

◆ 報 文 ◆

TBM掘削時に得られた機械データと 支保に作用する荷重に関する考察

砂金伸治* 真下英人** 赤木 渉*** 城間博通****

1. はじめに

長大トンネルの建設費の縮減を図るためには、トンネルの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て支保の軽減を図ることが最も効果的であると考えられることから、トンネルボーリングマシン（以下TBMと略）を活用した機械掘削工法の採用が建設費縮減のための一つの有効な方法と考えられる。しかし、我が国では地質が脆弱であるために、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いること、また、その場合の支保設計はほとんどが個別のトンネル毎に試行錯誤的に実施されていることなどから、設計手法が確立しているとは言いがたい。今後、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を用いたトンネルの掘削時における地山評価手法や、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でTBMを用いた場合の掘削時に実際に得られた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同一の尺度で検討し、地山評価に資する指標の検討を行った。また、同様に施工時に計測した支保工のひずみデータを基に、支保工に作用する荷重の値を解析的に算定し、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. 掘削時の機械データと支保工の関連性

2.1 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。これらの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本とする）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ものを取り上げ、

表-1 分析対象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移動 変化量
	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)

支保パターン毎に機械データとの関連性の傾向を検討した。

表-2に検討を行った機械データの一覧を示す。機械データを用いて分析を行った研究は過去にあ

Study on the Machine Data and the Load Acting on Support
Acquired in Excavation by TBM

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検討した。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う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のとして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、各トンネルで採用された支保パターンは、個々の現場の判断に基づき設定された場合がほとんどであり、同じ名称の支保パターン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ることが多く、トンネルによっては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パターンの実績を分析し、表-3に示すように本研究で改めて支保パターンのランク分けを行い、このランクに基づいて機械データの分析を試みた。この分類では鋼アーチ支保工の建込み間隔(0.75~1.5m程度)の影響や補強材(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)の使用等に関しては考慮していない。

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
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
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

また、機械データは掘削が継続されている間は一定の微小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。本研究では同一の支保パターンにおいて、そのリアルタイムで得られたデータの平均値を算定し、その値を当該トンネルのその支保パターンにおける機械データの代表値として検討に使用することとした。

2.2 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ト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ト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-1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見られた。これは地山が良好な場合は岩盤が固くなり掘進速度が低下してしまうことが考えられる。また、地山が不良な場合は掘進に慎重を期するために掘削自体に時間を要することで掘進速度が低下する場合と、逆に岩の強度が低くなっているため掘進速度が増加し、トンネル毎ではばらつきが大きいと考えられる。以上より、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、支保パターンがCからDに移行するにつれて純掘進速度は下がる傾向が見られる。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いと考えられることから、支保を選定するための指標として用いるためにはさらなる検討が必要である。

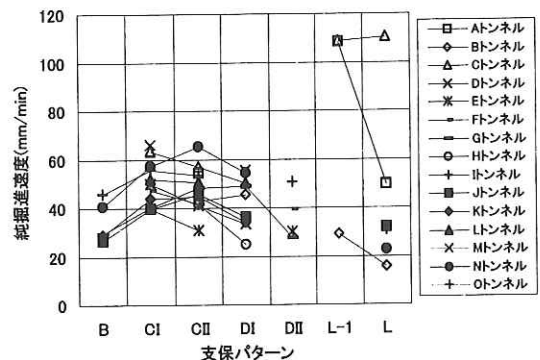


図-1 純掘進速度と支保パターンの関係

図-2にカット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ト回転速度が算定されておらず、比較が不可能であった。カット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、カット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相関を導き出す場合の指標として用いることは困難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、カット回転速度だけから定量的な判断

