

香港における TBM の掘削特性解析

Study on Characteristics of Tunnelling by TBM in Hong Kong

石山 宏二*	平野 享*
Koji Ishiyama	Toru Hirano
荒井 紀之*	稲葉 力**
Noriyuki Arai	Tsutomu Inaba
市川 寛***	丸山 昇****
Hiroshi Ichikawa	Noboru Maruyama
鈴木 信衛*****	
Nobue Suzuki	

要 約

この研究は、ディスクカッタを装着したフルフェイス TBM(Tunnel Boring Machine) による掘進時のペネトレーション(純掘進速度)を予測することを目的としたケーススタディである。対象としたトンネルは、香港島の全長5.7 km, 直径4.8 m の電力配線用トンネルである。このトンネルを TBM によって掘進中に、ペネトレーションに影響を及ぼすと考えられる各要因を計測して関係を検討した。その結果、ペネトレーションとスラスト力との相関が岩盤状態に依存することが明らかになった。また、ペネトレーションとトルクの関係は、岩盤状態にかかわらず正の比例であることが示された。岩盤特性を表す岩盤分類(IMS法)による等級、き裂密度およびシュミットハンマ反発度とペネトレーションとは強い相関を示した。そこで、これらの関係に基づいたペネトレーションの予測式を提案し、実測値と比較・検証した。その結果、予測式は妥当であることが示された。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 工事概要
- §3. 現場計測
- §4. 掘進速度と機械あるいは地質要因との関係
- §5. おわりに

§1. はじめに

TBM のペネトレーションを定量的に推定すること

は、TBM 採用の是非を検討する上で重要である。ペネトレーションは、TBM の能力に加えて、掘削岩盤の強度等、岩盤特性に強く影響を受けることが知られている(例えば、Farmer *et al.* 1987)。

TBM の能力を決定する要因には、カッタの個数、サイズ、形状、間隔等設計段階で決定されるものの他に、操作時に変数となりうるカッタヘッド回転数、スラスト力、トルクがあげられる。ただし、機械的理由から回転数は一定の場合が多く、スラスト力のみが人為的に操作可能な因子である。また、主な岩盤特性として、岩種固有の強度、石英含有量等の鉱物組成、き裂密度およびその方位、湧水、風化の程度が考えられる。

Howarth and Roxborough(1982)、Sanio(1985)、Sato *et al.* (1991)は、TBM のペネトレーションを推定するために、1個ないし数個のカッタを使用して、岩

*技術研究所土木技術課
 **技術研究所土木技術課副課長
 ***香港(支)技術開発部長
 ****香港(支)柴灣(出)所長
 *****海外工事部土木課副課長

石あるいは所定のき裂を配した試料を破碎し、実験的に切削過程を明らかにしようと試みた。本研究では、ペネトレーション推定のための別のアプローチとして、TBMで掘削された香港のトンネルを取り上げ、機械要因あるいは岩盤特性がペネトレーションに及ぼす影響について現場計測データを基に検討した。ここでは、主に操作時に可変である機械要因のスラスト力、および岩盤特性に大きな影響を及ぼすき裂に着目している。

§ 2. 工事概要

本トンネルは、Fig. 1 に示すように香港島を縦断するように位置し、ラマ島火力発電所で発電された電力を香港島南西部のナムフン変電所から香港島北東部のパーカー配電所へ送電するための電力配線用トンネルである。トンネル総延長は約5.7 kmで、そのうちパーカー側の約5.5 km、外径4.8 mを硬岩用TBMを使用して掘進した。

掘進は、1日2シフトのサイクルで行われ、平均月進は約500 mであった。平成3年3月に掘進を開始し、平成4年3月に完了した。

2-1 地質

トンネル掘削域の地質は、細中粒の香港花崗岩が大部分を占め、ナムフン坑口付近に一部洪積土層が見られる。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硬岩である。トンネル地質縦断図をFig. 2に示す。13箇所のトンネル側壁でサンプリングしたコアを使用した岩石試験の結果をTable 1に示す。

