

TBM の掘削特性に関する研究 (小河内と香港柴湾 (チャイワン) の施工例について)

Study on Characteristics of TBM Excavation
(TBM Projects in Ogouchi and Chai Wan)

荒井 紀之*
Noriyuki Arai

石山 宏二*
Koji Ishiyama

稲葉 力**
Tsutomu Inaba

青木 実***
Minoru Aoki

鈴木 信衛****
Nobue Suzuki

江藤 俊行*****
Toshiyuki Eto

要 約

本研究は、小河内と香港柴湾の2つの現場についてTBMの機械的特性と地山条件との関係を基礎的に調査した結果を報告するものである。まず、地山条件を明らかにするために両現場で坑内調査を行い、岩盤分類、亀裂調査、ロックシュミットハンマーによる反発値の測定を実施した。ついで、TBMの掘削特性を明らかにするために純掘削速度、カッターヘッドに作用するスラスト、トルク等のデータを収集した。その結果、TBMの掘削特性と地山条件との間にいくつかの興味ある知見が得られた。さらに、香港で行ったペネトレーション試験より、スラストとペネトレーション(1回転当りの掘削長)とは、べき関数で近似できることがわかった。また、トルクとペネトレーションとは、岩盤によらずほぼ同一の正比例関係にあることがわかった。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 工事概要
- §3. 地質概要
- §4. 調査方法
- §5. 調査結果と考察
- §6. まとめ

§1. はじめに

最近、国内においてもTBM(トンネルボーリングマシン)による施工例が増加している。これは、急速施工性や騒音・粉塵・振動等の建設に伴う公害が少ないといっ

たTBMの長所が評価されるとともに、機械の性能が向上し多様な地山条件下においても掘削が可能になりつつあることが大きな理由と思われる。TBMの工事を受注する場合、地山条件に適したTBMの選定、純掘削速度、カッターコスト等を事前に予測することが重要である。それには、施工データの蓄積が不可欠であるため、小河内の導水路工事と香港柴湾(以後、香港と記す。)でのケーブルトンネル工事において、TBMの掘削特性に関する基礎調査を実施した。本文では、坑内調査結果に基づき、掘削特性に影響すると考えられるTBMの機械要因(純掘削速度、スラスト、トルク等)と岩盤物性(亀裂密度、ロックシュミットハンマーによる反発値等)との関連性を論じる。なお、TBM工法を評価する場合、純掘削速度以外に、カッター交換、支保、ずり出し、機械のメンテナンス等の作業効率も大きく影響していると考えられるがここでは触れていない。

*技術研究所土木技術課
**技術研究所土木技術課副課長
***関東(支)小河内(出)所長
****香港(支)チャイワン(出)副所長
*****香港(支)設計課係長

§ 2. 工事概要

今回、調査対象とした2つの工事の詳細については、すでに他の文献に発表されているので、それらを参照されたい^{1),2)}。ここでは、その概要を述べるにとどめる。

小河内の導水路工事は、多摩川上流に位置する小河内ダムの貯水池取水施設と発電所を導水路で連絡するものである。TBM工法が採用されたのは、近隣する既設構造物の防護と、周辺部が秩父多摩国立公園に位置し、自然保護に配慮したためである。また、本トンネル施工上の特徴として、トンネル長の約4割を曲率半径100mの曲線部が占めていることがあげられる。一方、香港のTBM工事は、香港島を縦断し高圧送電線用のトンネルを施工するものである。当初は在来工法により計画されていたが当社香港支店がTBMによる代替案を提出し採用された。これは、トンネルの一部が人口密集地帯を通過するため、騒音・振動等の建設に伴う公害を最小限に抑えるとともに、急速施工が可能といった利点が評価されたためである。

