調査結果の中から、TBMの用途・月進・型式・掘削径と基本仕様（本体重量、カッタサイズ、取付個数、推力、カッタトルク、カッタモータ出力等）の傾向について、また、掘削径4.5m級の掘進性能（推力およびトルクと掘進速度の関係）の実績について述べるものである。

* (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所 研究第一部
** 日本道路公団 名古屋建設局
*** (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所 所長

2. TBMの用途

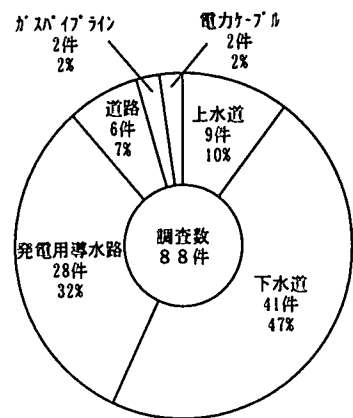
TBMは、世界で約 700 件以上の施工実績があり、日本では昭和 39 年に新居浜での発電所導水路トンネル（掘削径 2.3 m）に使用されてから、約 120 件の実績がある。

このうち、中小水力開発を目的にTBMの開発・普及が図られた昭和 57 年以降、過去 15 年間のTBMの施工実績を用途別に分けると図－1 のようになる。

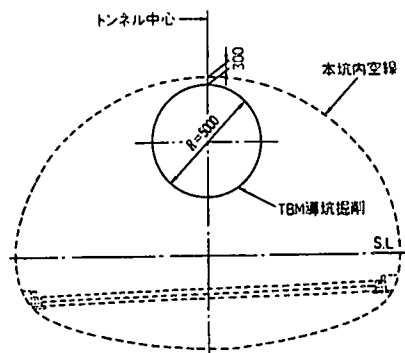
TBMの掘削断面をそのまま利用する導水路や上下水道が全体の約 90 %を占めている。このうち掘削径の最大は滝里発電所導水路トンネルの 8.3 mである。

道路への採用は全体の 7 %であり、鉄道への採用は昭和 40 年代～ 50 年代前半までに 12 件あったが昭和 57 年以降はない。道路および鉄道への使われ方は先進導坑用としての計画であり、掘削径は 5 m程度止まりである。

これから建設される第二東名、名神高速道路のトンネルは、掘削幅が 19 m、掘削断面積が 200 m²程度となることから、本坑の地質確認、水抜き、不良箇所の事前手当用として掘削径 5 mのTBMにより先進導坑を掘進する計画であり、清水第三トンネル¹⁾で最初に施工された。この場合の本坑と先進導坑の位置関係は図－2 のとおりであり、TBMには高速掘進が要求されている。



図－1 過去 15 年間のTBM実績の用途別件数



図－2 TBM先進導坑の位置

3. 進行実績

国内の過去 15 年間のTBM施工実績（図－1）から、進行実績が得られている約 80 件のデータ（リーミングを除く）を用いて、掘削径ごとの月進について型式別、岩種別の傾向を調査した。調査データの概要は、TBMの型式ではフルシールド型が全体の 85 %を占め、掘削径では 2.0 ～ 3.0 m、施工延長では 1 ～ 3 km の実績が多くを占めている。

3.1 TBMの型式別の月進

TBMの型式別の月進（最大、平均）を図－3 に示す。図－3 から以下のことが言える。

① TBMの型式別では、オープン、ルーフサポート、フルシールドとも、最大月進の最高は 500 m/月程度であり、平均月進の最高は 300 m/月程度である。

② TBMの型式ごとに求めた最大月進、平均月進のそれぞれの平均値は表－1 のとおりである。

表－1 において、フルシールド型の月進が他の 2 型式の月進より低いのは、3 型式中最もデータが多いこともあるが、主に地質条件の違いによるものと考えられる。

表－1 TBMの型式別月進（件数の平均値）

型 式	オープン	ルーフサポート	フルシールド
進 行	(7 件)	(5 件)	(67 件)
最大月進 (m/月)	390	350	290
平均月進 (m/月)	210	200	170