2-2 TBMの仕様

使用したTBMはアメリカ・ロビンズ社製で、Photo 1に示すように世界的にも数少ない19インチシングルディスクカッタを装備したオープンタイプで、高出力型の硬岩仕様である。TBMの仕様をTable 2に示す。

§ 3. 現場計測

3-1 計測方法

本研究で使用している種々な機械要因（平均スラスト力、平均トルク）は、掘進シフト毎にオペレータによって測定・記録され、またペネトレーションは、掘進シフト毎に、実掘進長および実掘進時間から求めた。

掘削後の岩盤は、同一の地質技術者が一定間隔毎にトンネル壁面を観察し、き裂マップ、岩盤等級等を記録した。また、総延長1600 m区間においてロックシュミット

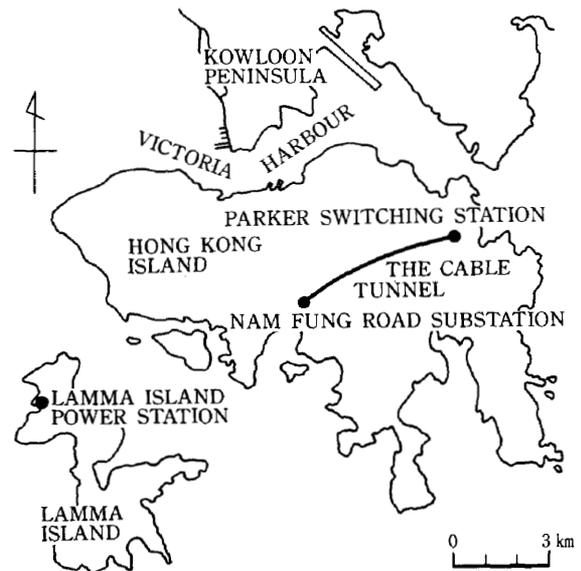


Fig.1 A map showing the location of the cable tunnel in Hong Kong.

ハンマテストを実施し、反発度を得た。測定方法は、切羽に向って左側のスプリングライン上に1 m間隔で設置した各測点を、それぞれ10回連続して打撃し、測定した反発度を平均値で評価した。

3-2 岩盤分類

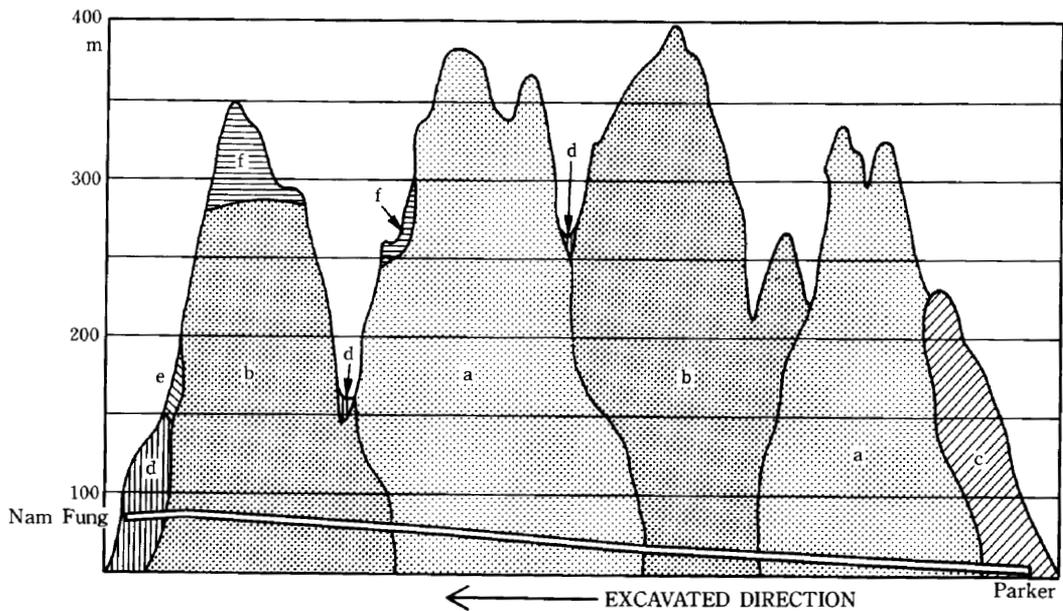
本サイトで採用した岩盤分類法は、Fig. 3に示すMcFeat-Smith *et al.* (1986)によるIMS法であり、香港でよく用いられる単純かつローカルな分類法である。き裂間隔および風化度を主な分類因子とし、良好な状態から劣悪な状態へと1から5までの等級に区分される。これに3 A、5 Aの2つの等級を加えて、支保パターンが決定される。

