

TBM トンネル掘削時の機械データと 地山特性の関連性に関する考察

CONSIDERATION ON RELATION BETWEEN MACHINE DATA AND GROUND CONDITION IN TBM EXCAVATION

木谷 努¹⁾・真下 英人¹⁾・砂金 伸治¹⁾・城間 博通²⁾・関 茂和²⁾

Tsutomu KITANI, Hideto MASHIMO, Nobuharu ISAGO, Hiromichi SHIROMA and Shigekazu SEKI

Application of Tunnel Boring Machine (TBM) is considered as the rational and economical tunneling method of constructing road tunnel because rapid excavation and the reduction of support lead to cost reduction. It is desired to establish the method of ground estimation and selection of proper support in TBM excavation. In this study, the relation between ground condition, adoption of auxiliary method or machine type and machine data variances in TBM tunnel were considered. It was found that there were some differences of machine data variance by ground characteristic, and the possibility of selection the support pattern using the machine data was also indicated.

Keywords: tunnel, tunnel boring machine, machine data, characteristic of ground, support pattern

1. はじめに

現在、社会的要請が高い“トンネル建設費の縮減”を実現するには、トンネル施工を急速化することが欠くことが出来ない。このような背景から水路トンネル等の本坑、大断面道路トンネルの先進導坑、避難坑等様々な用途に対して TBM による施工が注目されている。一般に TBM トンネルにおいては、地山等級に応じた支保パターンを設定し、施工時の地山状況に応じて修正することが行われている。しかし、現在、この支保パターンは十分確立されたものとはなっておらず、過去の施工実績等により設定されているにすぎない。

一方、TBM は、掘削中の地山の変化を直接目視確認することが難しいという欠点がある。この欠点を補うため、TBM の各種機械データを分析し施工中の地山評価に役立てる方法が行われている。しかし、機械データと各種地山および採用すべき支保工との関連性に関する検討は未だ不十分であることが否定できず、今後の TBM 施工のため、データの蓄積およびその評価手法の確立が望まれているところである。

これらの背景のもと、TBM トンネルにおける機械データおよび支保パターン、各種地山特性の関係については、過去に研究がなされてきている^{例えば、1), 2)}。しかし、これらの研究の大半は、個別のトンネル毎を対象としたものであり、多くのトンネルを横断的に比較して分析しているものが少なかった。

そこで本研究では、今後の TBM トンネルの合理的設計・施工に資するため、近年施工された TBM トンネルを横断的に分析する。そして、今後の機械データの評価手法確立のため、施工時に得られた機械データと採用支保工および地山特性との関係について検討することとする。

1) 正会員 独立行政法人土木研究所 基礎道路技術研究グループ トンネルチーム

2) 正会員 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室

2. データ分析の方法

本研究では、TBM 施工中に得られた機械データと、その際採用された支保パターン、補助工法および周辺地質との関連性について分析する。

分析の対象とした TBM トンネルの主な地質と掘削径を表-1に示す。これらは、道路トンネルの避難坑や先進導坑として TBM を用いたものであり、掘削径が 3.5m~5.0mの計 15 本（上り線と下り線があるものは 2 本と数えた）である。

分析対象とした機械データは、表-2に示すものである。ここで、1 次機械データは、TBM 掘進中に直接機械より得ることが出来るデータである。また、2 次機械データは、1 次機械データを処理して得られるものであり、本分析では、スラスト推力における掘削径の影響を除去した掘進エネルギー、カッタトルクにおける掘削径の影響を除去した回転エネルギー、そして両エネルギーを加味した掘削体積比エネルギーを対象とする。

なお、分析に用いた支保パターンについては、各々のトンネルでの実施支保パターンを

表-3に示した共通支保パターンに変換して整理した。また、トンネル周辺の地質については、表-4に示すように硬質岩、中硬質岩、軟質岩に分類した岩種で評価した。

3. 各トンネルの機械データと支保パターンの関係

ここでは、各トンネルを同一のグラフに並べ、機械データと支保パターンの関係を岩種毎に整理したものを示す。

図-1は、各トンネルのスラスト推力と支保パターンの関係を岩種毎に整理したものである。これによると、岩種が軟質岩から硬質岩になり地質条件が良くなるにつれて、トンネル間の推力のばらつきが小さくなる傾向にあることが分かる。また、全ての岩種に対して、地質状態が悪く支保規模が大きくなるにつれて、スラスト推力が小さくなっていることが分かる。このことより、スラスト推力の分析により、採用すべき支保パターンがある程度、選定可能であると言える。

