

(84) T B M の 施 工 性 に 及 ぼ す 岩 盤 物 性 と 機 械 要 因 の 影 響

西松建設(株) 正会員 ○石山宏二、正会員 荒井紀之
西松建設(株) 正会員 稲葉 力、正会員 平野 享
山口大学工学部 正会員 中川浩二

Study on penetration of tunnel boring machines affected by interaction between rock characteristics and machine factors

Koji ISHIYAMA, Noriyuki ARAI, Nishimatu Construction CO., LTD.
Tsutomu INABA, Toru HIRANO, Nishimatu Construction CO., LTD.
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

The tunnelling method using a TBM (Tunnel Boring Machine) has many advantages but it has not been widely applied in Japan. Japanese geological conditions are so complex that a TBM can not adapt to the rapid changes in geological conditions. Further, the predictions of geological conditions are not precise.

Investigation have been carried out on two tunnels in order to find out how the penetration of TBM was affected by the interaction between rock characteristics and machine factors. Statistical analysis have been carried out to select the factors which have a significant effect on the penetration. Furthermore, penetration tests have been carried out in a tunnel in Hong Kong. The object of these tests was to find the relation between thrust, torque and penetration at a number of short constant force intervals during constant geological conditions.

Our investigations and tests show that the penetration is mainly affected by the thrust and those cracks which have an effective orientation with respect to the tunnel face. Penetration depends exponentially on the thrust and the torque is proportional to the penetration, if there is no change in rock characteristics.

1. はじめに

T B M (Tunnel Boring Machine) 工法によるトンネル掘削の需要が高まりつつある。この工法は、掘削速度の速さ、硬岩掘削が可能である等の長所がある。特に重要構造物周辺あるいは市街地を掘削する場合、振動あるいは岩盤の緩みによる周辺構造物への影響が少ない利点が生かされ、本工法が採用されている。

しかし、地質構造変化に対して適用範囲が狭いという短所を有するT B Mを十分活用するには、我が国の地質構造は複雑である。したがって、設計時にT B Mの機械性能と岩盤物性との関係を的確に、また定量的に評価、予測できなければ、機械の選定あるいは掘削計画に際し的確な判断ができない。また、T B M前面に配置されたディスクカッタと岩盤物性との関係は、掘削能力を評価する際に重要な判断要素になると考えられる。しかし、ディスクカッタによる岩盤の破壊過程に関する研究¹⁾は進められているが、掘削効率に対する岩盤物性とカッタの摩耗量等の影響度について定量的な評価がなされていない。このようにT B Mの掘削性を定量的に評価するには不確定要素が多く、T B M工法は高い評価を受けていないようである。

本報告では、TBM工法を採用する際の事前設計の向上および施工時のトラブル発生時における対処法の検討資料とすることを目的に、TBMの掘削性能と岩盤物性との関係の把握を試みた。そこで、オープンタイプのTBMで掘削された2ヵ所のトンネルにおいて、現場計測および岩盤物性が一定とみなせる短区間でペネトレーション試験を実施し、その結果について述べる。そして、掘削性に影響を及ぼすと考えられる機械要因および岩盤物性を示すパラメータの関連性について比較し考察を加える。

2. TBM概要および岩盤状況

現場計測を実施した場所は、奥多摩に位置するAトンネルと香港島を縦断するBトンネルである。両地点において採用されたTBMの機械仕様および現地で採取された岩石の試験結果を表1、2に示す。

Aトンネルは、延長844mの内、713mを表1に示すTBMにより、カッターヘッド回転数10rpm固定で、掘進速度が一定になるように掘削された。地質は中生代ジュラ紀の砂岩、砂岩・粘板岩互層から成り、掘削始点および終点部のみで粘板岩が見られる。掘進方向は北向きから約55°西に傾き、終点部では南向きとなる。

本トンネルの特徴は、曲線部が4割程占めていることにある。岩盤は、電研式岩盤等級でCHからCM級のもので主に構成され、部分的にCL級が分布している。岩石試験の結果から中硬岩に属するといえる。規模の大きな破碎帯は認められず、幅1mから数10cmのものが十数本確認された。亀裂は、N20°W80°SW～N70°E80°SEの範囲に走向傾斜を有するものが分散している。