3.2 岩種別の月進

岩種別の月進（最大、平均）を図-4に示す。

図-4からは以下のことが言える。なお、同図では岩種を成因により下記a)～d)の4通りのグループにまとめ傾向などを見ることにした。

- a) 火山岩（流紋岩、安山岩）
- b) 半深成岩（輝緑岩）
深成岩（閃緑岩、花崗岩、蛇紋岩）
- c) 堆積岩（礫岩、砂岩、頁岩、凝灰岩、
粘板岩、泥岩、チャート）
- d) 変成岩（片岩、片麻岩）

- ① 最大月進の最高は、堆積岩グループ、半深成岩・深成岩グループが500 m/月のやや上、他の2グループは500 m/月のやや下である。平均月進の最高は堆積岩グループが300 m/月の上、他の3グループが300 m/月程度と堆積岩グループの方が他より上回った進行になっている。

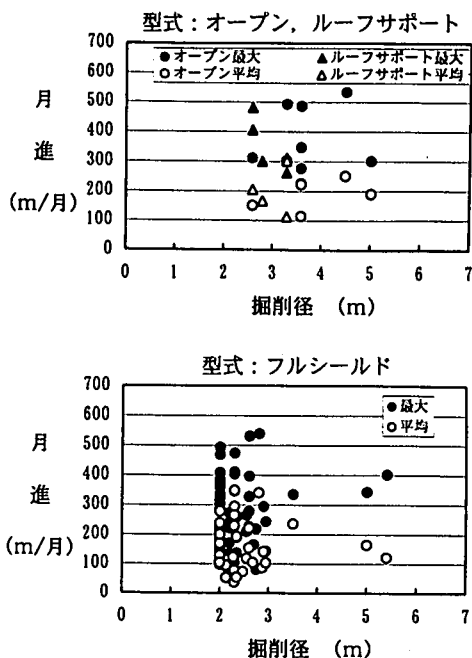


図-3 型式別の月進（最大、平均）

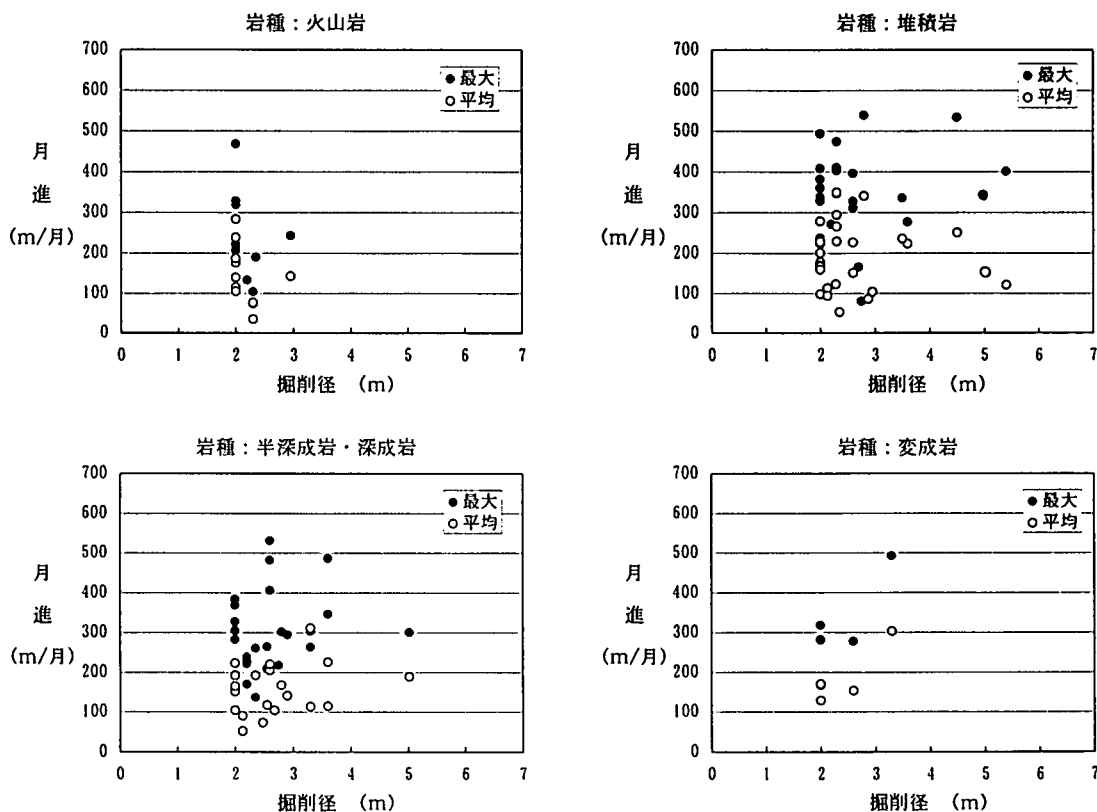


図-4 岩種別の月進（最大、平均）

② 実績が多い半深成岩・深成岩グループと堆積岩グループとの月進（平均値）を比較すると表－２のとおりである。この結果からすると、地質変化の度合いにもよるが、半深成岩・深成岩グループより堆積岩グループの方が進行が上がっており、掘り易いことが伺える。

