

(64) TBMに関する掘削特性式を得るための硬岩掘削実績の分析

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

Analyzing TBM tunnelling data for getting excavation performance equation

Toru HIRANO, Nishimatsu construction co., Ltd.
Koji ISHIYAMA, Nishimatsu construction co., Ltd.
Tsutomu INABA, Nishimatsu construction co., Ltd.
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

The performance of tunnel boring machine (TBM) depends on geological features and tunnel design. Once the capacity of TBM is matched with the ground features properly, one can count for speedy and cheaper tunnelling. However, An applicability of TBM method is narrower than that of blasting methods, so severe preliminary surveying of TBM performance is needed. For this purpose we analyzed records of TBM tunnelling. As a result the semi-empirical equation of excavation rate was deduced. We showed that the equation was similar to the one which has been presented by theoretical analysis or experiments.

1. はじめに

一般にトンネルボーリングマシン(以下TBM)の適用性は地質状態とトンネルの設計にまたがる多くの要因によって決められている。この適用性の範囲はNATMのような発破などを利用する諸工法に比較して狭いと考えられる。そのためにTBMの導入は慎重にならざるを得ないが、最近TBM工法の持つ高速掘削性や低公害性が要求されるような工事が増えてきた。本研究ではTBMの適用性を定量的に分析することを目的として必要となる掘削特性の予測式を検討した。今回検討した予測式はTBMの機械要因と岩盤等級との関係を表わしている。具体的に本研究の内容を示すと次のとおりである。

1. 均質と考えられる岩盤の掘削特性を実際のTBMを用いて施工中に調査した。
2. 1で見られた特性を基礎に不均質な岩盤である現場での掘削特性を考察した。
3. 以上の結果よりTBMの機械要因と岩盤等級との関係を式で表した。

2. 現場の状況

分析の対象としたトンネルは、オーブントップのTBMを使用して掘削した香港島を縦断するように位置する全長5.7 kmの送電線用トンネルである。このTBMの機械的な諸元を表1に示す。トンネル坑口付近の堆積層を除いて、全長のほとんどを占める5.5 kmをTBM掘削により施工した。平均的なサイクルタイムの内訳は表2のとおりであり、1日に2掘削シフトであった。トンネル掘削後に坑壁の観察を行ったところ

ろ、周囲の岩盤は細粒、中粒の花崗岩が大部分を占めており比較的均質で新鮮なものと考えられた。そのためトンネル支保工は原則的に必要とせず、断層や湧水帯の付近にのみショットクリートや鋼性支保で補強した。

表1 TBMの諸元

製作会社	ROBBINS
本体機械長さ	24.5 m
掘削径	4.8 m
推進ストローク	1.8 m
最大スラスト力	10 MN
最大回転トルク	1530 kJ
回転速度	11.5 r.p.m
カッター	19インチディスクタイプ
カッターロード	32 t/リング

表2 サイクルタイム内訳

掘削	24.9 %
ずりトロ待ち、レール敷設	15.3 %
支保建て込み	6.7 %
機械のメンテナンス	13.4 %
カッター交換	16.0 %
交替待ち	3.0 %
機械のトラブル、修理	6.7 %
配線、配管	4.9 %
その他	9.1 %

2. 解析データの採取方法

解析の対象としたデータは、IMSと呼ばれる岩盤等級と、TBMの推進力、回転力、貫入量（以下スラスト力、トルク、ペネトレーションレート）の三つの機械要因からなる。

IMS岩盤等級はMcFeat-Smith et al.(1986)が提案した分類法で、香港ではよく用いられる。本トンネルでは施工前に地表踏査とボーリングにより予測されたIMS岩盤等級に加えて、掘削後も支保パターン決定のためにトンネル軸方向1 m間隔で坑内観察によるIMS岩盤等級の評価が行われた。

三つの機械要因は現場技術者が作業員の報告を受けて記録した値を用いており、1掘削シフトごとに1組のデータがある。すなわち機械要因は1掘削シフトあたりの平均値で、そのサンプリング間隔はおよそ1掘削シフトあたりの平均掘削距離（約10 m）と見ることができる。図1に示すように現場ではスラストシリンダの油圧とモーターの電流を計測した。スラスト力とトルクはそれぞれから換算して得ている。当初、ペネトレーションレートは運転者が直接見ることが出来なかったので1掘削シフト終了時に掘削進行距離をTBMの稼働時間で除して求めている。後半になってスラストシリンダのストローク長の計測を追加したところ、両ペネトレーションレートの対応はほぼ良好であった。