図-2に、各トンネルのカッタトルクと支保パターンの関係を岩種毎に整理したものを示す。これによると、岩種が軟質岩から硬質岩になり地質条件が良くなるにつれて、トンネル毎のばらつきが小さくなっていることは、図-1のスラスト推力と同様である。また、地質状態が悪く支保規模が大きくなると、カッタトルクもスラスト推力と同様、小さくなっており、支保規模と機械データの相関が窺える。しかし、図-1と図-2を比較すれば、同じ岩種であっても図-1のスラスト推力の方がトンネル間のばらつきが小さくなっている

表-1 機械データ分析対象トンネル

トンネル	主な地質	掘削径 (m)
A	凝灰岩、流紋岩、玄武岩	3.5
B	安山岩、角礫岩	5.0
C	安山岩、礫岩、砂岩、凝灰角礫岩	5.0
D	砂岩、礫岩、泥岩、砂岩泥岩互層	5.0
E	砂岩、砂岩泥岩互層	5.0
F	砂岩、砂岩泥岩互層	5.0
G	チャート、凝灰岩、粘板岩、変斑れい岩、輝緑岩	5.0
H	チャート、凝灰岩、粘板岩、変斑れい岩、輝緑岩	5.0
I	砂岩泥岩互層、花崗岩、ホルンフェルス	5.0
J	花崗岩	5.0
K	花崗岩	5.0
L	安山岩、凝灰岩、流紋岩	4.5
M	安山岩、凝灰各礫岩、凝灰岩、砂岩シルト岩互層	4.5
N	アブライト、花崗斑岩、凝灰岩	4.5
O	花崗斑岩、流紋岩	4.5

表-2 分析対象機械データ

種類	名称	内容
1 次 機械 データ	カッタ回転速度	カッタヘッドが 1 分間に回転する回数
	スラスト推力	スラストジャッキ圧にジャッキ内空面積と使用したジャッキの本数の積
	カッタトルク	カッタヘッドに作用する抵抗
2 次 機械 データ	掘進エネルギー	(=スラスト推力/掘削断面積)
	回転エネルギー	(= (カッタトルク×カッタ回転速度) / (純掘進速度×掘削断面積))
	掘削体積比エネルギー	掘削体積あたりの総エネルギー (スラスト系と回転系) (=掘進エネルギー+2π×回転エネルギー)

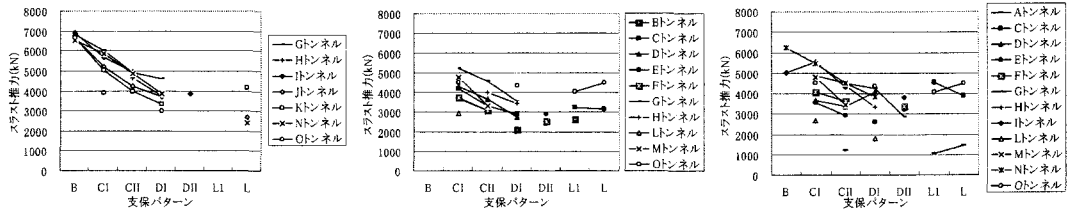
表-3 共通支保パターン

パターン	支保の内容
B	無支保
CI	吹付け (2cm)
CII	吹付け (2cm)、鋼アーチ支保工 H-100 の使用
DI	吹付け (3cm)、鋼アーチ支保工 H-100 の使用
DII	吹付け (3cm)、鋼アーチ支保工 H-125 の使用
L1	簡易ライナー
L	ライナー