§ 4. 掘進速度と機械あるいは地質要因との関係

TBMのペネトレーションを評価・推定しうる経験式を求めるために、TBMの機械要因あるいは掘削された地質の要因を調査し、ペネトレーションに対する各因子の影響を検討した結果を以下に示す。

4-1 スラスト力

比較的岩盤状態が良好な地点において、ペネトレーション試験を実施した。ペネトレーション試験は、岩盤特性が一定とみなせる約1 mの短区間を、稼働中のTBMを使用して、スラスト力を任意の一定レベルに保ちながら掘進し、数段階にそのレベルを変化させた時の各ペネトレーションおよびトルクの変化を調べるもので



CHAINAGE	1000 2000 3000 4000 5000m			
VERTICAL PROFILE	+9.09‰		-6.00‰	
HORIZONTAL ALIGNMENT	R=400m	STRAIGHT	R=400m	STRAIGHT

a FINE GRAINED GRANITE, b FINE TO MEDIUM GRAINED GRANITE,
 c MEDIUM GRAINED GRANITE, d DEBRIS FLOW DEPOSIT e TUFF
 f COLLUVIUM

Fig.2 Geological section along alignment of the cable tunnel.

Table 1 Rock properties.

Bulk Density (g/cm ³)	Uniaxial Compressive Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	P-wave Velocity (m/s)	S-wave Velocity (m/s)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Quartz Contents (%)
2.62	175	8.8	5030	2890	55.2	0.25	36

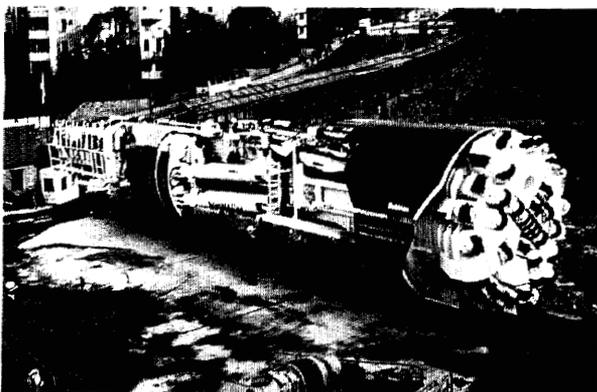


Photo 1 An overall view of TBM.

Table 2 Specific character of TBM.

	Value
Drilling diameter (m)	4.8
Total length (m)	24.5
Total weight (MN)	2.8
Stroke (m)	1.83
Max. thrust force (MN)	10.0
Rotation of head (rpm)	11.5
Max. power of rotation (kw)	2387
Cutter size and No.	
center	19' × 4
face	19' × 20
gage	19' × 8