③ 火山岩グループと変成岩グループについては、実績が少ないので明確ではないが半深成岩・深成岩グループに似た傾向にあると言える。

表－２ TBMの岩種別の月進（件数の平均値）

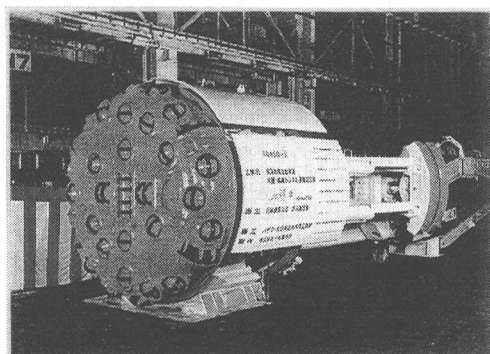
岩 種 進 行	半深成岩 深成岩 (30 件)	堆積岩 (32 件)
最大月進 (m/月)	300	350
平均月進 (m/月)	160	190

4. 掘削径と基本仕様の傾向

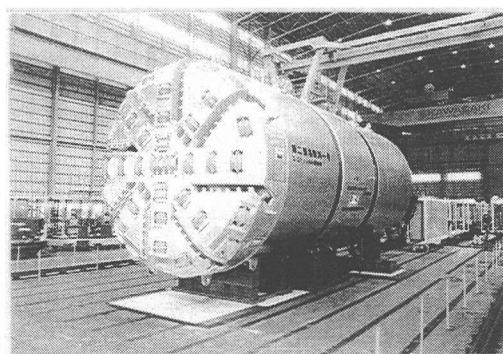
国内の最近のTBM施工実績のうち、下記8件のTBMについて、掘削径と基本仕様の傾向を調べた。

- ① 本州四国連絡道路舞子トンネル先進導坑（ ϕ 5.0 m、オープン型）
- ② 東海北陸自動車道袴腰・城端トンネル避難坑（ ϕ 4.5 m、オープン型）
- ③ 第二東海自動車道清水第三トンネル先進導坑（ ϕ 5.0 m、フルシールド型）
- ④ 秋田自動車道湯田第二トンネル先進導坑（ ϕ 3.5 m、フルシールド型）
- ⑤ 宮ヶ瀬ダム津久井導水路トンネル（ ϕ 5.4 m、フルシールド型）
- ⑥ 宮ヶ瀬ダム道志導水路トンネル（ ϕ 3.5 m、フルシールド型）
- ⑦ 日高発電所放水路トンネル（ ϕ 3.99 m、フルシールド型）
- ⑧ 平谷水力発電所平谷・川合導水路トンネル（ ϕ 2.6 m、フルシールド型）