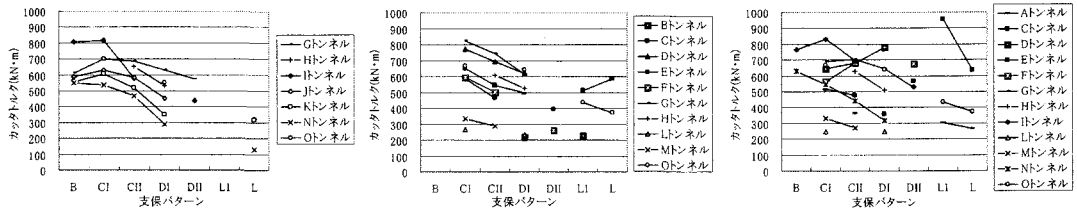
表-4 岩種の分類

硬質岩	中硬質岩	軟質岩
斑れい岩 花崗岩 花崗閃緑岩 石英斑岩 ホルンフェルス 角閃石岩 砂岩、礫岩 (第三紀層) 石灰岩 チャート 片麻岩 アブライト 輝緑岩	安山岩 玄武岩 石英安山岩 流紋岩 ひん岩 砂岩、礫岩 (中古生層) 粘板岩 頁岩 (中古生層) 角礫岩	蛇紋岩 凝灰岩 凝灰角礫岩 千枚岩 黒色片岩 緑色片岩 泥岩、頁岩 (第三紀層) 砂岩泥岩互層

ことが分かる。この原因としては、カットトルクが地山状況だけでなく、カットの個数・配置の影響を受けやすい指標であることが考えられる。このことにより、複数のトンネルについて同一の機械データ指標を用いて支保パターンを選定しようとする場合、カットトルクよりスラスト推力の方が適していると言える。



(a) 硬質岩 (b) 中硬質岩 (c) 軟質岩
図-1 各トンネルのスラスト推力と支保パターンの関係 (岩種毎)

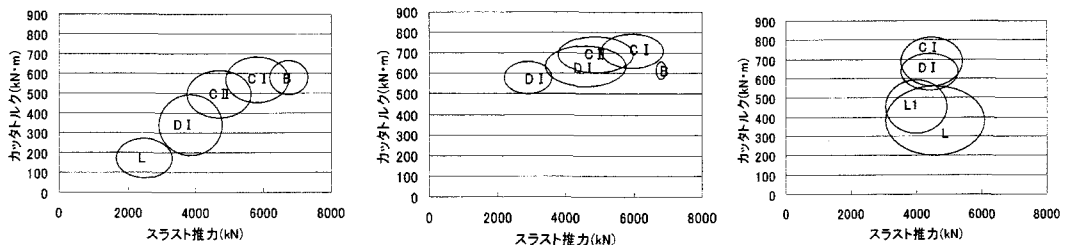


(a) 硬質岩 (b) 中硬質岩 (c) 軟質岩
図-2 各トンネルのカットトルクと支保パターンの関係 (岩種毎)

4. 個別のトンネルにおける機械データと支保パターンの関係

ここでは、機械データを各トンネル個別に整理・分析した結果について述べる。

図-3は各トンネルにおけるスラスト推力とカットトルクをプロットしたもののうち、特徴的なものの例である。プロットでは、それぞれの平均を中心とし、平均+標準偏差、平均-標準偏差を軸とした楕円で示した。これによると、図-3のうち、(a)では、BからCIを除きカットトルクと推力が支保パターン別に線形関係にあるように見える。対して、(b)では、推力については、ほぼ(a)と同様の幅で分布しているが、カットトルクについては密集して分布しているように見える。逆に(c)では、推力が密集して分布しているように見える。このように、個別のトンネルごとに見れば、支保パターン選定の指標としては、①推力が適するタイプ、②カットトルクが適するタイプ、③両者が適するタイプ等があることが分かる。今回対象としたデータにおいては③と考えられるものが70%と最も多かったが、①、②、③どのタイプに分類できるか明確ではないものもあり、①、②と考えられるものも各15%程度あった。したがって、ある一つのトンネルについて支保パターン選定のために機械データを用いる場合は、そのトンネルがこれら3つのタイプのどれに適合するかを施工の早期に判断する必要があることが分かる。



