

TBM トンネル掘削時の機械データと 支保に作用する荷重の関連性に関する考察

Consideration on Relation between Machine Data and Load on Support in TBM excavation

砂金 伸治^{*}, 真下 英人^{**}, 赤木 渉^{***}, 城間 博通^{***}

Nobuharu ISAGO, Hideto MASHIMO,
Wataru AKAGI and Hiromichi Shiroma

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 support pattern and item tendency of machine data excavated by TBM tunnel were examined, and load acted on support was calculated and it was compared with the ground characteristic and machine data. It was found that the load acting on support was decided by the characteristic of ground when the ground condition was poor while it was not when the ground condition was good.

Keywords: tunnel, tunnel boring machine, machine data, load, support pattern

1. はじめに

長大トンネルの建設費の縮減を図るには、トンネル断面をなるべく分割せずに急速施工を行い、かつ地山の緩みを抑制し、支保の軽減を図ることが最も効果的であることからTBMを活用した機械掘削が考えられている。しかし、我が国の地質は脆弱であることや、道路トンネルのTBMの実績は避難坑等の小断面に限られており、TBMの適用範囲を広げ、標準的な工法として普及させるためにはTBMトンネル掘削時の地山評価手法や、地山状態に応じた支保構造の設計手法を確立する必要がある。

本研究では、道路トンネルの先進導坑や避難坑の施工に用いられたTBMトンネルを対象とし、掘削時の機械データの傾向とトンネル毎の支保パターンとの関係を分析し、地山評価に資する指標の抽出を行った。また、支保工のひずみ計測データを基にした骨組み解析を実施し、支保工に作用する荷重の値を間接的に算定し、それらの荷重値と地山の性状との関連について考察した。

2. 研究方法

(1)対象トンネルと機械データの分析方法

表-1に本研究で分析の対象としたトンネルの主な地質と掘削径の一覧を示す。トンネルは道路トンネルの避難坑や先進導坑として用いられたTBMで掘削されたトンネルであり、掘削径が3.5~5.0mのトンネルA~Oに示す合計15本(上り線と下り線があるものは2本と数える)である。これらの掘削時に得られた機械データのうち、データ間の比較が可能な代表的な指標について、支保パターン毎に機械データの傾向を検討した。

* 正会員 修士(工学) 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)

** 正会員 博士(工学) 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)

*** 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

検討を行った機械データを表-2に示す。機械データを用いて分析を行った研究は過去にある¹⁾が、本研究では支保設計に資する機械データと支保パターンとの間に見られる関連性を検討するために、種々の機械データを取り上げるとともに、また、支保パターンを統一的に大別して検討を行うことに着目した。すなわち、1次の機械データに関する分析、および、2次の機械データのうち、1次の機械データを用いてトンネルの掘削径の影響を除去できると考えるデータで掘進エネルギーと回転エネルギー、また、スラスト系と回転系のエネルギーを掘削体積で除したものと表わされる掘削体積比エネルギーを取り上げ、それらに対して考察を加えた。また、支保パターンに関しては、各トンネルで採用されたパターンは各トンネルで個々に設定された場合が多く、同じ支保パターン名であってもトンネルが異なれば支保の規模や構成部材が異なり、補強材等が使用されている場合があった。本研究では各トンネルの施工で用いられた支保の実績を分析し、表-3に示すように支保パターンを大別することにより機械データの分析を実施した。この分類では、鋼アーチ支保工の建て込み間隔(概ね0.75~1.5m程度)や補強材(剥落防止のための一時的な矢板の施工や、不良な地山に遭遇した場合においてシールドジャッキを用いた掘進を行う際の反力受けとして必要となるインバートセグメントなど)の採用等に関しては考慮されていない。また、機械データは掘削が継続されている間は一定の時間間隔をもってリアルタイムで算定され、データの数是非常に多い。本研究では支保パターンが変化しない限りにおいて、そのリアルタイムで得られたデータを、1施工サイクル間で平均することで、ある1施工サイクルにおける機械データとした。それらの平均化された機械データはトンネルの1施工サイクル毎に得られることになるが、そのトンネルの同一の支保パターンにおいてすべての機械データを平均化し、その値を当該トンネルのある支保パターンにおける機械データの代表値とし、比較・検討に使用した。