ある。
 任意の11地点で実施したペネトレーション試験から

得られた岩盤等級毎のスラスト力とペネトレーションの関係を Fig. 4 に示す。ただし、スラスト力は許容最大ス

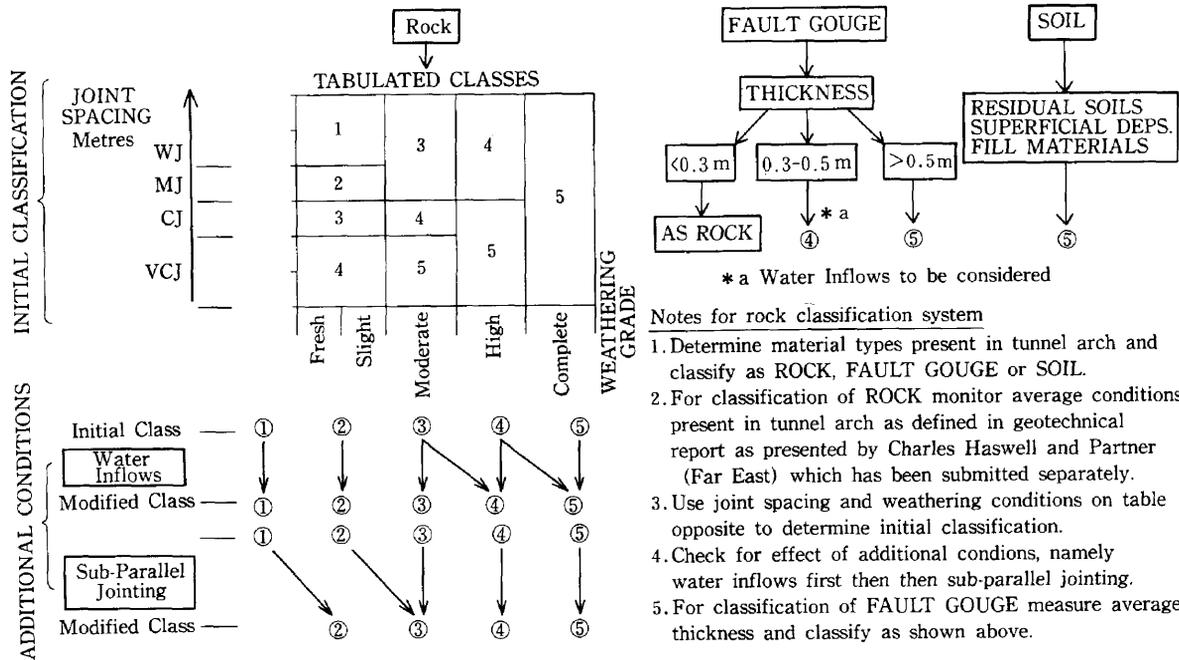


Fig.3 Rock classification system for Hong Kong rocks.

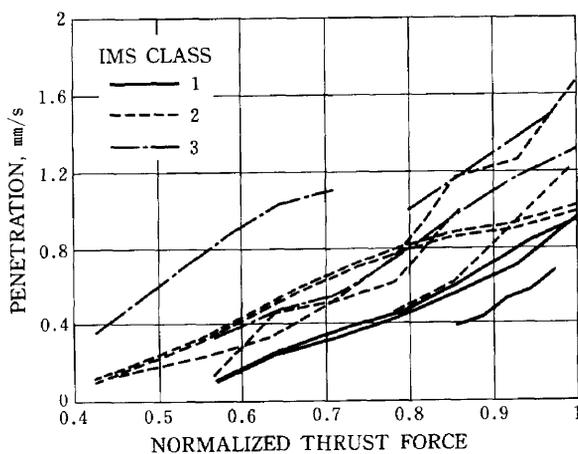


Fig.4 Relation between penetration and normalized thrust force obtained from penetration tests.

ラスト力で除し、無次元化して表す。使用したTBMの許容最大スラスト力は、約9.5MNであった。Sanio (1985)の理論解析、あるいはSato *et al.* (1991)がカタ切削実験結果で示したように、無次元化したスラスト力 F_t とペネトレーション p は、式(1)の関係にあると仮定できると考えた。

$$p = k \cdot F_t^a \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 k, a は正の定数である。

Fig. 4の結果を岩盤等級毎に回帰分析した結果、統計的に判断するには数が少ないが、 a は岩盤等級に影響されず、2.4~3.0とほぼ一定であり、Sanio (1985), Sato

et al. (1991)が示した2.0に近い値となった。一方、 k は岩盤特性の影響を受け、岩盤評価が低くなるにつれて大きくなる傾向があらわれた。式(1)に対するペネトレーション試験の結果との相関係数は0.81~0.91と高く、室内切削実験で得られた結果はフルフェイスTBMにも十分適用できると考えられる。