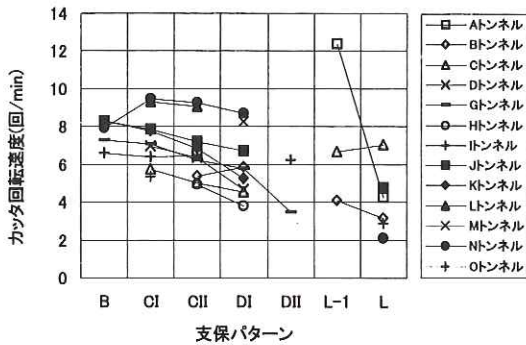


図-2 カッタ回転速度と支保パターンの関係

を行うことは困難である。

以上より、1次の機械データと支保パターンの間には相関性は見られるが、支保の規模がほとんど同一の場合でもトンネルが異なれば値自体のばらつきが多く見受けられることや、また、純掘進速度については施工の点からの制約により速度が決定される場合等があることから、1次の機械データから支保パターンを決定するためには、それら個々のデータの絶対値に加えて、施工状況などを踏まえた別の検討を加えて決定する必要があると考えられる。

次に2次の機械データとして、支保パターンと掘削に要するエネルギーに関する指標の相関について検討を行った。図-3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。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場合と一致することから、その影響が出たためであると考えられる。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は、掘進エネルギーは最大値と最小値の差が概ね2倍程度あった。

図-4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タ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、支保の規模が大き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。なお、異なったトンネル毎の比

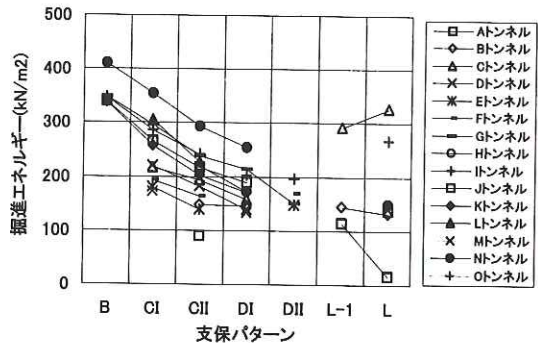


図-3 掘進エネルギーと支保パターンの関係

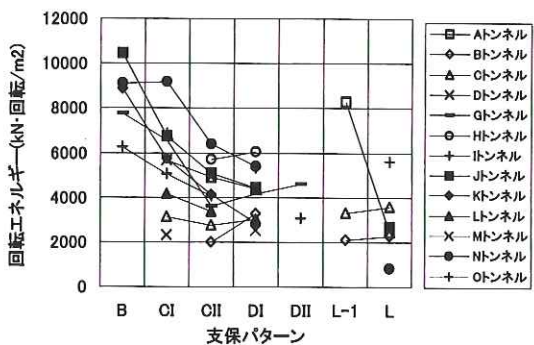


図-4 回転エネルギーと支保パターンの関係

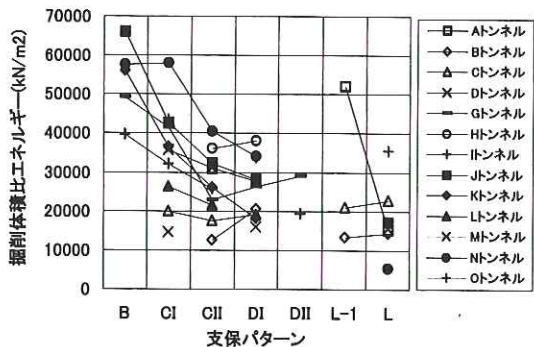


図-5 掘削体積比エネルギーと支保パターンの関係

較で考えると、同一の支保パターンに分類した場合は、掘進エネルギーは最大値と最小値の差が概ね3倍程度あった。そのため、これらのエネルギー値を参考として支保の規模を決定しようとする場合は、これらの値にこのような差があることを認識した上で行う必要があると考えられる。

また、図-5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-3と図-4のエネルギー値を比

較した場合、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最大値と最小値の差は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相関性が認められるが、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の絶対値を用いて支保選定の指標として活用するためには、機械データの値に影響を及ぼすと考えられるシールドタイプやオープンタイプといったマシンの特性等を加味することや、機械データの変化の傾向を補完するために、地山の特性、すなわち、岩の強度や地山に内含される亀裂の程度などに見られる特性を考慮して検討する必要があると考えられる。