(a) Nトンネル (硬質岩) (b) Gトンネル (硬質岩) (c) Oトンネル (中硬質岩)
図-3 各トンネルにおけるカットトルクとスラスト推力の関係の例

5. 機械データとTBMマシントイプとの関係

ここでは、機械データをマシンタイプ毎で整理する。

TBM は大きく分けて、オープンタイプとシールドタイプがある。表-1 の各トンネルのマシントイプは表-4 に示した通りであり、オープンタイプが7トンネル、シールドタイプが8トンネルとほぼ同数であった。

検討結果を図-4 に示す。これによるとオープンタイプは、硬質岩から軟質岩の広い岩種で用いられており、採用された支保パターンは、B から DII が中心であった。一方、シールドタイプについては、中硬質岩と軟質岩を中心に用いられ、採用された支保パターンは C I から L であった。また、両タイプが混在している岩種、支保パターンについては、スラスト推力の大きさとマシンタイプとの間に明確な関係は認められなかった。なお、これらの傾向はカッタトルクについても同様であった。

表-4 各トンネルのマシントイプ

マシンタイプ	トンネル
シールド	A, B, C, D, E, F, O
オープン	G, H, I, J, K, L, M, N

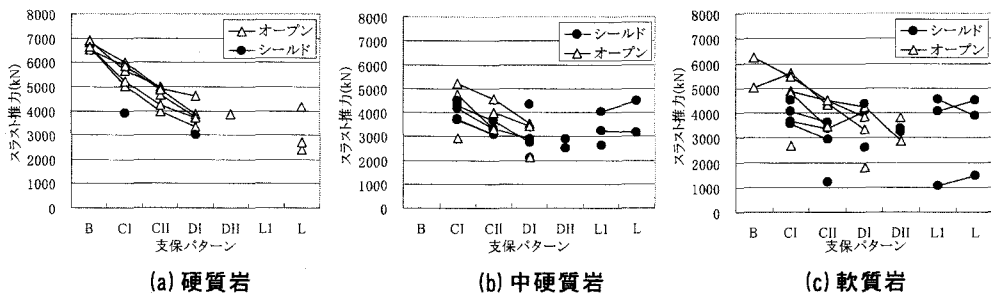


図-4 マシンタイプとスラスト推力の関係

6. 平均的な機械データと支保パターンとの関係

ここでは、各トンネルの機械データを横断的に検討するため、全てのトンネルの機械データについて平均したものを示す。

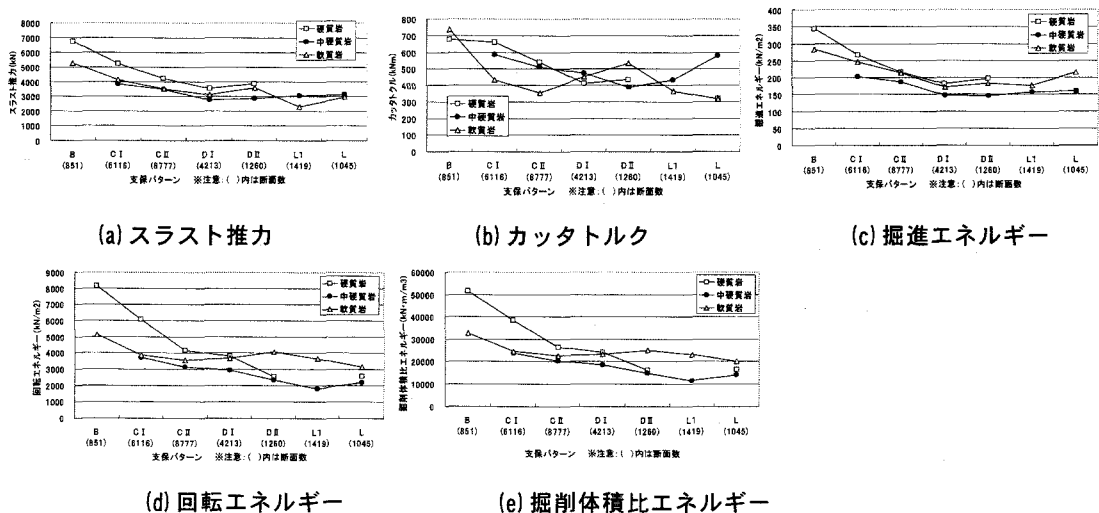


図-5 機械データと岩石グループ、支保パターンの関係

図-5 (a) によれば、支保規模が B, C I から L1, L と大きくなるにつれて、スラスト推力が小さくなっていることが分かる。また、この傾向は支保パターンが B から C II で特に顕著である。逆に、支保パターンが