表-1 分析対象のトンネルの主な地質と掘削径

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、礫岩、砂岩	5.0
C	安山岩、礫岩、砂岩	5.0
D	砂岩、礫岩、泥岩	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、千枚岩	5.0
H	チャート、凝灰岩、粘板岩、変斑れい岩、千枚岩	5.0
I	砂岩泥岩互層、花崗岩、ホルンフェルス	5.0
J	黒雲母花崗岩	5.0
K	黒雲母花崗岩	5.0
L	凝灰岩、砂岩、シルト	4.5
M	凝灰岩、砂岩、シルト	4.5
N	花崗斑岩、流紋岩、凝灰岩	4.5
O	花崗岩、流紋岩	4.5

表-2 分析対象の機械データ

種類	名称	内容
1 次 の 機 械 デ ー タ	純掘進速度	スラストジャッキの単位変位量
	カット回転速度	カットヘッドが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
	カットトルク	カットヘッドに作用する抵抗
2 次 の 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	(=(カットトルク×カット回転速度)/(純掘進速度×掘削断面積))
	掘削体積比エネルギー	スラスト系と回転系のエネルギーを掘削体積で除したもの (=掘進エネルギー+2π×回転エネルギー)

表-3 支保パターンの分類の内容

パターン	支保の内容
B	無支保
C1	吹付け(2cm)
C11	吹付け(2cm)、鋼アーチ支保工 H-100 の使用
D1	吹付け(3cm)、鋼アーチ支保工 H-100 の使用
D11	吹付け(3cm)、鋼アーチ支保工 H-125 の使用
L-1	簡易ライナー
L	鋼製セグメント・インバートセグメント

(2) 支保工に作用する荷重の分析方法

荷重の分析方法は計測された支保工に生じたひずみ値より算定された縁応力を用い、支保工を骨組みと仮定した2次元骨組み解析によって荷重値を間接的に算定した。解析的に求めた荷重はその断面における土荷重高さHに換算し、それぞれをそのトンネルの掘削径Dで除したもので、すなわちH/Dを用いて検討した。図-1に採用した解析モデル、表-4に解析の対象とした36断面の岩質と支保パターンを示す。仮定した荷重の形状は鉛直方向では一様分布の矩形荷重P_vとし、下方より同値の反力を受けると仮定した。また水平方向で

は深度方向の荷重増分 γD (γ : 単位体積重量) を考慮し、側圧係数 λ を考慮した台形荷重とした。なお、ひずみの計測が鋼アーチ支保工の建て込み後を基準としたと考えられるため、支保工の自重は考慮しないものとした。

支保工は主たる部材が吹付けコンクリートおよび鋼アーチ支保工の場合と、鋼製セグメントや簡易ライナーの場合とに分けられる。解析では支保工は梁要素と仮定し、吹付けコンクリートの剛性や断面積は考慮しないものとした。すなわち、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工が組み合わされている場合は、鋼アーチ支保工単体が受けている荷重を算定し、ヤング率、断面積および断面 2 次モーメントは鋼アーチ支保工の諸元そのものを用い、得られた荷重を奥行き 1m 分に換算した。また、鋼製セグメントや簡易ライナーの場合は主桁のみを構造部材とし仮定することで断面積や断面 2 次モーメントを算定した。なお、鋼アーチ支保工および鋼製セグメントのポアソン比は 0.3 とした。

地盤反力ばねは法線方向のみを考慮し、引張における剛性を無視した全周地盤ばねモデルを採用した。地盤反力ばね定数はトンネル標準示方書(開削工法編)²⁾を参考として算定した。すなわち、 $k_n = 1.58 \alpha \cdot E_0 \cdot B_n^{-3/4}$ であり、 k_n : 法線方向地盤反力係数 (kN/m³)、 α : E_0 の算定方法および荷重条件による補正係数、 E_0 : 地盤の変形係数 (kN/m²)、 B_n : トンネル径 (m) (表-1 に示した掘削径と同値) とし、地盤の変形係数は各トンネルにおいて採取したコアを基にした一軸圧縮試験結果を用いて算定した。また k_n には 1/3.7 を乗じて最終的な地盤反力係数を決定した。また、鋼製セグメントや簡易ライナーの継手部分は剛結であると仮定した。