3. TBM トンネルの支保に作用する荷重の評価

3.1 荷重の評価を行うための解析条件

荷重の評価方法は鋼アーチ支保工にひずみゲージを直接貼付して計測したひずみ値を用い、その値に基づき縁応力を算定し、支保工を骨組みと仮定した2次元骨組み解析から得られる縁応力と比較することにより算定した。図-6に採用した解析モデルの概要を示す。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

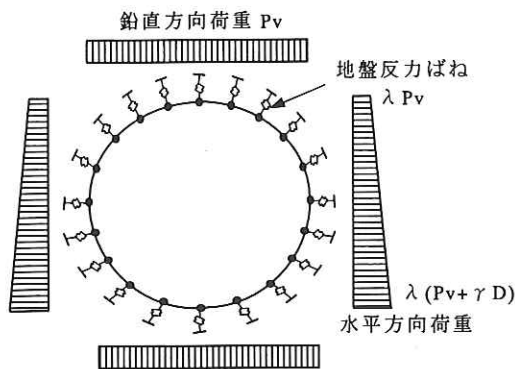


図-6 解析モデル

れる。解析では支保工は梁要素と仮定し、鋼アーチ支保工のみのヤング率や断面積、断面2次モーメントを考慮し、別途行った解析によると吹付けコンクリートの影響は小さいことから、それらについて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と仮定し、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、鋼製セグメントおよび簡易ライナーの場合は主桁のみを構造部材と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。

また、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。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ことから、支保工の自重は考慮しなかった。

地盤反力ばねは法線方向のみを考慮し、引張の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

表-4 解析対象断面の岩質と支保パターン

トンネル	断面数	岩 質	支保パターン
A	5	火山礫凝灰岩、 流紋岩 砂質凝灰岩	CII, L
B	2	玄武岩質凝灰岩、 断層破砕帯	L
C	2	玄武岩質凝灰岩、 断層破砕帯	L
D	1	砂岩	CII
E	3	砂岩泥岩互層、 砂岩	CII, DII
G	8	粘板岩、 綠色凝灰岩、 千枚岩、チャート	CII, DI, DII
H	9	粘板岩、チャート、 変斑れい岩、 千枚岩、変輝緑岩	CII, DI
N	4	花崗斑岩、 流紋岩質凝灰岩、 断層破砕帯	CI, CH, DI, L
O	2	流紋岩	L

法編)²⁾による式を参考として算定した。これによれば、トンネル本体の地盤反力係数の算定方法として、鉛直方向地盤反力係数と、水平方向地盤反力係数が記載されている。本研究では、トンネルに対して法線方向のばねで地盤反力をモデル化すると考え、 $k_n=1.58 \cdot a \cdot E_0 \cdot B_n^{-3/4}$ とした。ここに、 k_n : 法線方向地盤反力係数 (kN/m³)、 a : E_0 の算定方法および荷重条件による補正係数 (値として4を採用)、 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一) である。地盤の変形係数は各トンネルで得られた一軸圧縮試験結果を用いて算定した。また k_n には $1/3 \sim 1/4$ の値を乗じて最終的な値を算定することから、本研究では $1/3.7$ を乗じて最終的な地盤反力係数とした。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。

3.2 荷重の評価方法

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とることで誤差の総和 ε を算定し、その ε を最小にするような解析による縁応力を算定した。その値をもとにして鉛直方向荷重 P_v を決定した。すなわち、

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

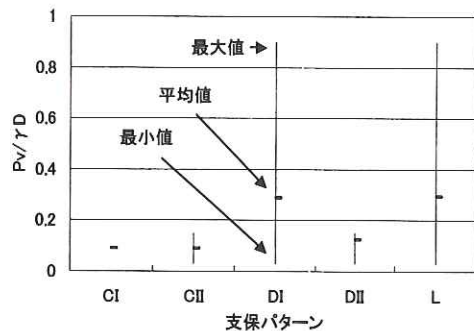
を満たすようにした。ここに、 ε : 誤差の総和、 σ_i^* : 計測されたひずみをもとに算定した縁応力、 σ_i : 解析により算定された縁応力、 n : 計測点数 (トンネル毎で異なり3~7) である。 σ_i は P_v と側圧係数 λ の関数になると考えられることから、まず初めにある λ を一定とした条件で、 σ_i をパラメータとして ε が最小となる場合の σ_i を算定した。これらの解析を様々な λ においても実施し、 λ 毎で ε が最小となる場合の σ_i を列挙し、その中でも ε が最も小さい場合の σ_i を最終的に解析より得られた縁応力と決定した。その σ_i から支保に作用する荷重 P_v を算定し、それが支保に作用する土荷重であると決定した。