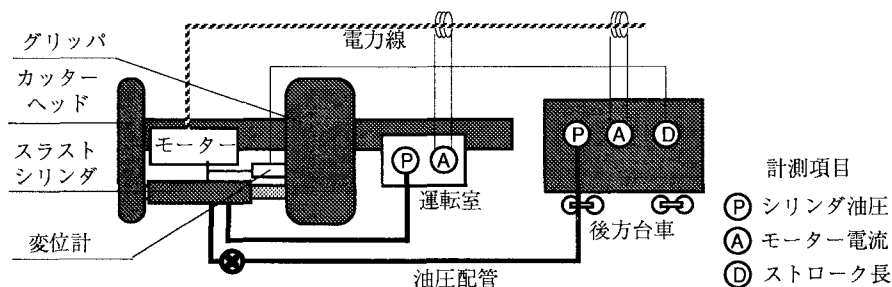


図1 TBM機械要因の計測

3. 均質な岩盤を掘る場合

従来、岩石ブロックを供試体として1個ないしは2個のディスクカッターを用いた切削実験を行い、切削特性を明かにしようとする研究が行われてきた。例えばSanio(1985)は貫入するくさびの周りの静的な力学的状態を基本にしてディスクカッターによる切削特性の理論式を導いた。Sanioはこの理論式が実物のTBMのような円周掘削に適用可能なことを示唆している。最近ではSato et al.(1991)が2個のディスクカッターによる円周切削の実験を行いディスクカッターの切削特性とカッターに加わる力を測定した例がある。彼らはその中でSanio(1985)の理論式が実験の結果によくあてはまることを示している。Sato et al.(1991)の表

現でSanioの理論式を書き改めると、

$$F_t = k P^a S^b \dots (1)$$

となる。ここで F_t はスラスト力、 P はペネトレーションレート、 S は2枚のカッターの間隔で、 k 、 a 、 b はいずれも定数である。

通常、掘削中のTBMは掘削に支障がない限り許容最大スラスト力を切羽に与えることが多く、施工記録だけではスラスト力とペネトレーションレートとの関係が分かりにくいと考えられる。そこでトンネル掘削途中にTBMのスラスト力を数段階に変化させ、その時のペネトレーションレートを測定した。地質状態の変動の影響を少なくするために測定終了までの全掘削距離が1 m程度となるような範囲で測定を行った。この測定の結果を図2に示す。図2は両対数グラフで図中右側の境界線はTBMの設計最大スラスト力、斜めの直線は(1)式を示している。なお(1)式の切片 $(k S^b)^{-1/a}$ は任意にとつてある。Sanio(1985)やSato et al.(1991)によると、切削の対象となる岩石の性質に依存した定数は k で、残りの定数 a 、 b は岩石の種類に依存せずどちらもおよそ0.5となる。図2のプロットされた点のつくる勾配より、測定の結果に対して定数 a を0.5とした(1)式がよく当てはまるのが分かる。いっぽう定数 k は岩の強度や亀裂の影響など多くの要因に影響されると考えられるが、単純に見ても(1)式を測定値にあてはめたときの k が良好な岩盤の場合ほど大きく、これは従来の研究の結果と矛盾しない。

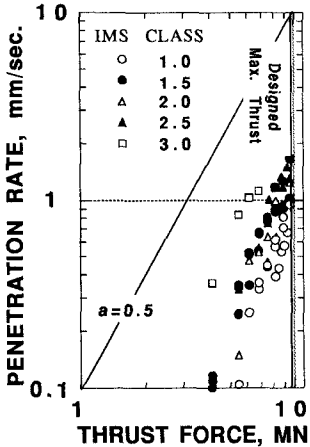


図2 均質な岩の掘削

4. 不均質な岩盤を掘る場合

図2と同様のスケールで、通常の掘削時におけるスラスト力とペネトレーションレートとの関係をIMS岩盤等級別に図3～5で示す。ここでIMS岩盤等級は掘削後に評価されたものを用いている。岩盤等級が良好なほどスラスト力はTBMの能力上限まで加えられることが多く、そのためスラスト力の変動がほとんどないのに対してペネトレーションレートの変動は比較的大きい。逆に岩盤等級が低いほど、加えられたスラスト力の変動は大きくなり、逆にこのときのペネトレーションレートは一定の値に収束する傾向にある。以上の特性は均質な岩盤を掘る場合に見られたものと大きく異なっている。