作用している荷重の決定方法は計測されたひずみ値をもとにして縁応力を算定し、トンネル毎に得られた縁応力の計測値と解析によって算定した縁応力の解析値の差を 2 乗し、それらの和の平方根を誤差関数 ε と定義し、その関数を最小にするような解析による縁応力を、

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_i^* - \sigma_i)^2} \rightarrow \min$$

が成立するように決定した。ここに、 ε : 誤差関数、 σ_i^* : 計測されたひずみをもとに算定した縁応力、 σ_i : 解析により算定された縁応力、 n : 計測点数(トンネル毎で異なり 3~7) である。 σ_i は鉛直方向荷重 P_v と側圧係数 λ の関数になると考えられることから、まず初めにある λ を与えた条件下で、 ε が最小となる σ_i を算定した。その後、種々の仮定した λ において σ_i を算定し、最も誤差の小さい場合の λ が得られる時の σ_i を支保に作用する土荷重高さのもととなる σ_i として決定した。実際の解析では λ は 0.1 刻みとし、荷重としての H/D は 0.1 未満の場合では 0.03 刻み、0.1 以上の場合では 0.15 刻みで解析を実施した。

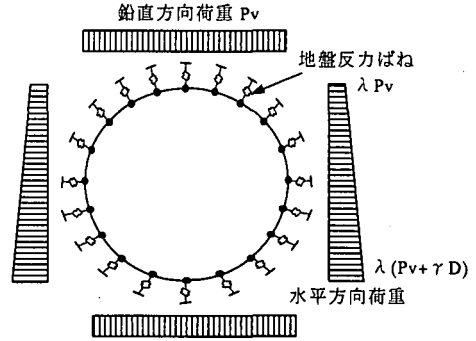


図-1 解析モデル

表-4 解析対象断面の岩質と支保パターン

トンネル・No.	岩質	支保パターン
A トンネル(1)	火山礫凝灰岩	CII
A トンネル(2)	流紋岩	CII
A トンネル(3)	流紋岩	CII
A トンネル(4)	流紋岩	L
A トンネル(5)	砂質凝灰岩	L
B トンネル(1)	玄武岩質凝灰岩	L
B トンネル(2)	断層破砕帯	L
C トンネル(1)	玄武岩質凝灰岩	L
C トンネル(2)	断層破砕帯	L
D トンネル	砂岩	CII
E トンネル(1)	砂岩泥岩互層	DII
E トンネル(2)	砂岩	CII
E トンネル(3)	砂岩	DII
G トンネル(1)	粘板岩	DI
G トンネル(2)	粘板岩	DII
G トンネル(3)	粘板岩	DII
G トンネル(4)	粘板岩	DI
G トンネル(5)	緑色凝灰岩	CII
G トンネル(6)	千枚岩	CII
G トンネル(7)	チャート	DII
G トンネル(8)	千枚岩	DI
H トンネル(1)	粘板岩	DI
H トンネル(2)	チャート	DI
H トンネル(3)	変斑れい岩	CII
H トンネル(4)	粘板岩	CII
H トンネル(5)	千枚岩	DI
H トンネル(6)	変輝緑岩	DI
H トンネル(7)	チャート	DI
H トンネル(8)	千枚岩	DI
H トンネル(9)	粘板岩	DI
N トンネル(1)	花崗斑岩	DI
N トンネル(2)	流紋岩質凝灰岩	CII
N トンネル(3)	流紋岩質凝灰岩	CI
N トンネル(4)	断層破砕帯	L
O トンネル(1)	流紋岩	L
O トンネル(2)	流紋岩	L

3. 分析結果

(1)機械データの分析結果

初めに1次の機械データのうち、純掘進速度およびカッタ回転速度と支保パターンの関係を検討した。スラスト推力とカッタトルクに関しては掘削径の影響を除去した形で検討することが望ましいと考え、掘進エネルギーおよび回転エネルギーといった2次の機械データで検討を行うこととした。

図-2 に純掘進速度と支保パターンの関係を示す。純掘進速度は地山が良好な場合と不良な場合に低下する傾向があるとともに、地山が不良な場合の一部で純掘進速度が増加する場合があった。これは地山が良好なほど掘進しにくくなることによる低下と、地山が不良な場合は掘進に慎重を期して速度が減少する場合と、逆に岩自体の掘進は容易であることから速度が増加してしまう傾向があるためと考えられる。すなわち、支保パターンがBもしくはL程度に該当する地山以外であれば、平均的に見れば純掘進速度と支保パターンの間に関連性は見られる。しかし、純掘進速度は施工上のサイクル等の制約条件も受けやすく、支保パターンとの関連性を現場にて議論することに対しては検討を要すると考えられる。