両工事の施工概要、工事に使用したTBMの仕様および外観を、Table 1, Photo 1, Photo 2に示す。

§ 3. 地質概要

小河内では、中生代ジュラ紀の砂岩、砂岩・粘板岩互層からなる堆積岩類が分布している。電研式の岩盤分類によれば、 C_H から C_M 級のものが大部分を占め、部分的に C_L 級岩盤が分布している。砂岩は、暗灰色塊状・硬質で風化・変質の程度は破碎帯を除くと軽微であり、しばしば幅数mmの石英脈が不規則に発達している。粘板岩は、黒色を呈し軟質で剝離性に富み、砂岩中にレンズ状に分布することが多い。断層・破碎帯については規模の

大きなものは認められず、本調査区間では幅約1mから数10cmのものが十数本存在し、破碎部は角礫状を呈するものが多い。また、砂岩中には石英脈に沿い微小割れ目が発達している。湧水については、一部の区間において数 l/min 程度が認められるほかは、滴水程度のものがほとんどである。

一方、香港における掘削域の地質は、香港花崗岩が大部分を占め、南側のナムフン坑口付近には一部洪積土層が分布する。香港花崗岩は、ジュラ紀末期から白亜紀初期にかけて生成された比較的新鮮で均質な花崗岩である。また、工事前のボーリング調査等から数本の断層破碎帯が予測されていた。掘削が進むにつれて、ほぼ予測された地点から、幅約10mと幅約5mの破碎帯が出現した。湧水については、一部の区間で0.8~1.2 m^3/min のものが認められた。地山の岩盤等級は、電研式分類で

Table 1 施工条件比較表

	小河内	香港
施工条件		
トンネル用途	導水路	送電線トンネル
トンネル長	710m	約5300m
掘削径	3.6m	4.8m
トンネル線形	直線部 410m 曲線部 300m (曲率半径100m)	直線部 5100m 曲線部 200m (曲率半径400m)
機械条件		
製作会社	ビルト社	ロビンス社
型式	T B II 360 H	T B M 152-261
回転数	10rpm	12rpm
カッター	センター 10inc×6個 フェイス 14inc×24個 ゲージ 14inc×4個	センター 19inc×4個 フェイス 19inc×20個 ゲージ 19inc×8個
ストローク長	1200mm	1830mm
最大スラスト	440t	1024t
電動機出力	約460kW	325kW×7

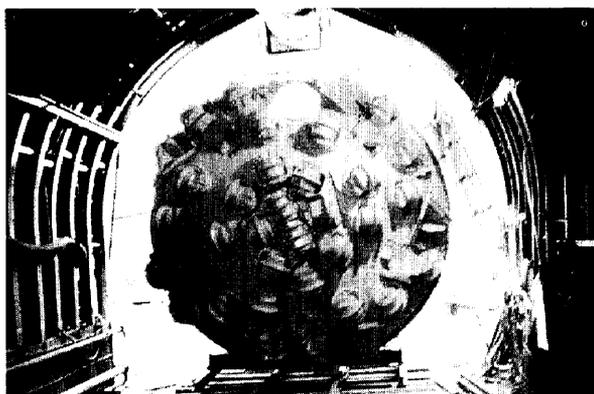


Photo 1 小河内で使用したビルト社のTBM (T B II 360 H)

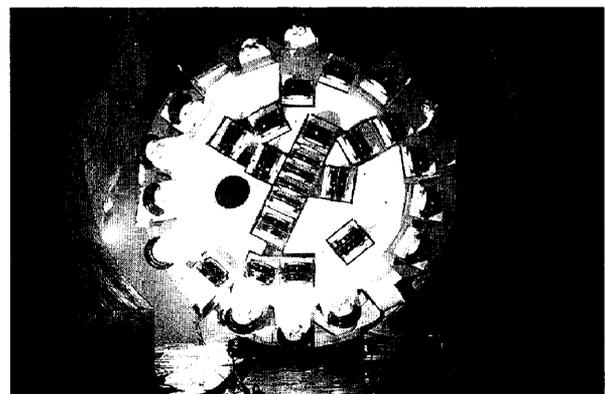


Photo 2 香港で使用したロビンス社のTBM (T B M 152-261)