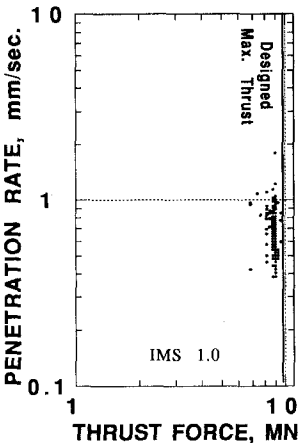


図3 不均質な岩の掘削 (IMS 1.0)

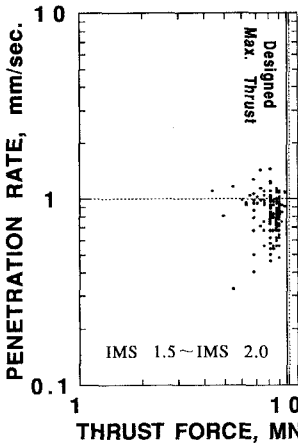


図4 不均質な岩の掘削 (IMS 1.5～2.0)

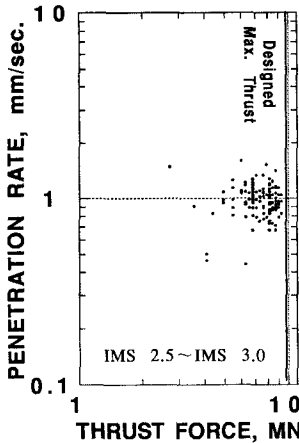


図5 不均質な岩の掘削 (IMS 2.5～3.0)

均質な岩盤を掘る場合に見られた特性を基本にして図3～5に現れる特性を考えた。図6はこの考え方の概要である。いま

(1) 式の定数のうちkが地質要因の影響を受けるので、1掘削シフト間の平均的なIMS岩盤等級に対応するkの値がそれぞれ決まると考えられる。図6中でkの変動は(1)式の関係を示す直線の平行移動により表される。スラスト力には設計上の最大値があり記録値がこれを越えることはあり得ない。ペネトレーションレートにはカッター損傷の急増やカッターヘッド回転用のモーターの負荷上限に対応する上限があると考えられる。

いまカッターの損傷は無視し、モーターの負荷上限がペネトレーションの上限を決めると仮定する。図7はペネトレーションレートとトルクとの関係をプロットしたものである。正の相関が見られ、その特性はIMS岩盤等級に依存しなかった。ゆえにこの仮定は妥当なものと結論した。

結局、掘削する地質に対応して $(k S^b)^{-1/a}$ が決まる(1)式にしたがい、スラスト力とペネトレーションレートの上限をともに越えない範囲内にTBMの運転状態はあると考えられる。IMS岩盤等級別に書いた、図8は平均的な運転状態を表わし、表3は $(k S^b)^{-1/a}$ の値である。一般にTBM掘削では可能な最大の掘削速度を得るようにしており、通常の運転状態は図6中の網線の領域に集中すると考えられる。