このうち、オープン型、フルシールド型の各例として②および③のTBMを写真－1、写真－2に示す。



写真－1 ϕ 4.5 mオープン型TBM



写真－2 ϕ 5.0 mフルシールド型TBM

TBM掘削径と基本仕様の関係は図－5～図－10のおりであり、下記の傾向が見られる。

(a) 掘削径と本体重量、総重量

図－5に示すように、ほぼ比例関係にあるが、 ϕ 5 mフルシールド型TBMが他より重いのは、R 30対応で中折れ機構を有し、プロテクタ装置も重く頑丈な構造となっているせいである。

(b) 掘削径とカットモータ出力、総出力

カットモータ出力は、カットヘッド周速の上限から決まる回転数 (rpm) と回転トルク (tf・m) から決まるが、図－6に示すように、 ϕ 4.5～ ϕ 5.4 mクラスのモータ出力は900kwで同様な仕様である。総出力はこれに推進用のスラストジャッキ、グリッパジャッキ、シールドジャッキ等の油圧機器類の出力が加わる。

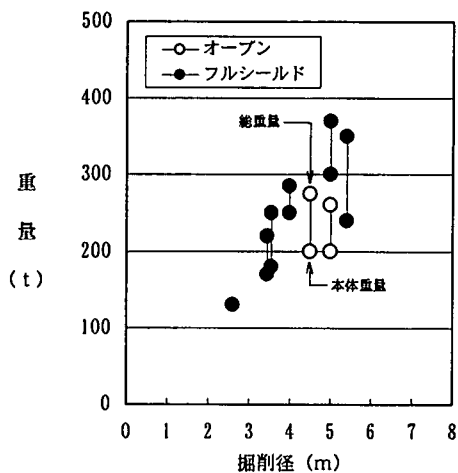


図-5 掘削径と本体重量、総重量

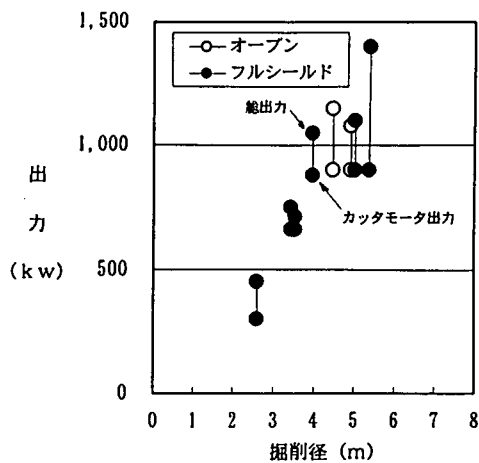


図-6 掘削径とカットモータ出力、総出力

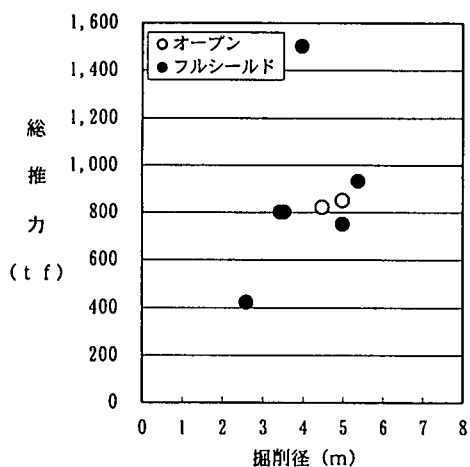


図-7 掘削径と総推力

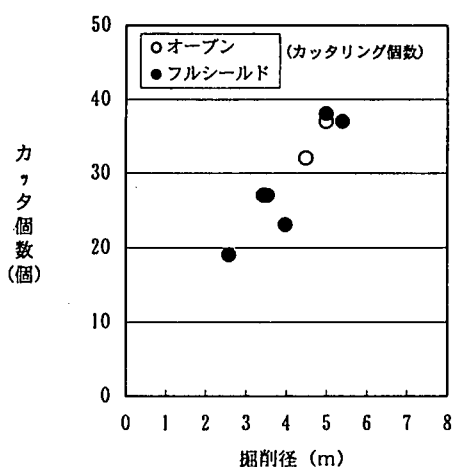


図-8 掘削径とカッタ数

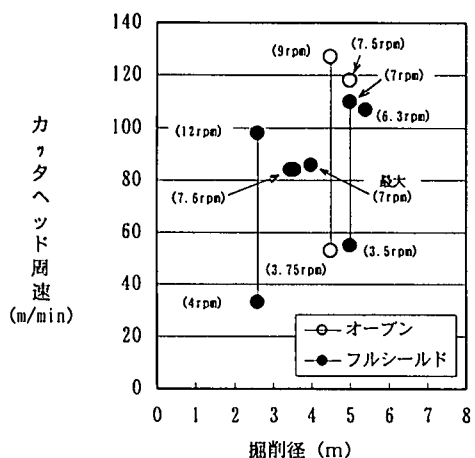


図-9 掘削径とカッタヘッド周速

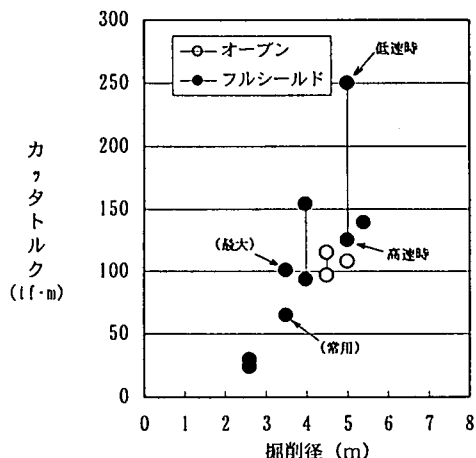


図-10 掘削径とカッタトルク

(c) 掘削径と総推力

最近では、 $\phi 5$ m前後のTBMには17インチの大径のカッタを採用して、カッタ推力、切込み深さ、および許容周速を上げ、全体の掘進速度を上げる傾向にある。