A から C_H 級岩盤が主に分布し、局所的に C_L 級岩盤が含まれている。

なお、2つの現場の岩石試験結果を Table 2 に示す。

Table 2 岩石試験結果

岩石種	小河内		香港
	砂岩	粘板岩	花崗岩
単位体積重量 (gf/cm ³)	2.684	2.702	2.605
ヤング率 (GPa)	57.9	27.5	54.4
ポアソン比	0.197	0.177	0.181
一軸圧縮強度 (MPa)	98.1	26.2	187.4
割裂引張強度 (MPa)	13.2	3.9	8.4
P波伝播速度 (km/s)	5.40	4.36	4.68
石英含有率 (%)	約10~20	約8	約30~40

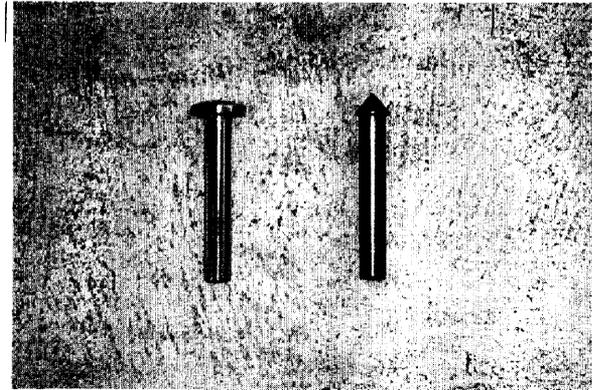


Photo 3 調査に使用した2種類のプランジャー
左側：ロック型 右側：コーン型

§ 4. 調査方法

本文で対象とした調査区間は、TBMにより掘削されたそれぞれ約600m区間である。まず、地山条件を調べるために2つの現場において坑内地質調査を行い、岩盤分類、亀裂調査、ロックシュミットハンマーによる反発値の測定を行った。また、TBMの機械要因である純掘削速度、カッターヘッドに作用するスラスト、トルク等のデータを収集した。また、香港では、地山条件が一定とみなせる短区間において、スラストを多段階に変化させ純掘削速度およびトルクを測定するペネトレーション試験を行った。なお、香港の亀裂および岩盤等級データは、現地のコンサルタントが実施した調査結果を使用した。

小河内の岩盤分類は電研式を用いた。一方、香港側の岩盤分類はIMSに基づいている。これは、亀裂間隔と風化の度合いが分類の基準であり、1から5までの5段階表示となっている³⁾。亀裂調査は、切羽に向い左側のスプリングラインと交差する長さ1m以上の亀裂を対象とし、その走向・傾斜と亀裂長さを記載した。

シュミットハンマーによる反発値測定はスプリングライン上において1m間隔に実施した。プランジャーとして、Photo 3に示すように、ロック型(左側)とコーン型(右側)の2種類を使用した。コーン型を採用した理由は、打撃力が1点に集中するため、ディスクカッターによる破壊メカニズムと同様な局所破壊を生じさせると考え、それにより岩石の割れやすさに関する情報が得られると判断したためである。測定方法としては、いずれのプランジャーにおいても同一箇所を10回連続的に打撃した。また、ハンマーは水平方向に保持し、亀裂直上は打撃しないようにした。

§ 5. 調査結果と考察

5-1 TBMの掘削特性と地山条件について

Fig. 1およびFig. 2は坑内調査結果の総轄図であり、前者が小河内、後者が香港に対応している。下段の図は、トンネルの水平距離に対するペネトレーション(1回転当りの掘削長)、スラスト、トルクの変化を表したものである。小河内の場合、これらに対応する油圧値(それぞれジャッキ圧、カッター圧)がプロットされている。中段は、シュミットハンマーの反発値、亀裂密度の場所的な変化を表している。ただし、これらの機械的、地質的変量は10m区間の平均値である。また、上段は、単位掘削長当りの岩盤に対してTBMが行った仕事量Wの変化を表したもので、詳細については後述する。2つの現場のペネトレーション、スラスト、トルクの変化に注目すると、小河内の場合、曲線部が多いことから純掘削速度が一定になるように制御されており、ペネトレーションの変動幅は小さい。一方、香港では、トルクの上限值を越えない範囲内でスラストを最大にして掘削しており、ペネトレーションは大きく変動している。Table 3は、機械要因と地質要因からなる10個のパラメータ間の、単相関マトリクスを示したもので、対角要素の左下は小河内、右上は香港の相関係数である。ただし、岩盤分類については等級順に点数を与えて解析した。また、吹付が厚い区間のデータは除いた。