比較のために、Fig. 5に掘進シフト当りの平均スラスト力とペネトレーションの関係を示す。結果はペネトレーション試験と異なり、両者の関係は弱い負の相関を示すようである。これは、Fig. 6に示す岩盤等級と平均スラスト力、あるいはペネトレーションの関係からも明らかである。岩盤評価が低くなるにつれて、スラスト力は低下しているが、ペネトレーションは逆に大きくなる傾向がわかる。ただし、岩盤状態が極めて悪い場合には、高いスラスト力を作用させるとTBMが振動等を起こし、良好な状態で掘進ができないことが経験的に知られている。したがって、オペレータの判断に基づき、安全上スラスト力を低下させ、結果的にペネトレーションは減少すると考えられる。

4-2 トルク

ペネトレーションとトルクとの関係を明らかにするために、Fig. 7にペネトレーション試験の結果を、Fig. 8に平均的なペネトレーションとトルクとの関係を岩盤等級毎に示す。いずれの図でも同様な比例関係が見られる。また、岩盤状態による影響はペネトレーションとスラスト力の関係に比べて顕著ではないようである。

4-3 岩盤強度

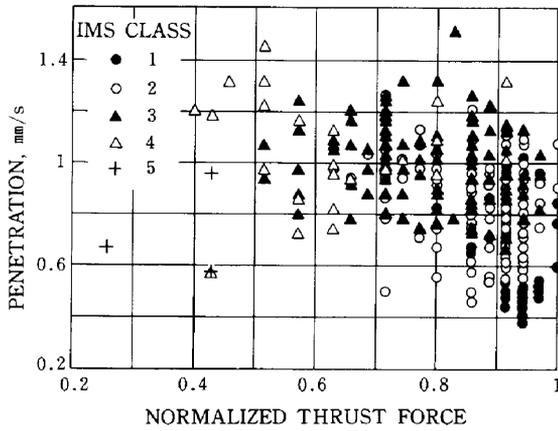


Fig.5 Relation between penetration and normalized thrust force obtained during one boring shift.

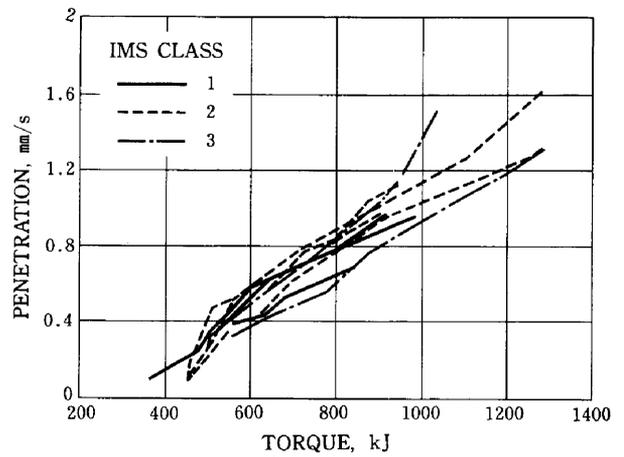


Fig.7 Relation between penetration and torque obtained from penetration tests.

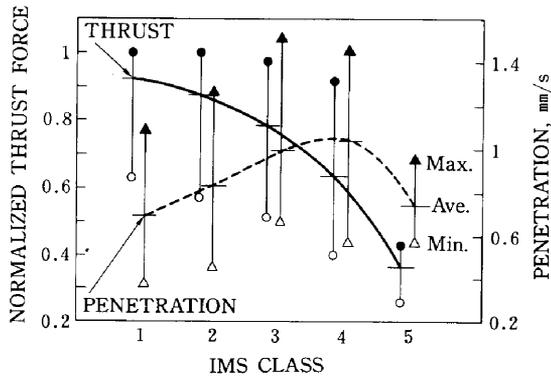


Fig.6 Influence of rock condition (IMS class) for penetration and normalized thrust force.

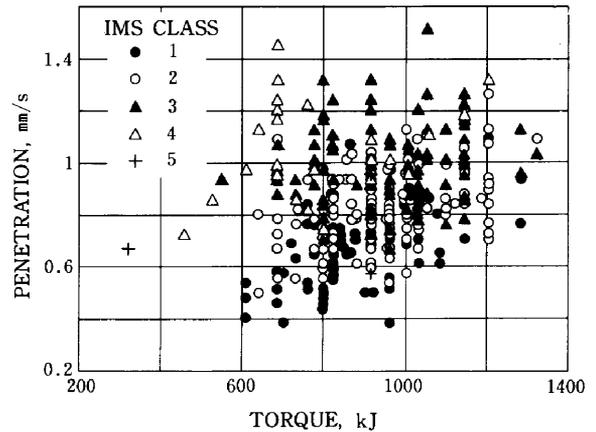


Fig.8 Relation between penetration and torque obtained during one boring shift.