D I から L では、推力がほとんど一定に近づいていることが分かる。このことの原因としては、ある程度規模が大きな支保が採用されている地質状態が悪い地山においては、推力におけるカッターヘッド推進反力以外の要因（摩擦抵抗や台車牽引力等）の占める割合が相対的に大きくなっている可能性も考えられ、今後機械データの吟味が必要である。

図-5 (b) によれば、カッタートルクでは、特に中硬質岩、軟質岩について支保パターンとの相関があまり見られない。これは、図-1 と図-2 の比較で述べたように、トンネルごとのばらつき大きいことが一因であることが考えられる。このように、特に中硬質岩、軟質岩において、複数のトンネルに対して同一のカッタートルク指標を用いて支保パターンを選定することは、地山評価を誤る可能性が高いものと言える。

推力を断面積で除したものである掘進エネルギー（図-5 (c) 参照）については、スラスト推力とほぼ同様の傾向となっている。これは、今回の検討対象トンネルの掘削径が 3.5 から 5m 程度とほぼ同程度であったことが原因であると考えられる。今後、大断面 TBM の機械データが蓄積されれば、新たな考察を行う必要があると考えられる。

回転エネルギー（図-5 (d) 参照）については、支保規模との相関が特に硬質岩、中硬質岩についてよく見られ、特に支保パターン B から C II が顕著である。回転エネルギーは、カッタートルクおよび速度、掘削断面積から求められるものである。カッタートルクが支保規模との相関が見られなかったのに対して、回転エネルギーには相関がある程度見られたことから、カッタートルクについては、速度と総合して判断する必要性が窺える結果と言える。

掘削体積比エネルギー（図-5 (e) 参照）については、回転エネルギーと同様となっている。これは掘削体積比エネルギーに対する回転エネルギーの項が大きく、推進エネルギーの要因が相対的に小さくなっていることによる。

また、全機械データを総じて見れば、支保規模と機械データの相関について、硬質岩が他の岩種より際立っている。このように、機械データの分析においては掘削岩種も重要なファクターであり、機械データのダイレクト値だけでなく、掘削中の岩種を掘削ずり等から評価するシステムを確立することも重要であると言える。

7. 機械データと補助工法採用実績との関係

表-5 補助工法採用実績

トンネル	採用された主な補助工法
B	ウレタン注入、吹付けモルタル、鍍止めボルト等
I	吹付けモルタル、鍍止めボルト、セメント注入、フォアバイリング等
K	空洞充填工、フォアバイリング等

TBM トンネルにおいては、断層、破碎帯、高地下水、膨張性などの不良地山において、トラブルの徴候が見られた場合、何らかの補助工法を用いる。もし、トラブルを回避できず掘進不可能となれば、TBM の最大の長所である高速施工が実現できず、多大なる損害となることも考えられる。したがって、不良地山部の適切な把握や補助工法の適切な採用は、TBM 施工において極めて重要である。ここでは、前節までに整理してきた各トンネルの機械データと補助工法採用箇所との相関について整理し、補助工法採用箇所の機械データがどのように変化していたかを検討する。本検討で整理した採用補助工法実績を表-5 に示す。

図-6 にスラスト推力と補助工法採用箇所の関係、図-7 にカッタートルクと補助工法採用箇所の関係を示す。これによると、不良地山部において崩落等が発生し、補助工法を採用した箇所においては、スラスト推力、カッタートルクとも前後区間より低下するケースが多いことが分かる。また、このことは、機械データの分析が不良地山部の早期発見・早期対策に役立つ可能性を示唆している。ただし、B トンネルの小規模な崩落が発生した箇所ではスラスト推力の低下が見られないことや K トンネルの補助工法が採用していない箇所等でカッタートルクが低下している等、機械データ低下そのものが全て補助工法を採用すべき地山であることを表しているとは言えない場合もあり、注意が必要である。