(1) ペネトレーションと地質量との関係

ペネトレーションと他の変量との関係に着目すると、香港のデータでは亀裂密度、シュミットハンマーの反発値、IMS岩盤分類の順に相関係数が大きくなっている。一方、小河内のデータでは、ペネトレーションと他の変量との間には、あまり高い相関は認められなかった。これはペネトレーションの変動が小さいためと考えられ

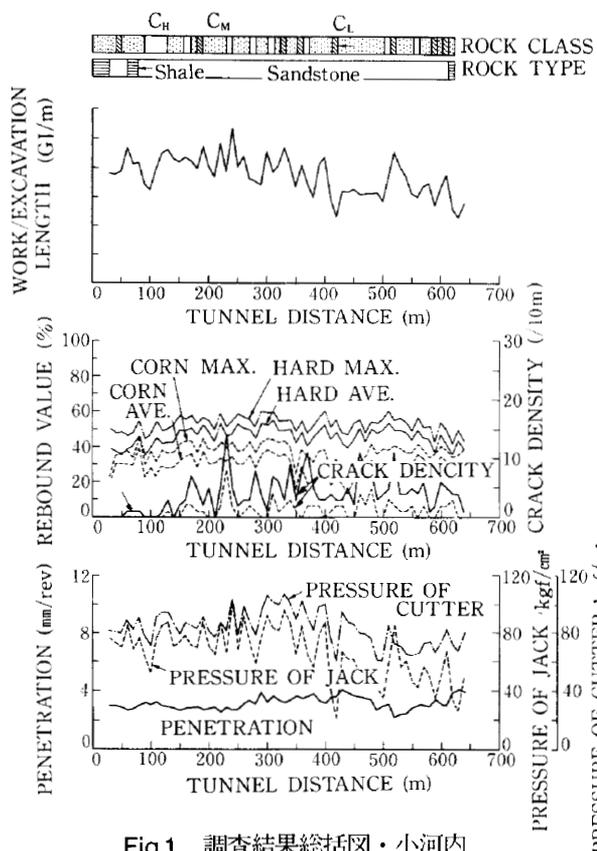


Fig.1 調査結果総括図・小河内

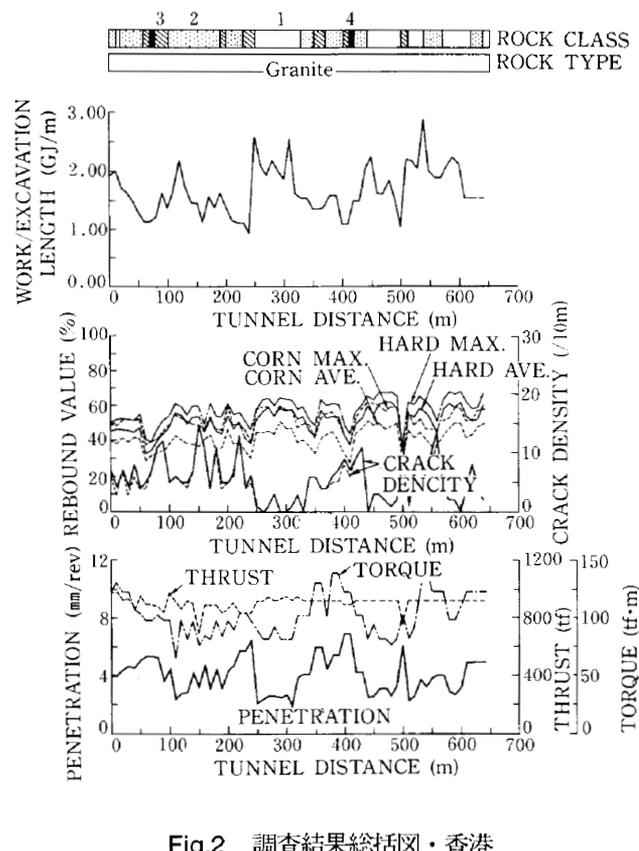


Fig.2 調査結果総括図・香港

Table 3 TBM掘削特性と地質要因からなる10個のパラメータ間の単相関係数マトリクス

	P	THR	TOR	RNHM	RNHA	RNCM	RNCA	RC	FD	W
P	1.000	-0.252	0.543	-0.701	-0.700	-0.707	-0.688	0.749	0.507	-0.798
THR	-0.340	1.000	0.186	0.343	0.381	0.359	0.423	-0.427	-0.528	0.384
TOR	0.125	0.861	1.000	-0.284	-0.383	-0.286	-0.313	0.273	0.276	0.010
RNHM	-0.169	0.295	0.275	1.000	0.853	0.988	0.878	-0.788	-0.559	0.595
RNHA	-0.085	0.241	0.252	0.950	1.000	0.857	0.954	-0.758	-0.630	0.540
RNCM	-0.417	0.476	0.317	0.557	0.563	1.000	0.879	-0.795	-0.549	0.602
RNCA	-0.422	0.390	0.203	0.440	0.435	0.923	1.000	-0.788	-0.636	0.575
RC	0.296	-0.394	-0.393	-0.385	-0.300	-0.312	-0.225	1.000	0.665	-0.700
FD	0.136	-0.062	0.000	0.133	0.301	0.110	0.003	0.238	1.000	-0.459