TBMの総推力は、カッタヘッドにかかるカッタ押付け力、本体と地山との摺動抵抗および後続台車の牽引力の和となる。水平トンネルの場合のカッタ押付け力は、カッタのベアリングの強度および若干の余裕より決まる(17インチカッタでは、カッタ1個当たり最大22tf程度)。本体摺動部の抵抗は摺動部重量と摩擦係数(0.3～0.4程度)の積で算出される。後続台車牽引力は、台車重量と牽引抵抗(0.1程度)の積による。カッタ押付け力、本体摺動抵抗、後続台車牽引力の和による必要推力に装備余裕を見込んでスラストジャッキの容量が決められる。

図-7から、 $\phi 3.5$ mフルシールド型TBMの総推力は800tf、 $\phi 5$ m程度のTBMの場合の総推力は750～930tfである。なお、覆工形式にECL工法を採用している $\phi 3.99$ mフルシールド型TBMの総推力は1,500tfとなっている。

(d) 掘削径とカッタ数

TBMに取付けるローラカッタは、カッタボディ(カッタハブ)と刃先であるカッタリングに分かれており、カッタリングはそろばん玉状のリング1枚または2枚を並べた型式ものが用いられ、材質としてはニッケルクロムモリブデン鋼系のものが多い。カッタ数はカッタの軌跡間隔(一般に6～10 cm)を基に設計され、図-8に示すように、掘削径と比例関係にある。

(e) 掘削径とカッタヘッド周速(回転数)

TBMの掘削性能を決定する基本項目は、推力、トルク、カッタヘッド回転数である。カッタヘッド回転数は、ローラカッタ単体やカッタヘッドのシールやベアリングによって上限がある。この周速は、ローラカッタの場合で通常100～130 m/min程度であり、図-9に示すように、今回調査した $\phi 4.5 \sim 5.4$ m TBMの周速もその範囲にある。

回転数の設定は、通常、電動機のポールチェンジによる2～3段切替えやインバータ制御による可変式などによる。一般に、地山が良い状態のときは高速で掘削し、地山が悪いときは低速で掘削して崩落を少なくする運転が行われる。