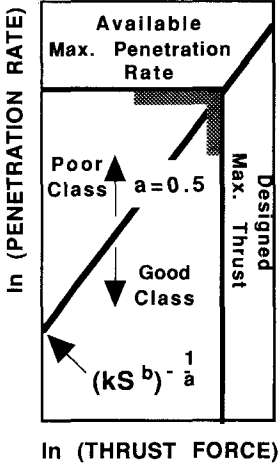


図6 不均質な岩の掘削特性

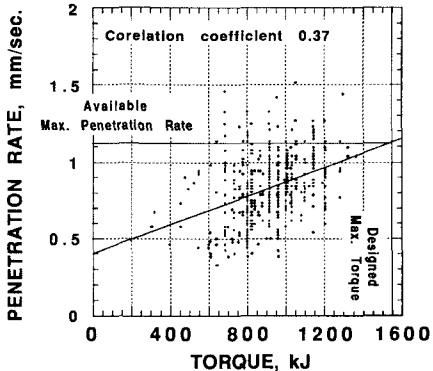


図7 最大ペネトレーション

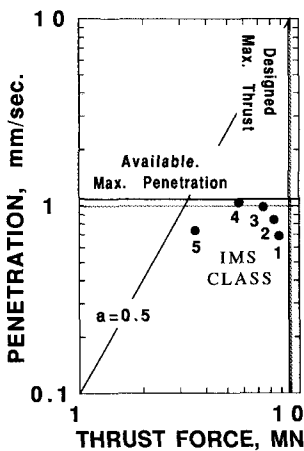


図8 平均的な運転状態

表3 $(k S^b)^{-1/a}$ の値

IMS岩盤等級	1	2	3	4	5
$(k S^b)^{-1/a}$	0.0088	0.012	0.018	0.032	0.058

5. 掘削特性の予測式

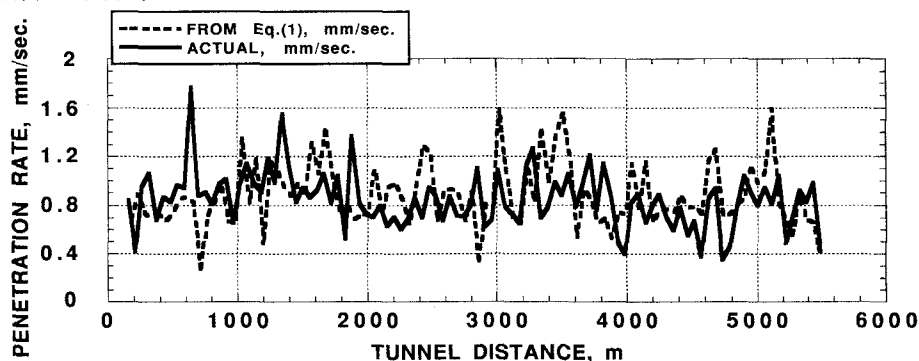


図9 トンネル距離程に対するペネトレーションレート

地質に対応して適当な $(k S^b)^{-1/a}$ を選ぶことができれば、本TBMによる掘削特性の予測ができる。いま(1)式に対して掘削後に評価されたIMS岩盤等級に対応させて表3より $(k S^b)^{-1/a}$ を選び、実際の運転スラスト力を代入した。このとき(1)式が推定するペネトレーションレートをトンネル距離程に対してプロットすると図9中の破線で示される。(1)式の精度を比較するために実際のペネトレーションレートを図9中の実線で示す。ペネトレーションレートの変動のピークは両者ではほぼ一致した。また両者の絶対値の対応は図10に見られるような分布を示した。

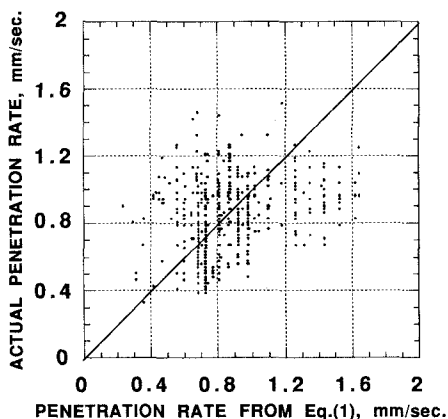


図10 予測値との比較

6. おわりに

TBMの掘削特性をTBMの機械要因とトンネル周囲の岩盤等級を変数として単純な(1)式で表現した。(1)式を用いると1掘削シフトごとの平均的なペネトレーションレートを推定することができた。(1)式はペネトレーションレートを含めた三つの機械要因と岩盤等級との関係を示すので運転状態を様々に変えたときの掘削特性を記述できると考えられる。今後(1)式に加えてディスクカッターの損傷特性を加えると最適なTBM運転状態の分析ができると期待している。

参考文献

- McFeat-Smith I. and Haswell C.K.: tunnelling in Hong Kong, Tunnels & tunnelling. June, pp.39-44, 1986.
- Sanio, H. P.: Prediction of performance of disk cutters in anisotropic rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr. 22, pp.153-161, 1985.
- Sato, K., Gong, F. M., Itakura, K.: Prediction of disk cutter performance using circular rock cutting rig, Proc. Int. Symp. Min. Mech. & Autom., vol. 1, pp.31-40, 1991