W	-0.626	0.919	0.683	0.320	0.249	0.542	0.456	-0.503	-0.093	1.000

ただしP：ペネトレーション，THR：スラスト，TOR：トルク，RNHA：ロック型シュミットハンマー平均反発値，RNHM：ロック型シュミットハンマー最大反発値，RNCA：コーン型シュミットハンマー平均反発値，RNCM：コーン型シュミットハンマー最大反発値，RC：岩盤分類，FD：亀裂密度，W：単位掘削長当りの仕事量

る。次に、個々の調査結果について検討する。

(2) 亀裂密度と方向の影響

Fig. 1 と Fig. 2 の中段には亀裂密度に対応する2本の折れ線がプロットされている。実線は、長さが1m以上の亀裂密度であり、破線は亀裂長が2m以上の亀裂密度である。小河内と香港のグラフを比較すると、後者の方が全体として亀裂の規模が大きいことがわかる。また、亀裂の方向性を比較したのが Fig. 3 である。これらは、亀裂の極をシュミットネット上に下半球投影したもの

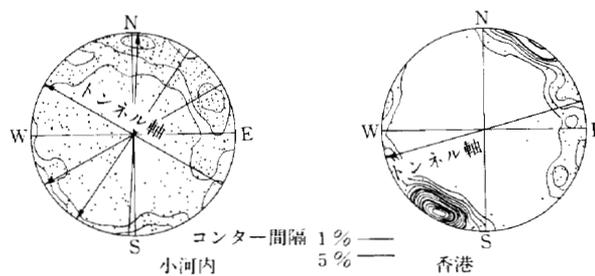


Fig.3 亀裂の極 コンターマップ シュミットネット(下半球投影)

で、図中のコンターは極密度を表している。トンネル軸方向と亀裂の方向に着目すると、小河内では亀裂の方向が分散している上に、トンネル軸も約180°反転しているため、トンネル軸方向と亀裂の方向性との間には相関が認められない。一方、香港の亀裂は、走向 N60°W、傾斜 80°NE を中心とした方向に集中し、トンネル軸と亀裂の極とは約45°の角度をなしている。NIT⁴⁾によれば、トンネル軸に対して亀裂が60°~70°の方向性を有する場合に最大の純掘削速度が得られるとしている。したがって Table 3 に示すように、香港のデータにおいてペネトレーションと亀裂密度との間にある程度の相関が認められたのは、亀裂の規模が大きく、かつ掘削に対して有利な方向性を持っていたためと考えられる。今回、対象とした亀裂はその長さが1m以上のいわゆる節理規模の亀裂であるが、より小規模な亀裂の性質が純掘削速度に影響している可能性があり、今後の検討課題といえる。