Bトンネルは、延長約5.5kmの内、5.3kmをスラスト力が一定になるよう掘削されている。地質はジュラ紀末期から白亜紀にかけて生成された強固で比較的均質な香港花崗岩から成り、トンネル軸方向はN75°E～N60°Eである。曲線部は少ない。日本道路公団式の岩盤分類法によればAc級であり、岩盤の弾性波速度は4.0～5.0km/s程度である。数本の破碎帯は認められているが、幅は比較的狭い。亀裂は、N50°W～N70°Wの走向を有し、SWまたはNE方向のほぼ鉛直に傾斜したものが卓越し、それと共役な鉛直の亀裂も少数認められた。

3. 坑内測定結果

坑内調査は、岩盤物性を示すパラメータを把握するために、両トンネルの切羽に向って左側壁のスプリングライン上にスキャンラインを設定し、地質調査、採取されたコアサンプルによる岩石試験、ロックシュミットハンマ反発度測定が実施された。計測区間は、両トンネルとも任意の600mとした。

地質調査では、岩種、岩盤等級、亀裂の密度および走向傾斜が測定された。岩盤分類法は、Aトンネルでは電研式、Bトンネルでは現地で採用されているIMS法²⁾である。IMS法は、亀裂間隔、風化度を主要な分類因子とし、5つの岩盤等級に区分される。これに2つの等級を細分し加えて、支保パターンが決定されている。分類法の詳細は紙面の都合で割愛する。コアサンプリングは、岩盤状況が変化した地点、あるいは

表1 TBM仕様

	Aトンネル	Bトンネル
製 作 会 社	WIRTH	ROBBINS
型 式	TBΠ360H	TBM152-261
直 径 (mm)	3,600	4,800
本体機長 (mm)	7,500	24,500
総 重 量 (t)	130	290
推進装置		
ストローク (mm)	1,200	1,830
最大スラスト (t)	440	1,024
カッターヘッド		
回転数 (rpm)	0～10	12
電動機出力 (kW)	460	2,387
センターカッター	10" x 6	19" x 4
フェイスカッター	14" x 24	19" x 20
ゲージカッター	14" x 4	19" x 8

表2 岩石試験結果

	Aトンネル		Bトンネル
	砂 岩	粘板岩	花崗岩
単位体積重量(gf/cm ³)	2.684	2.702	2.605
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
変形係数 E50(GPa)	57.9	27.5	54.4
静ポアソン比 ν50	0.197	0.177	0.181
P波伝播速度(km/s)	5.40	4.36	4.68
石英含有量 (%)	14.8	8.2	29.0