図-3 にカッタ回転速度と支保パターンとの関係を示す。なお、EおよびFトンネルでは時系列でのカッタ回転速度が算定されておらず、比較が不可能であった。カッタ回転速度は地山が不良な場合ほど低下する傾向が全体の平均値をとれば読みとれるが、カッタ回転速度そのものの値の低下の度合いが小さいことから、実際の施工中のリアルタイムの値から支保との関連を導き出す場合の指標として用いる場合は検討が必要であると考えられる。また、異なったトンネル間でのばらつきも大きいことから、カッタ回転速度だけから定量的な判断を行うことは困難であると考えられる。以上より、施工上の制約を受けやすい1次の機械データと支保パターンの関連性については結果的には支保パターンの間に関連性は見られるが、トンネル間、または支保パターン毎でのばらつきが大きい場合もあることから、それら個々のデータから支保パターンを決定するためには検討の余地があり、他の指標と組み合わせが必要になると考えられる。

次に2次の機械データとして、支保パターンと掘削に要しているエネルギーに関する指標の関連性について検討を行った。図-4 に掘進エネルギーと支保パターンとの関係を示す。地山が不良になり、支保の規模が大きくなるにつれて、掘進エネルギーが低下することが明確に読みとれる場合が多いと考えられる。支保パターンがLまたはL-1の時にはその傾向が読みと

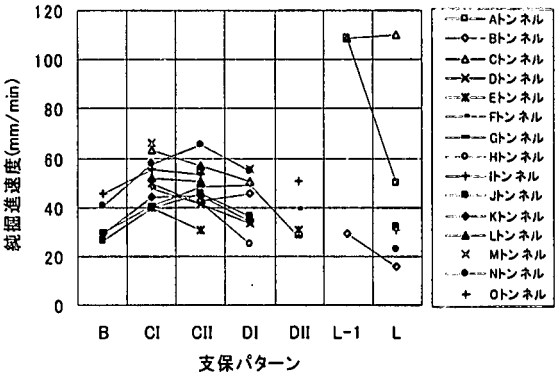


図-2 純掘進速度と支保パターンの関係

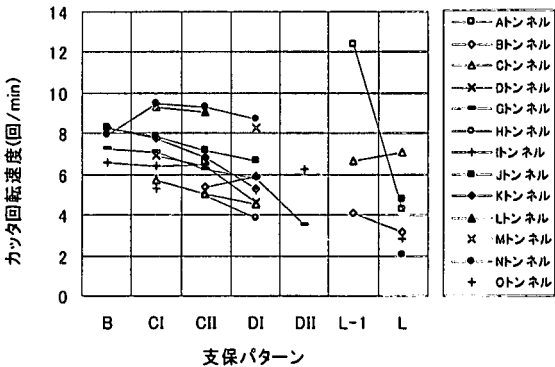


図-3 カッタ回転速度と支保パターンの関係

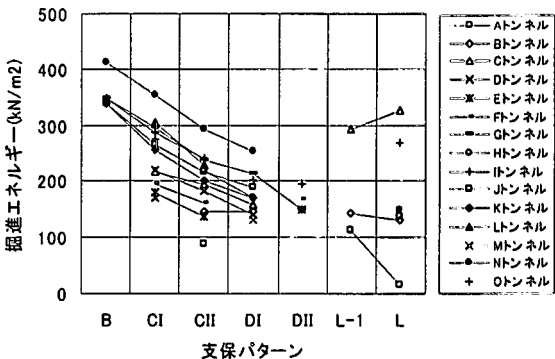


図-4 掘進エネルギーと支保パターンの関係

れないこともあるが、これは地山が不良な場合でTBMの掘進をジャッキの推進で掘削を進めていた例と一致することから、その影響が出ていると考えられる。また、異なったトンネル毎の比較で考えると、同一の支保パターンに分類した場合では、機械データの平均値に概ね2倍程度の差があったと認められる。