一般に、原位置岩盤の強度とシュミットハンマの反発度との相関は高いことが知られている。そこで、掘進シフト当りの平均反発度と平均ペネトレーションの関係およびその回帰直線を Fig. 9 に示す。高い反発度が得られる強度の高い岩盤ほど、ペネトレーションは小さくなる、一般的に予想される結果が得られた。

4-4 き裂密度

切羽に向かって左スプリングラインと交差するき裂の数を、その掘進シフト区間長で除したものをき裂密度と定義し、岩盤等級毎にき裂密度とペネトレーションの関係、およびその全ての岩盤等級に対する回帰直線を Fig. 10 に示す。ただし式(1)を考慮し、ペネトレーションに対する無次元化したスラスト力 (機械要因) の影響をできるだけ取り除くため、無次元化スラスト力が0.9以上のデータを使用した。その結果、ペネトレーションはき裂密度にほぼ比例し、またき裂密度が0に近づくとき、ペネトレーションは約0.6 mm/s程度となることがわかった。

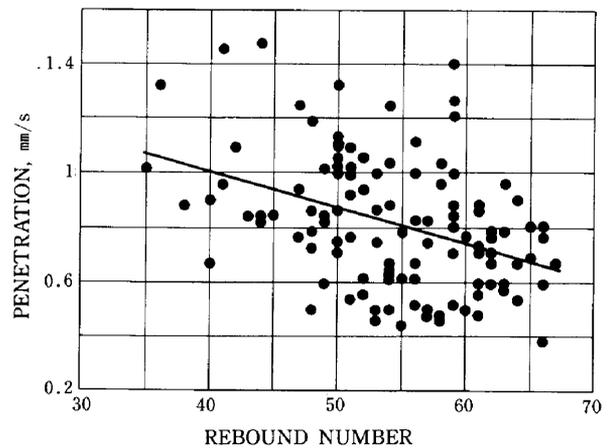


Fig.9 Relation between penetration and rebound number of Schmidt-hammer tests.

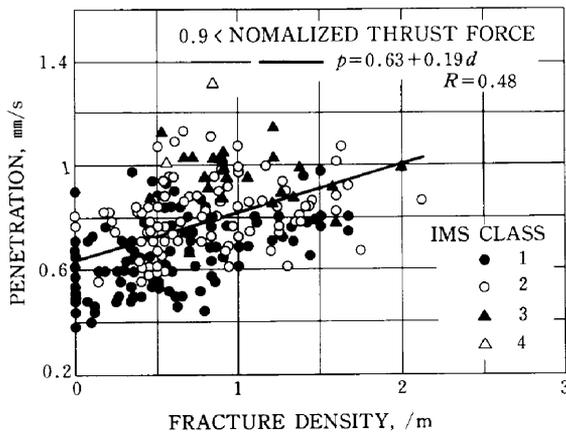


Fig.10 Relation between penetration and fracture density obtained during one boring shift. Using data is normalized thrust force of larger than 0.9 in order to minimize the effect of thrust force.

ここで、き裂密度の影響を考慮したペネトレーションの予測式の提案を試みる。き裂の影響を無視する岩盤を掘進する場合、許容最大スラスト力がかけられ、その時得られるペネトレーションを p_0 とする。そして、岩盤特性の影響を受ける式(1)の係数 k を、岩盤特性に大きな影響を及ぼすき裂密度で代表した形に置き換えると、式(2)が得られる。

$$p = (p_0 + p_{fd} \cdot d) \cdot F_t^a \quad (\text{mm/s}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 p_{fd} はペネトレーションとき裂密度の関係を示す比例勾配、 d はき裂密度 ($1/m$) である。