は100m区間毎に実施し、岩石実験を行った。結果を表2に示す。

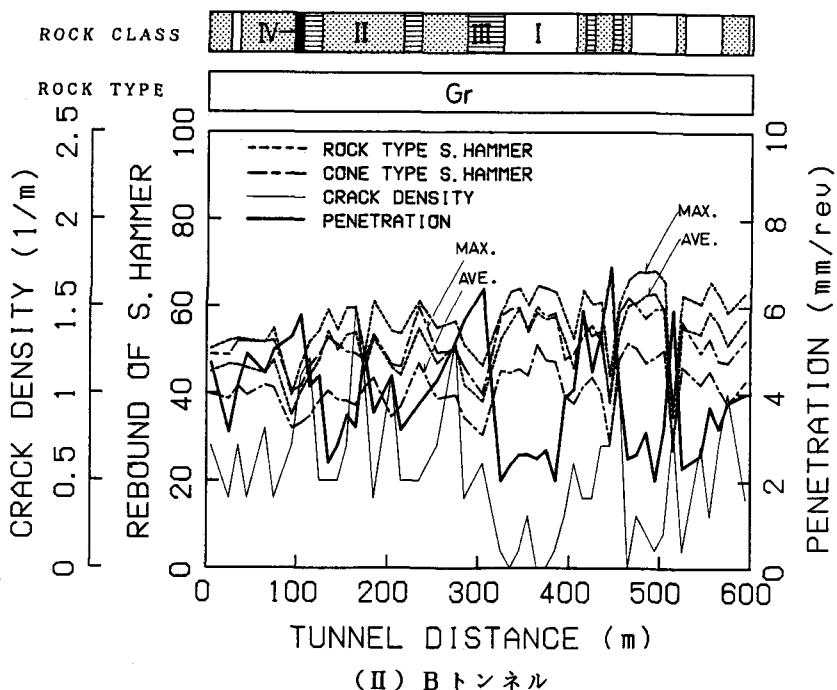
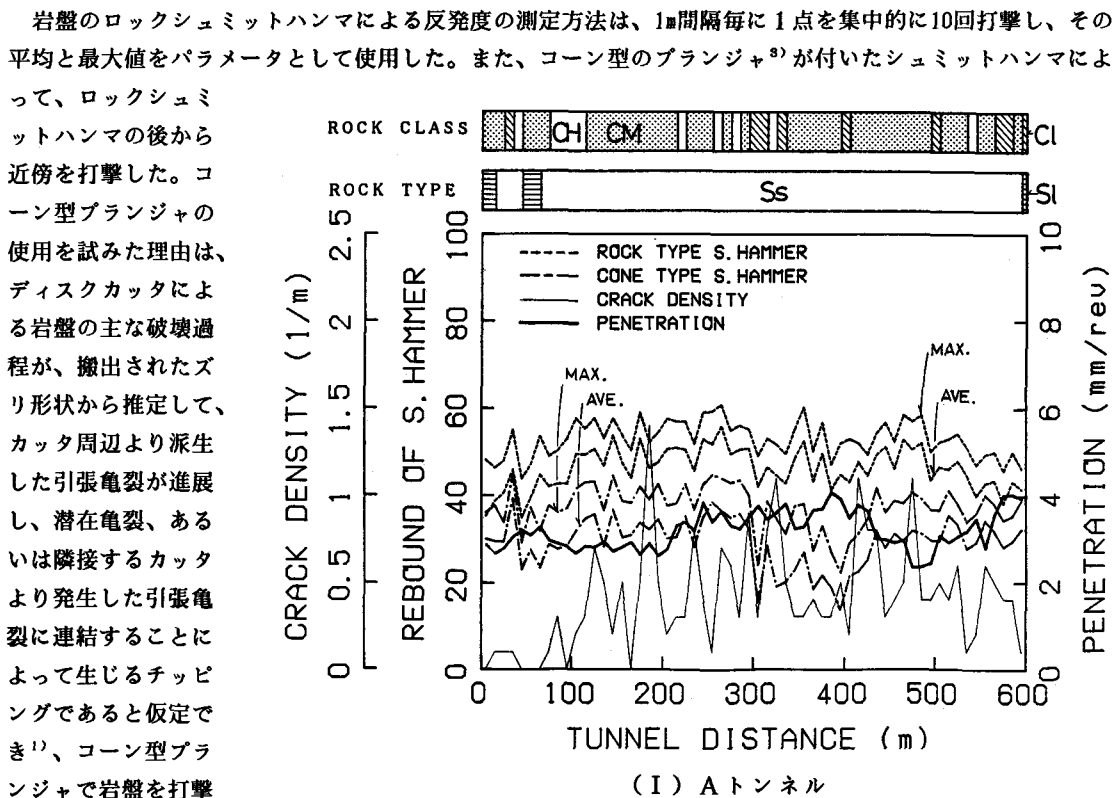


図1 坑内における岩盤物性の変動状況

岩盤物性を示すと考えられる各パラメータおよびTBMのペネトレーションを10m区間毎に平均し、図1に測定区間の変動状況を示す。Aトンネルではペネトレーションの変動は小さいが、Bトンネルでは大きく変動している。これは、TBMの操作管理の違いから生じている。また、Aトンネルではペネトレーションに対する岩盤物性の変動による影響は見られないが、Bトンネルでは明らかに亀裂密度の変動に応じ、ペネトレーションは変動している。これは、Aトンネルの亀裂に方向性は見られないが、Bトンネルの亀裂はトンネル軸に対しほぼ45°の方向性があることに関係していると推定される。NIT⁴⁾によれば、トンネル軸に対し亀裂が60°~70°の方向性を有する場合に、最大の掘削効率が期待できるとしている。したがって、Bトンネルの亀裂は掘削に際し有利な方向性を有し、その密度はペネトレーションに寄与したと考えられる。