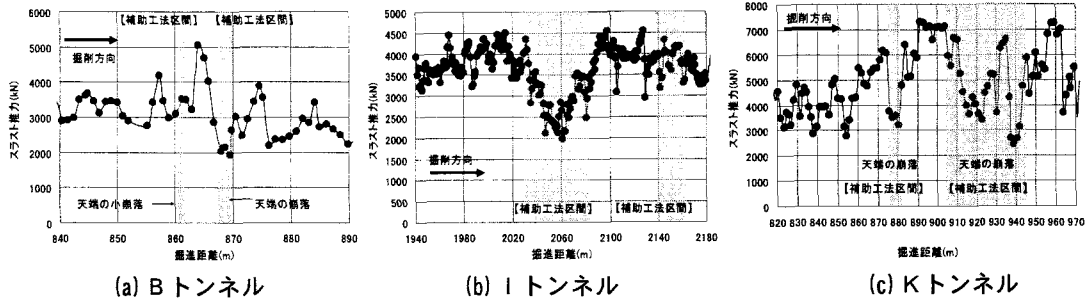


図-6 スラスト推力と補助工法採用実績の関係

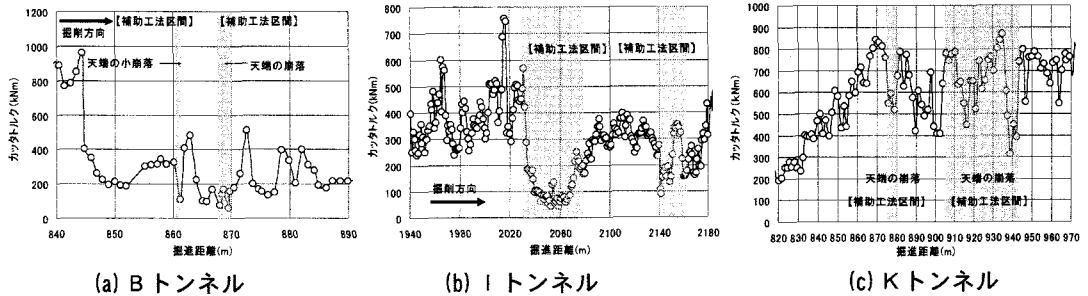


図-7 カッタートルクと補助工法採用実績の関係

8. まとめ

本検討で得られた知見をまとめると以下ようになる。

1. 各トンネルを同一のグラフに並べ機械データと支保パターンとの関係を見た場合、カッタートルクよりスラスト推力が、軟質岩より硬質岩がトンネル間の機械データのばらつきが小さい。
2. 個別のトンネルで見た場合、支保パターンと機械データの関係は、スラスト推力との関係が明確なもの、カッタートルクとの関係が明確なもの、両者との関係が明確なものがあり、どのタイプであるか各トンネル個別に判断する必要がある。
3. TBM マシンタイプについては、オープンタイプは、幅広い岩種で用いられ、採用された支保パターンは、B から DⅡ が中心であった。一方、シールドタイプについては、中硬質岩と軟質岩が中心であり、採用された支保パターンは CⅠ から L であった。また、両タイプが混在している岩種、支保パターンについては、スラスト推力の大きさとマシンタイプとの間に明確な関係は認められなかった。
4. 全トンネルを平均的に見た場合、硬質岩の全支保パターンと中硬質岩・軟質岩の支保パターン B から CⅡ については、機械データを支保パターンの選定に用いることが、ある程度可能となる可能性が高い。また、機械データの中では、スラスト推力または、各種エネルギーが支保パターンの選定指標として適している。
5. 補助工法を採用する必要があるような不良地山部においては、機械データに何らかの変化が生じる可能性が高い。

今後は、より多岐にわたる条件において、データ分析をより詳細に行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 和田宣史, 勘定茂, 碓富美夫: TBM 機械データに基づく地山評価, トンネル工学研究論文・報告集, vol.12, pp.207-212, 2002.11
- 2) 白鷺卓, 山本拓治, 水戸義忠, 山本真哉, 青木謙治: TBM 機械データを利用した支保の合理的選定方法, 第 32 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.269-274, 2003.1