図-5に回転エネルギーと支保パターンとの関係を示す。なお、EおよびFトンネルでは図-3に示したように時系列でのカット回転速度が算定されていなかったため、回転エネルギーの算定ができなかった。掘進エネルギーの場合と同様に支保の規模が大きくなるにつれて、回転エネルギーが低下することが明確に読みとれる場合が多く、また掘進エネルギーの場合よりは、支保が重くなった場合についても値が低下する傾向が見られることが多いが、同一の支保パターンに分類した場合の機械データの平均値の差が3倍程度となり、異なったトンネル間で支保の規模を比較する場合には、これらの平均値の差の考慮した上で、検討する必要があると考えられる。

また、図-6に掘削体積比エネルギーと支保パターンの関係を示す。掘削体積比エネルギーを算定する場合は掘進エネルギーと回転エネルギーの値が基本となるが、図-4と図-5のエネルギー値を単純に比較しても、回転エネルギーの方が掘進エネルギーよりもエネルギーの値として大きく算定されるため、回転エネルギーの変化の傾向と掘削体積比エネルギーの変化の傾向がほぼ同一となっている。そのため、同一の支保パターンに分類した場合の機械データの平均値の差は3倍程度のままであった。

以上より、掘進エネルギー、回転エネルギーおよび掘削体積比エネルギーに関しては支保パターンとの間に関連性が認められるが、異なったトンネル毎で支保パターンとの関連をみると、ばらつきが少ない掘進エネルギーで代表させたとしてもほぼ同等の支保規模の中で2倍程度の差が見られる場合がある。したがって機械データを支保選定の指標として活用するためには、マシンの特性等を加味すると同時に、岩質の特性を反映しうる指標を新たに加えて検討していく必要があると考えられる。

(2) 支保工に作用する荷重の解析結果

次に支保に作用する荷重の検討を行った。なお、支保パターンがCIの場合については1断面のみの値であり、本来は鋼アーチ支保工が建て込まれない地山等級であるが、荷重の分析を行うために、鋼アーチ支保工を建て込んでひずみを計測し断面力等を算定した。

図-7に縁応力に着目して実測値と解析値の誤差が最小となるようにして得られたH/Dの平均値と、その間の最大値と最小値を表した結果を示す。これより荷重の値は地山が不良になるにつれて相対的に大きくなる傾向が読みとれるこ

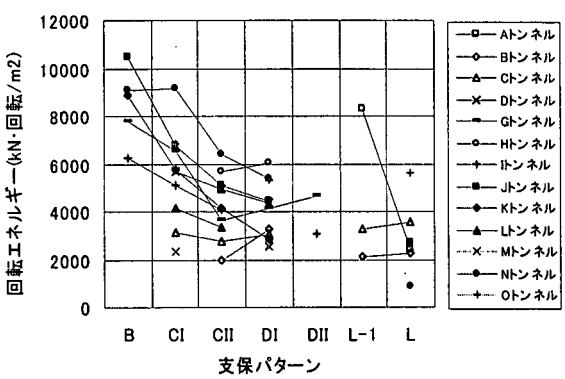


図-5 回転エネルギーと支保パターンの関係

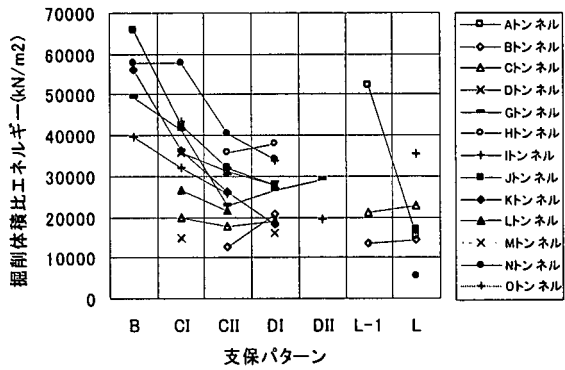


図-6 掘削体積比エネルギーと支保パターンの関係

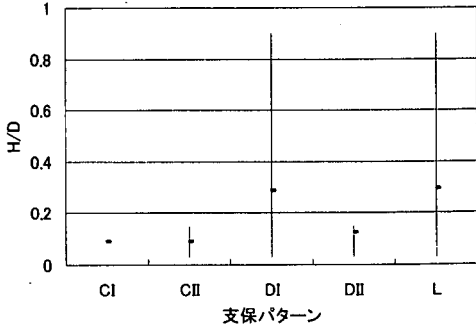


図-7 支保工に作用する荷重 H/D の解析結果

とができ、最大で $H/D=0.9$ 程度、すなわち概ね掘削径に相当する程度の土荷重が作用すると考えられる。また、分析した断面数にばらつきはあるが、支保パターンが C 級以上の場合と D 級以下の場合で H/D の大きさに差が生じていると考えられる。