4. 統計解析

ペネトレーションに大きな影響を与えるパラメータを選出する目的で、岩盤物性を示すと考えられるシュミットハンマ反発度、岩盤等級、亀裂密度およびTBMのペネトレーション、スラスト力、トルクの計9個のパラ

表3 Aトンネル(左下)、Bトンネル(右上)における各パラメータ間の単相関マトリックス

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
ペネトレーション (cm/rev) [X ₁]	1.0	-0.252	0.543	-0.700	-0.688	-0.701	-0.707	0.749	0.507
スラスト力 (tf) [X ₂]	-0.340	1.0	0.186	0.381	0.423	0.343	0.359	-0.427	-0.528
トルク (tf・m) [X ₃]	0.125	0.861	1.0	-0.383	-0.313	-0.284	-0.286	0.273	0.276
ロック型シュミットハンマ平均反発度 [X ₄]	-0.085	0.241	0.252	1.0	0.954	0.853	0.857	-0.758	-0.630
コーン型シュミットハンマ平均反発度 [X ₅]	-0.422	0.390	0.203	0.435	1.0	0.878	0.879	-0.788	-0.636
ロック型シュミットハンマ最大反発度 [X ₆]	-0.169	0.295	0.275	0.950	0.440	1.0	0.988	-0.788	-0.559
コーン型シュミットハンマ最大反発度 [X ₇]	-0.417	0.476	0.317	0.563	0.923	0.557	1.0	-0.795	-0.549
岩盤等級 [X ₈]	0.296	-0.394	-0.393	-0.300	-0.225	-0.385	-0.312	1.0	0.665
亀裂密度 (1/m) [X ₉]	0.136	-0.062	0.000	0.301	0.003	0.133	0.110	0.238	1.0

メータにより、相互単相関係数を求めた。表3に測定区間600mの内、10m毎の平均値による単相関マトリックスを示す。相関係数1.0を境に、マトリックスの左下はAトンネル、右上はBトンネルの結果である。本解析結果からは、ペネトレーションを決定づける特定な複数の因子は選出できなかったが、個々のパラメータにおいて、興味ある知見が得られた。

両トンネルにおいて、ペネトレーションとスラスト力に低い負の相関が得られた。一般的に矛盾した結果と考えられるが、大きいスラスト力が必要な岩盤は堅固であり、結果的にペネトレーションは小さくなったと推定される。これは、Bトンネルのペネトレーションと反発度に負、あるいは岩盤等級に正の高い相関が示されたことと調和的である。また、Aトンネルのペネトレーションに対して、ロック型よりコーン型による反発度に高い相関が示された。これは、ロック型の反発度と高い相関関係にある岩盤の静弾性係数あるいは一軸圧縮強度より、先に仮定したチッピングに寄与する引張強度あるいは脆性度に、ペネトレーションは強く影響を受けた結果であると考えられる。

5. ペネトレーション試験

Bトンネルの岩盤等級が異なる任意の7地点で、TBMの掘進に最も影響する機械要因と考えられるスラスト力を、約1mの同じ岩盤状況とみなせる短区間にて多段階に変化させ、稼働中のTBMにおけるペネトレーション、トルクとの関係を調べた。図2に岩盤物性の変化による影響を除いたスラスト力とペネトレーション、図3にペネトレーションとトルクの関係を示す。図から、P2地点のみ岩盤物性の変化によると考えられる、他点と明らかに異なる変則的な傾向が得られた。そこで、P2地点を除いて相互関係の把握を試みた。

佐藤らのモデル実験⁵⁾において認められているように、ペネトレーションはスラスト力のべき乗に比例し、岩盤物性に応じて異なる曲線を示しているようである。べき関数による回帰分析を行った結果、指数定数は