(f) 掘削径とカッタトルク

カッタヘッドトルク(必要トルク)は、カッタ個数、カッタ押付け力(荷重)、カッタの転動係数、カッタヘッド中心から全カッタの平均取付け半径の積で算出される。一般にカッタ押付け力は、17インチカッタの場合最大22tfで設計されており、転動係数は0.1(硬岩)～0.15(軟岩)と考えられている。これらから算出される必要トルク、および回転数を満足するようにカッタモータ出力を設定して装備トルクが決められる。

図-10では、 $\phi 5$ m程度のTBMの場合、カッタトルク(装備トルク)は、高速時または常用時で100～140tf・mとなっている。

5. 掘進性能の実績

掘進性能の実績として、 $\phi 4.5$ mオープン型TBMによる避難坑施工の運転実績(総推力と純掘進速度の関係および総推力とカッタトルクの関係)を図-11および図-12に示す。

5.1 対象データ

トンネルの地質は新第三紀の安山岩、凝灰角礫岩が主体で、対象としたデータは、地山等級がCⅡ(ロックシュミットハンマ反発度が20～50程度、支保はファイバーモルタル吹付け)の値である。

各データは、推進1ストローク（1.5 m）毎の値で、ストローク 20 cm毎に自動入力される測定値の平均値であり、純掘進速度はスラストジャッキのストローク長と掘進時間から算出される。また、総推力はスラストシリンダの油圧から、カッタトルクはカッタ電流からそれぞれ換算した値である。

5.2 TBM運転状況

ここで使用したTBMは、純掘進速度とカッタ回転数をオペレータが操作しながら掘削している。純掘進速度の設定は0～12 cm/min まで可能であるが、最大を10 cm/min で制御しており、1 cm/min 単位で地山状況に応じて速度を変化させている。また、カッタ回転数は3.9、5.7、7.5、9.5rpm の4段変速（インバータ制御）であり、純掘進速度と同様に地山状況に応じてオペレータが直接操作している。

対象とした地山等級CⅡでは、1ストローク当たりの掘削時間が25～30分を目安とした運転が行われ、純掘進速度は平均6.5 cm/min、カッタ回転数は大半が9.5rpm であった。

5.3 総推力と純掘進速度の関係

地山条件が同じでカッタ回転数を一定にした場合、純掘進速度は推力と正比例関係を示すのが一般的傾向である。しかし、今回の傾向は図-11 に示すように、総推力との相関はほとんどなく一定である。

これは、前述したようにオペレータが純掘進速度を操作しながら掘削していることによるものであり、総推力は地山の状況により変動し地山が良好であるほど大きな推力となる。

CⅡの地山はシュミットハンマ反発度が20～50（圧縮強度は100～1,000kgf/cm²程度と推定）で岩盤強度の分布は広範囲であったとみなされる。このため、純掘進速度を、例えば6 cm/min とすると地山の変化により総推力が100～600tf まで変化し、グラフはX軸に平行な傾向を示すものとなった。

なお、本TBMの装備推力は820tf であるが、掘削時の総推力は最大で600tf、平均は260tf 程度である。これより撓動抵抗と牽引抵抗（約40tf）を除くカッタの押付け力の負荷率は、最大が68%であり、平均では27%にとどまっている。

5.4 総推力とカッタトルクの関係

図-12 のように、カッタトルクは総推力と正の相関性を示しており、推力の増加によりカッタトルクが増加する傾向が見られる。この傾向は一般的傾向と同様である。カッタトルクは最大で40tf・m、平均は25tf・m（装備トルク115tf・mの約20%）である。