図-8 に同様にして算定した側圧係数 λ の平均値と、その間の最大値と最小値を表した結果を示す。これより側圧係数は支保パターン毎に大きな差は見受けられず、側圧係数は概ね $0 \sim 0.5$ 程度であると考えてよい場合がほとんどであった。

図-9 に岩質を硬質・中硬質の場合と軟質の場合に分類し、支保パターンを C 級以上と D 級以下とに分類した場合の支保工に作用する荷重 H/D の結果を示す。なお、図-9 中の円の大きさが H/D が算定されたサンプル数の頻度を表している。これより C 級以上の地山では岩質によらず H/D が 0.2 以下の分布に集中して大きな差が見られなかったのに対し、D 級以下の地山では C 級以上の地山より H/D は大きい値で得られていることがあり、さらに、硬質・中硬質の場合と軟質の場合を比較すると軟質の方が総じて H/D が大きいと考えられる。以上より C 級以上の概して良好な地山において荷重値を検討する場合は岩質等の地山の性状によらず荷重の最大値が決まり、D 級以下の概して不良な地山の場合は岩質による影響を受けることが多いと考えられる。

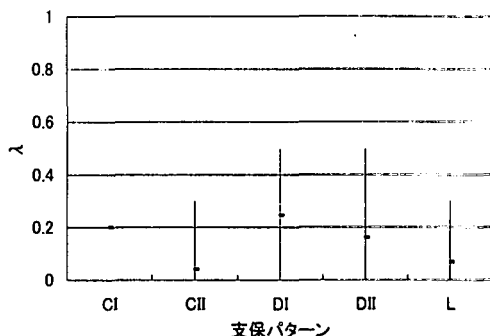


図-8 側圧係数 λ の解析結果

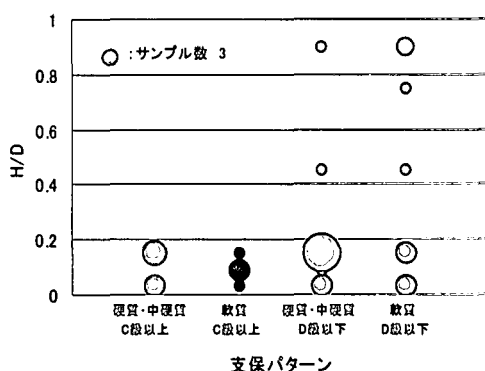


図-9 岩質・支保パターン毎の H/D の頻度

4. まとめと今後の課題

本研究では、掘削時の機械データの傾向や支保工に作用する荷重とトンネル毎の支保パターンとの関係について検討した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 機械データの指標には支保パターンの関連性が見受けられる指標があるが、ほぼ同等の支保規模であってもトンネル間でのばらつきが大きい場合もあり、支保パターンを決定するためには TBM マシン本体や岩質の影響を加味した地山の性状をより反映されやすい指標等と組み合わせて検討を行う必要がある。
- (2) TBM トンネルの支保工に作用する荷重値は、今回計測を行ったトンネルでは土荷重に換算すると最大で掘削径程度であり、側圧係数は概ね $0 \sim 0.5$ 程度となった。また、C 級以上の地山においては岩質等の地山の性状が荷重値に及ぼす影響は小さく、D 級以下の場合は岩質による影響を受けることが多いことが分かった。

今後は、機械データと支保パターンの関連性の分析をマシンの特性および岩質の面から行うとともに、地山物性値と算定された荷重値の関連性の検討、および荷重値に対して必要となる支保規模に関する検討を行い、TBM トンネルにおける支保設計法の提案を行う予定である。

参考文献

- 1) 城間・赤木ら：TBM 機械データを用いた支保パターン選定に関する一考察，土木学会トンネル工学研究論文・報告集，pp.15～22，2001.11
- 2) トンネル標準示方書〔開削工法編〕・同解説，pp.260～262，土木学会，平成 8 年 5 月