2.57~4.34の範囲にバラつき、モデル実験より2倍前後大きな値を示した。原位置試験で大きな指数定数が得られた理由は、等スラスト力のカットによる岩盤破壊過程において、隣接するカット間に発生した引張亀裂が互に連結するより、規模の大きなチッピングを生じさせる方向性を有した潜在亀裂が存在する場合、これに引張亀裂が連結して、大きなペネトレーションが得られたためと推定される。また、P4,7地点ではほぼ線形関係が示された。これは本地点の岩盤物性が、破壊過程において、チッピングの発生しにくい状態にあったためと推定される。

また、トルクとペネトレーションに正比例関係が得られた。1次式で回帰分析を行った結果、勾配は15.9~24.6、切片は24.0~39.0の範囲に収まり、岩盤物性による差はほとんど認められない。この結果、設計計画時に、工期からペネトレーションが決定できれば、掘削に必要な機械の能力を算出することが可能である。

6. まとめ

2つのトンネルにおいて、TBMの掘削性に影響すると考えられる岩盤物性を示すパラメータおよび機械要因の計測結果を示すとともに相互関連性を比較検討した。その結果、TBMのペネトレーションに対する亀裂、スラスト力、トルクに関し、興味ある知見が得られた。

今後、ペネトレーション試験を実施した地点で、岩盤物性の詳細な測定および定量的な評価を行うとともに、モデル実験でディスクカットによる亀裂を考慮した岩盤の破壊過程を調べ、ペネトレーションを決定する因子およびその関係を把握して、掘削速度および設計における機械選定の評価モデルを提案したい。

参考文献

- 1) Sanio, H.P.: Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 22, 153-161 (1985).
- 2) McFeat-Smith I. and Haswell C.K.: Tunnelling in Hong Kong, Tunnels & Tunnelling, June, 39-44 (1986).
- 3) 宮地明彦等: コーン型プランジャーをもつシュミットハンマーによる岩盤評価とロードヘッダーの掘削能力予測に関する研究, 第23回岩盤力学シンポジウム.
- 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 disc cutter performance using circular rock cutting ring, Proc. Int. Symp. Min. Mech. & Autom. 1, 31-40 (1991).

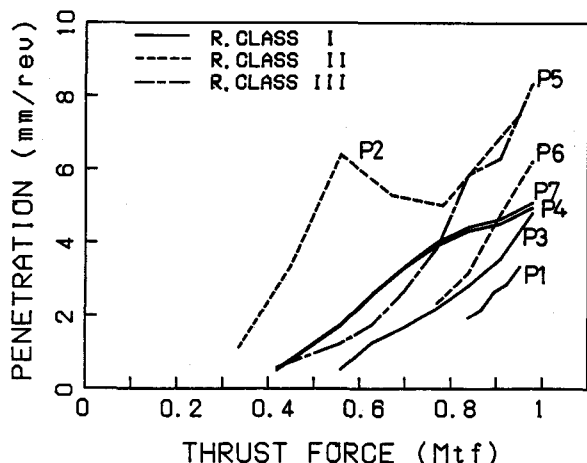


図2 ペネトレーション試験におけるスラスト力とペネトレーションの関係

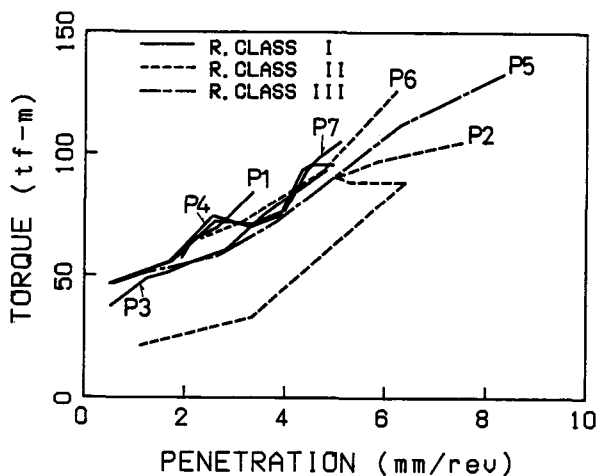


図3 ペネトレーション試験におけるペネトレーションとトルクの関係