なお、図-12 で両者の関係式および相関係数を求めたが、関係式からY軸の切片が16tf・m 程度であるので、これは空転トルクに近い値を表していると考えられる。

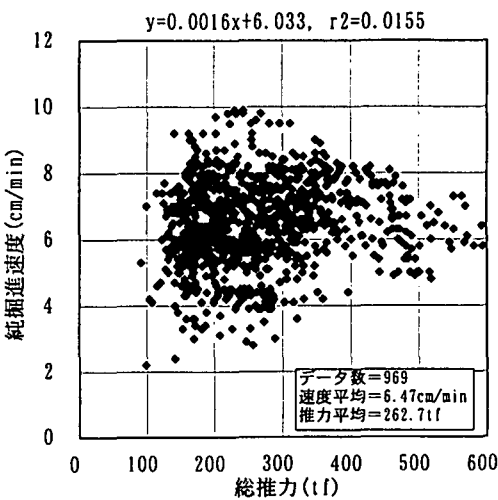


図-11 総推力と純掘進速度

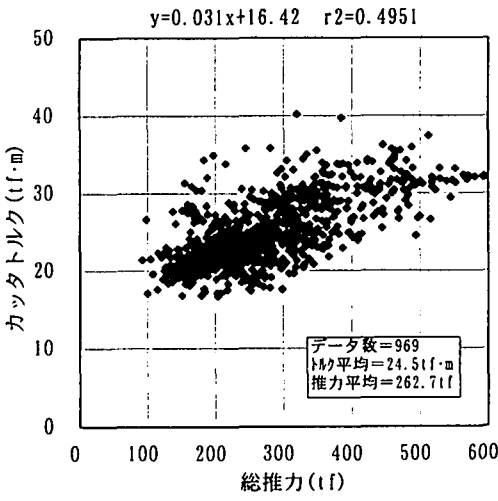


図-12 総推力とカッタトルク

5.5 地山条件と運転制御

前述のように、当トンネルでは、地山等級CⅡ程度の岩盤（推定一軸圧縮強度 $1,000\text{kgf/cm}^2$ 以下、平均 500kgf/cm^2 程度）であったため、TBMの運転はカット貫入量（＝純掘進速度）をある範囲内で制御する方法とした。その結果、地山状況により推力やトルクが変動するデータとなった。

一方、硬質の六甲花崗岩（一軸圧縮強度 $1,000 \sim 2,500\text{kgf/cm}^2$ 程度）を $\phi 5\text{m}$ オープン型TBMで掘削した実績²⁾では、堅硬な地山になるほど同一推力でもカットの貫入量が小さくなるので、それを防ぐため、図-13に示すように、推力を上げて掘進していた。すなわち、推力を制御し、純掘進速度とトルクが変動するデータとなっている。

純掘進速度を制御して掘進する場合は推力やトルクの変動が、推力を制御して掘進する場合は純掘進速度やトルクの変動が地山条件（岩の硬さ、亀裂の程度など）の違いを表しているものとみなすことができよう。

なお、軟質な地山では地山を乱さないよう cutterヘッドの回転を低速にし、推力の急激な変化にも注意した運転が必要である。

6. おわりに

最近、TBMのより高速掘進への取り組みがなされている。掘削径 5m 級TBMにおいて 17インチ カッタの使用が一般的になってきており、従来の 15.5インチ カッタより大径化し高スラストが掛けられるようになった。TBMと組み合わせる支保工の開発が進み、ずり出しについても延長の長いトンネルにおいては連続ベルコンが採用され、TBMの掘削時間率の向上を図っている。

また、掘削径 8.3m の大断面TBMが導水路トンネルで稼働中であり、最大月進 380m の進行を上げていると聞いている。

今後は、これらの掘削実績も調査し、本稿を補完して行きたいと考えている。

7. 参考文献

- 1) 田中 一：清水第三トンネルのTBM導坑ブレイクスルー（貫通）、トンネルと地下、vol.28、pp15～22、1997.6.
- 2) 河野英雄・藤原洋一・三島功裕：直径 5m のTBMで硬岩に挑む、トンネルと地下、vol.25、pp7～14、1994.2.

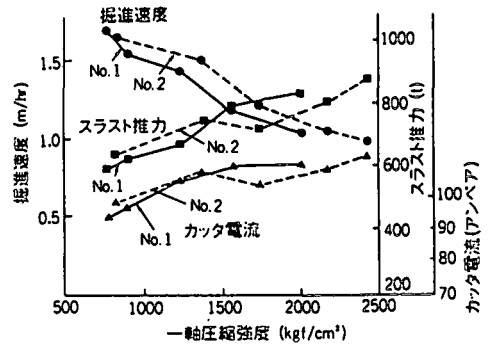


図-13 六甲花崗岩掘削時のTBM掘進性能