そこで、提案した式(2)の妥当性を検証するために任意の500m区間を取り上げ、計測したペネトレーションと式(2)を用いて算出した値を Fig. 11 に示し比較した。算出に使用する値として、 a は Sanio(1985)の理論から2.0を使用することにした。 p_0 および p_{fd} は Fig. 9 の回帰直線から求め、それぞれ0.6および0.2とし、算出した値を破線で示した。また、比較のために p_{fd} を0.4とした場合の計算結果を点線で示した。その結果、計測値に対する各計算値の残差平方和 S.S.R.は、 p_{fd} が0.2の場合1.24、また0.4の場合0.87となり、 p_{fd} が0.4の S.S.R.がより小さい。また、掘進にともなうペネトレーションの変動傾向は、いずれの計算値においても定性的に同じ傾向が得られ、ペネトレーションの予測式として式(2)は妥当であることが示された。ただし、Fig. 10 から得られた p_{fd} を使用し求めた破線より、 p_{fd} を0.4とした場合の点線で示す計算値がより計測値(実線)に近い値および変動傾向を示した。これは、式(2)中の岩盤特性の影響を

示す前項に対して、き裂密度のみを対象としたことが理由として考えられる。したがって、き裂密度の他に風化による強度への影響等を考慮する必要があると考える。

4-5 き裂の方位

Sanio(1985)が室内切削実験によって示したように、フルフェイス TBM による掘進においても、切羽面に対するき裂面の方位がペネトレーションに影響を与えると考えられる。そこで、本トンネルの掘進方向がほぼ一定であるので、まずき裂の卓越方向が変化する境界点を求め、その前後でペネトレーションとスラスト力の関係を比較検証した。

き裂の卓越方向が変化する境界点を求めるために、トンネル延長を1000m区間毎に分けて、各区間のき裂の極のコンターマップを作成した。Fig. 12 に、連続した2区間のき裂の極を下半球にステレオ投影したコンターマップおよびトンネル軸方向を示す。図から、ほぼ Ch.1200 を境界としてき裂の卓越方向(図中、網かけ部)

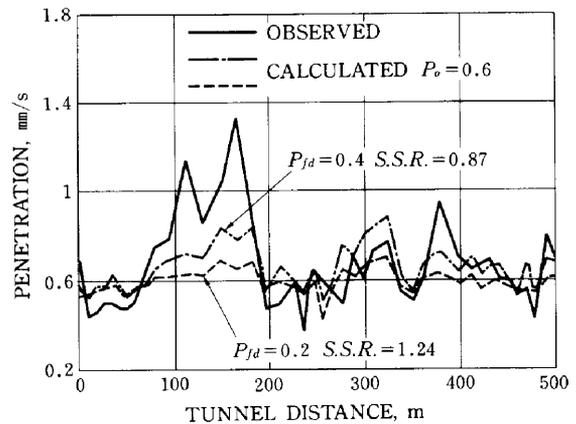


Fig.11 Comparison of the penetration estimated by the formula (2), p_{fd} of 0.2 and 0.4 are shown in broken line and dotted line respectively, and measured during 500m boring length is shown in solid line.

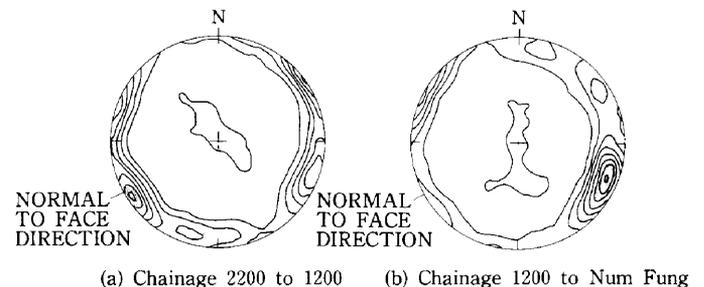


Fig.12 Contour maps of normal of fracture by lower-hemisphere projection.