3.3 支保工に作用する荷重の解析結果

支保に作用する荷重の算定では、支保パターンがCIの場合は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み、ひずみを計測し断面力等を算定した。

支保工に作用する荷重は求めた荷重 P_v をその断面における単位体積重量 γ とそのトンネルの掘削径 D で除したものである $P_v/\gamma D$ を用いて評価した。図-7に得られた $P_v/\gamma D$ 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ることができ、最大で $P_v/\gamma D=0.9$ 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 $P_v/\gamma D$ の大きさに差が生じた。

また、図-8に側圧係数の解析結果について示す。これより、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0~0.5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 $P_v/\gamma D$ の結果を示す。なお、図-9中の円の直径が $P_v/\gamma D$ が算定されたサンプル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 $P_v/\gamma D$ が0.2以下



分析数→ 1断面 10断面 11断面 5断面 9断面
図-7 支保工に作用する荷重 $P_v/\gamma D$ の解析結果

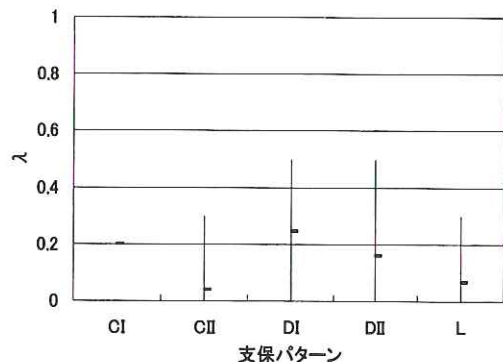
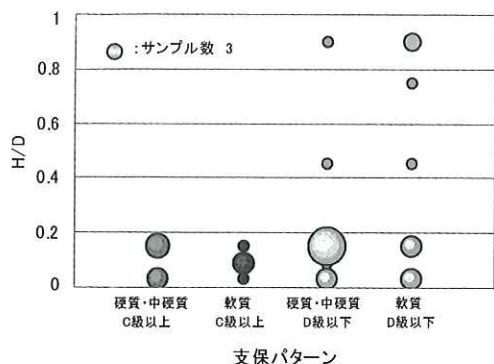


図-8 側圧係数 λ の解析結果

図-9 岩質・支保パターン毎の $P_v/\gamma D$ の頻度

の領域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 $P_v/\gamma D$
は大きい値で得られている場合が多く、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 $P_v/\gamma D$ が大きい。

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ることから、実設計にお
いて荷重の設定を行う場合は小崩落程度の規模を
考えればよく、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ことから、
地山の性状を事前に把握した上で、個別の地山毎
に荷重の設定を行うことが望ましいと考えられる。

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相関
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0～0.5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
以下の場合に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、特に岩の強
度の面から行うとともに、前方探査等に見られる
機械データ以外からの地山の情報と機械データと
の関連性、原位置の地山物性値と算定された荷重
値の関連性、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) 城間博通、赤木渉、高崎英邦、山口泰男、関伸也：
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，平成13年11月
- 2) トンネル標準設計方書〔開削工法編〕・同解説，土木学
会，pp.260～262，平成8年5月

砂金伸治*



独立行政法人土木研究所基
礎道路技術研究グループト
ンネルチーム主任研究員
Nobuharu ISAGO

真下英人**



独立行政法人土木研究所基
礎道路技術研究グループト
ンネルチーム上席研究員，
工博
Dr.Hideto MASHIMO

赤木 渉***



日本道路公団試験研究所道
路研究部トンネル研究室
Wataru AKAGI

城間博通****



日本道路公団試験研究所道
路研究部トンネル研究室長
Hiromichi SHIROMA