(3) シュミットハンマーの反発値

ロック型シュミットハンマーとコーン型シュミットハンマーの最大反発値を比較すると Table 3 に示すように、香港では両者の相関係数が0.99と大きいものに対して、小河内のデータでは0.56の相関係数しか得られていない。また、Fig. 1 より、小河内ではロック型の反発値とコーン型の反発値との差が大きい。この違いは、プランジャーにより岩盤壁面との接触面積が異なるために、一定の運動エネルギーでプランジャーを打撃しても接触部の衝撃応力が異なるためと考えられる。小河内の岩盤は、コーン型のシュミットハンマーで打撃した場合、局所破壊が生じることによって打撃エネルギーが消散し、反発値が急激に低下することがしばしばあった。これに対し香港花崗岩では、このようなことは比較的少なかった。したがって、小河内と香港の測定結果は、各々の岩盤の衝撃応力に対する強度の差が現れたものと考えられる。

(4) TBMの単位掘削長当りの仕事量

TBMが単位長さのトンネルを掘削する際に、岩盤に対して行った仕事量について考えてみる。まず、この仕事量 W は、各カッターに作用する回転抵抗力に転動距離を乗じたものの和で表されると仮定する。各カッターの回転抵抗力を f_i とし、各カッターの軌道半径を r_i 、ペネトレーションを P 、トルクを T と置くと W は次式のように表すことができる。

$$W = 2\pi \sum (r_i f_i) / P = 2\pi T / P \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 1 と Fig. 2 の上段は、1m区間のトンネルを掘削するのに要した仕事量 W をプロットしたものである。ただし小河内のデータについては、トルクが直接得られていないため、相対的な値を示した。良好な岩盤部ではその他の区間に比べより多くのエネルギーを消費していることがわかる。また、この仕事量 W とシュミットハンマーの反発値との相関を調べたところ、Table 3 に示すように両トンネルについて、コーン型の最大値との間に0.60~0.54の相関係数が得られた。反発値とTBMが岩盤を掘削するために消費するエネルギーとの間に、比較的高い相関が得られた理由は、割れにくい岩盤を破碎するためにTBMが大きなエネルギーを消費したためと解釈できる。

5-2 香港のペネトレーション試験

この試験は、岩盤物性が一定とみなせる約1m区間を対象としてスラストを多段階に変化させ、そのときの純掘削速度、トルクを計測するものである。試験は、様々な岩盤等級の区間において合計7回実施した。これらの試験結果を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。前者は、スラストに対してペネトレーションをプロットしたものである。また後者は、ペネトレーションとトルクの間を示したものである。各曲線の右肩には、その試験区間のIMS岩盤等級が示されている。Fig. 4 より、明らかに傾向の異なるP2の試験結果を除くと、スラストが大きくなるにしたがいペネトレーションも増大している。佐藤らの室内実験結果によると、ペネトレーションとスラストの間にはべき乗の関係があることが報告されている⁵⁾。これらの曲線をべき関数により回帰分析したところ、指数定数は2.57~4.34の範囲にばらついた。

$$P = a X^b \dots\dots\dots (2)$$

$$b = 2.57 \sim 4.34$$

X :スラスト(tf), P :ペネトレーション(mm/rev)である。岩盤等級による違いを比較した場合、ばらつきはあるもののスラストが大きくなるほど、岩盤等級によるペネトレーションの差が大きくなり、劣化した岩盤ほど大きなペネトレーションが得られている。