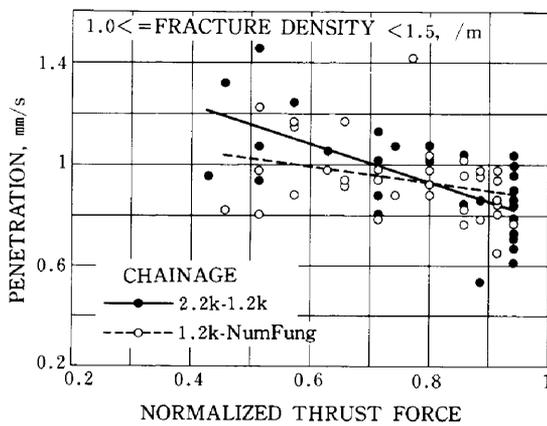


Fig.13 Influence of angle between tunnel face and plane of fractures. Using data is fracture density of range 1.0 to 1.5.

は変化し、(b)のナムフン側で切羽面とき裂面がなす角度がより大きいことがわかる。

次に、Ch.1200前後の各1000m区間から、き裂密度がほぼ等しい ($d=1.0\sim 1.5$) 掘進シフト毎に得たデータを抽出し、Fig 13 にペネトレーションとスラスト力の関係を対比した。その結果、同一スラスト力の場合、切羽面とき裂面がなす角度が小さいほど大きなペネトレーションが得られる Sanio (1985)が示した傾向は、スラスト力が小さい領域で見られるが、その傾向は顕著でないことがわかった。

§ 5. おわりに

TBMのペネトレーションを予測するために、ペネトレーションに影響を与えると考えられる要因を現場計測し、要因間の相関関係を分析した結果、以下のことがわかった。

- ① 掘進中に岩盤特性が大きく変化しない場合、ペネトレーションとスラスト力の相関は高いことがわかった。さらに、フルフェイスTBMによる掘進でも、Sanio (1985)の理論、Sato *et al.* (1991)の室内切削実験結果と同様に式(1)の関係が得られた。
- ② ペネトレーションとトルクの関係は、岩盤状態にかかわらずほぼ正の比例であることが示された。
- ③ ペネトレーションは岩盤特性であるIMS岩盤等級、あるいはき裂密度と高い相関を示すことがわかった。
- ④ 岩盤評価が低くなるにつれてスラスト力は低下し、またある程度、岩盤評価が低くなるまでペネトレーションは大きくなることがわかった。これは、IMS岩盤

分類における主な評価要因であるき裂間隔(密度)あるいは風化が原因であることが示唆された。

- ⑤ 式(1)の関係に基づき、き裂密度を考慮したペネトレーションの予測式(2)を提案し、ペネトレーションを予測できる可能性を示した。ただし、き裂密度を設計段階で得るためには、事前調査から得られるコアのRQD、あるいは推定された岩盤等級等から換算する必要がある。

- ⑥ 切羽面に対するき裂面の方位の影響により、同じスラスト力で大きなペネトレーションが得られる傾向は、スラスト力が小さい領域で見られるが、その傾向は顕著ではないことがわかった。

今後、種々の能力を有するTBMの使用や岩盤を掘進する機会が考えられる。そこで、設計段階で予測式に必要なパラメータを得る手法の確立、および式(2)をより一般的な掘進速度の予測式として適用できるよう発展・改良するために、さらに様々な現場での計測、解析例を増やしたいと考えている。

謝辞

本研究は、山口大学中川研究室との共同研究であり、中川浩二教授には御指導を賜りました。また、計測に際し、香港支店チャイワン出張所の皆様には御助力頂きました。ここに謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Farmer, I., Garritty P. and Glossop N.: Operational characteristics of full face tunnel boring machines, Proc. 1987 Rapid Excav. Tunn. Conf. 1, pp. 188-201, 1987.
- 2) Howarth, D.F. and Roxborough, F.F.: Some fundamental aspects of the use of disc cutters in hard-rock excavation, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., pp.309-315, 1982.
- 3) McFeat-Smith I. and Haswell C.K.: Tunnelling in Hong Kong, Tunnels & Tunnelling, June, pp. 39-44, 1986.
- 4) Sanio, H.P.: Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 22, pp. 153-161, 1985.
- 5) Sato, K., Gong, F. and Itakura, K.: Prediction of disc cutter performance using circular rock cutting ring, Proc. Int. Symp. Min. Mech. & Autom. 1, pp.31-40, 1991.