一方、Fig. 5 についてみた場合、ペネトレーションとトルクの間にはP2を除くとほぼ同様な線形関係が認められる。直線による回帰分析を行ったところ、勾配は15.9~24.6、切片は24.0~39.0の範囲に収まり、岩盤等級による差はほとんど認められない。

$$T = a P + b \dots\dots\dots (3)$$

$$a = 15.9 \sim 24.6$$

$$b = 24.0 \sim 39.0$$

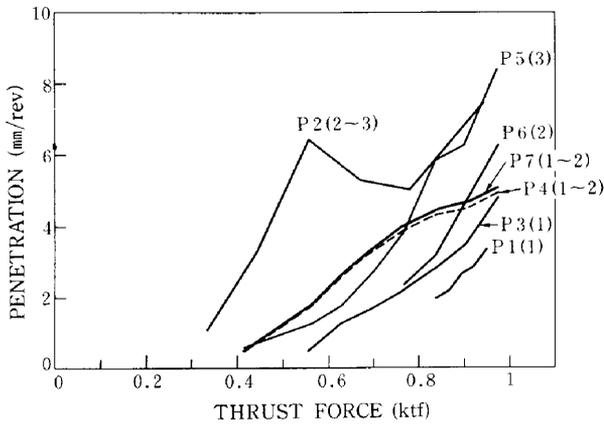


Fig.4 スラストとペネトレーションの関係
()内の数字は試験区間のIMS岩盤分類である

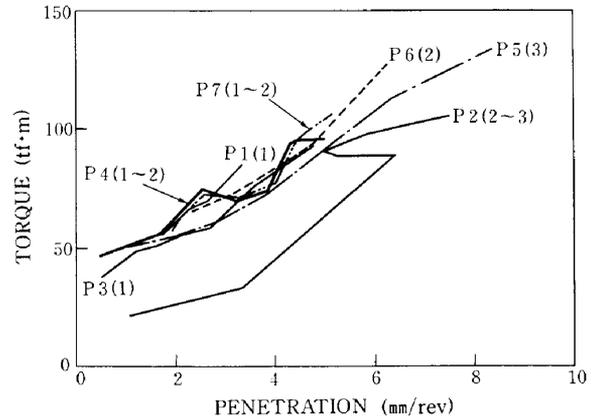


Fig.5 ペネトレーションとトルクの関係
()内の数字は試験区間のIMS岩盤分類である

P : ペネトレーション (mm/rev), T : トルク (tf·m) である。

今後、同様の試験を重ね、各岩盤等級毎に (2) 式の回帰式が得られるならば、ボーリング調査等により掘削路線上の岩盤等級分布を推定し、純掘削速度を予測することが可能であると考えられる。

§ 6. まとめ

1. ペネトレーションと岩盤物性との相関性について、香港では岩盤分類、シュミットハンマーの反発値、亀裂密度と高い相関が得られた。また、TBMが岩盤に対して行った仕事と地質量との相関を調べたところ、2つの現場ともコーン型のシュミットハンマーの反発値と相関が高いことがわかった。

2. 香港のペネトレーション試験結果より、スラストとペネトレーションはほぼべき関数で近似でき、トルクとペネトレーションは、岩盤によらずほぼ同一の正比例関係があることがわかった。

本文をまとめるに当たり、多くの方々にお世話になりま

した。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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，pp.53～86，1991.
- 2) 鈴木信衛・市川寛：大型硬岩 TBM によるトンネルの基本工事計画と施工の途中経過報告，第10回西松建設トンネルシンポジウム論文集，pp.365～392，1991.
- 3) McFeat-Smith I. and Haswell C. K. : Tunneling in Hong Kong, Tunnels & Tunnelling, June, pp.39～44, 1986.
- 4) The Norwegian Institute of Technology Project Report 1.88 - Hard Rock Tunnel Boring, 1988.
- 5) K. Sato, Gong, F. and K. Itakura: Prediction of disk cutter performance using circular rock cutting ring, Proc. Int. Symp. Min. Mech. & Autom. 1, pp.31～40, 1991.