

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

A STUDY ON SELECTION OF SUPPORT SYSTEM USING TBM-DATA

城間博通 1)・赤城渉 1)・高崎英邦 2)・山口泰男 3)・関伸也 4)

Hiromichi SHIROMA, Wataru AKAGI, Hidekuni TAKASAKI, Yasuo YAMAGUCHI, Shinya SEKI

The purpose of this paper is to examine the possibility of support system selection method with being clear the correlation between support system and TBM-data. What were introduced to research are five TBM tunnels of the 3.5~5.0m diameter. As a result, there was the correlation which was comparatively good between specific energy which is one of the machine data and support system. Therefore, the possibility of selecting the support system using the TBM machine data was indicated.

Key words : TBM method, TBM-data, specific energy, support system

1. 研究の背景と目的

トンネルボーリングマシン(以下TBM)掘削においては、各種データを用いて地山分類を行ない、予め計画した地山等級に相当する支保パターンを施工するのであるが、TBM周辺では岩盤状態の観察がやり難いこともあって、責任技術者にとっては地山分類と支保パターン選択の意志決定が重要な業務となっている。ここで最近、TBM掘進中に得られる機械データを用いて、支保パターン選定過程の補完として用いようとする試みがある。これは、TBM機械データは実施工から直接得られたものであり、地山分類の間接的な指標となり、ひいては支保パターンの選定に結び付けれると仮定していることによる。既往研究の多くは、方法論として以下の二種に分けられる。すなわち、地山観察・挙動観測とTBM機械データを合せて、①地山分類して支保パターンを選定する方法1,2,3,4,5,6)、および、②直接に支保パターンを選定する方法で実際の現場で補助的に使われている例もある6,7)。

本論文の目的は、掘削径3.5~5.0mの5例のトンネルにおけるTBM機械データと支保パターンの相関性を調査研究し、機械データを利用した支保パターン選定方法の可能性を検討することにある。もし、機械データを利用しなかった施工完了のTBMトンネルにおいて、機械データと支保パターンとの間で相関性が認められれば、客観性の高い機械データを支保パターン選択意志決定問題に利用する可能性を示唆していると言える。類似の研究は過去にも試みられているが、これらと比べて本論文の特徴は、複数トンネルを同時に同解析法で比較検討したこと、TBM径を3.5~5.0mの範囲に限定して径の大きさによる変動要因の影響を低減したこと、にある。

-
- 1) 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) フェロー会員 工学博士 日本大学 生産工学部土木工学科
 - 3) フェロー会員 日本大学 生産工学部土木工学科(非常勤講師)
 - 4) 学生会員 日本大学大学院 生産工学研究科土木工学専攻

2. TBM 機械データの選択と解析方法

(1) 掘削体積比エネルギーの選択

TBM のカッターフェイスは切羽自立を補助し、その後方の TBM シールドは地山の変形や崩落現象から機械や作業員を保護する。したがって支保が設置されるまでのしばらくの間は、TBM が地山安定化をサポートしていることになる。よってこの切羽近傍で得られる TBM 機械データは実大施工試験として最高の価値を持つといえ、地山評価の指標としてあるいは支保パターン選択の判断基準のひとつとして利用できることが期待される。

数ある機械データのうち、何が地山分類や支保パターン選択に有効であるかであるが、ここでは、掘進速度と掘削体積比エネルギー (Specific Energy) ⁸⁾ を検討してみる。

掘進速度が検討の対象に上げられる理由は、速ければ、掘削に時間を要しない軟弱地盤で重装な支保パターンになるという仮定によっている。しかし、たとえば森田等 ⁷⁾ の研究報告によると、掘進速度と支保パターンの間に相関性は認められていない。すなわち、掘進速度が速くなるとされる軟岩系であっても重装の支保パターンになるとは限らず、一定の傾向は見出せていない。これは、地山の掘削を TBM の能力だけに任せるのではなく、オペレーターが施工の安全や経験を考慮しながら人為的に掘進速度で TBM をコントロールしていることによる理由と報告されている。

掘削体積比エネルギーとは式 (1) に示すように、掘削に要する総エネルギーを掘削体積で除したもので定義され、掘削に要する総エネルギーは、カッターフェイスを岩盤に押さえつけるスラスト系エネルギーとカッターフェイスを回転させる回転系エネルギーを加算したものである。掘削体積比エネルギーを採用する理由は、この値が大きければ掘進に対する抵抗が大きな硬岩地山であると推測され、軽装な支保パターンになる、という仮説が考えられることによる。たとえば過去の名村 ⁵⁾、森田 ⁷⁾ 等の研究からも、同変数と支保パターンの間には相関性があると報告されている。

$$\begin{aligned} \text{掘削体積比エネルギー (Et)} &= \text{総エネルギー (スラスト系 + 回転系)} / \text{掘削体積} \quad \cdots (1) \\ &= (F \cdot V \cdot S + T \cdot N \cdot S) / (A \cdot V \cdot S) \end{aligned}$$

ここで、F: スラスト推進力、V: 掘進速度、S: 掘削時間、T: トルク、N: 回転速度、A: 掘削断面積。

以上の検討から、本論文では機械データとして掘削体積比エネルギーを採用する。

(2) データ処理と解析方法

図-1 に掘削体積比エネルギーのデータ処理と解析方法の手順を示す。ここで、掘削体積比エネルギーに移動平均を施して平滑化した理由は、値の変動が相当に大きいことによる。これは、局所的に存在する硬・軟岩に遭遇したり、電力系統の過負荷変動の影響が大きいものと推定されるが、これらはトンネルの構造的安定性の面からの影響としては小さい。したがってその地点の安定性に影響する範囲を前後 1D (D: 掘削径) として、中央値に 6 および両端値に 1 倍の重みを付けて生データを移動平均して平滑化した。次いで、支保パターンごとに掘削体積比エネルギーを適当に区分して、それぞれのヒストグラムを作成する。ここで物理的に異常な値、たとえば負の値や前述の理由等による極端に大きな値を規格外値としてデータから棄却した。最終的に、前述の手続きを経て得られたヒストグラムを適当な確率密度関数に近似させ、掘削体積比エネルギーと支保パターンの相関性を調べる。

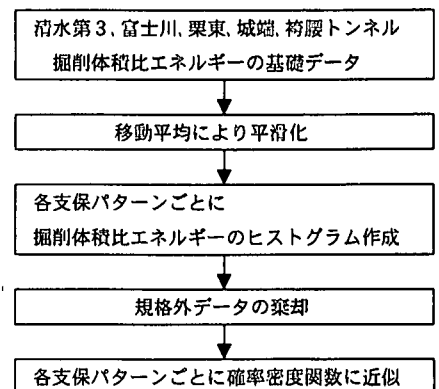


図-1 データ処理・解析方法の手順

3. 解析に用いたトンネルの概要（図－2 参照）

（1）清水第三トンネル

清水第三トンネルは、第二東名高速道路の清水 IC（仮称）の北約 6km の山地部に位置する延長 1.1km のトンネルである。導坑先進拡幅掘削工法が採用され、導坑にシールド型 TBM $\phi 5.0\text{m}$ が用いられた。TBM は下り線西坑口付近から掘削を開始し、東坑口手前で U ターンし、上り線の掘削に移行して西側坑口に到達した。本研究では、上下 2 本のトンネルに沿った約 1.7km 区間のデータを採用した。地質は、新第三紀中新世後期から鮮新世にかけて堆積した堆積岩類で構成され、砂岩と泥岩が主な岩盤である。西側の近くには第一級大断層の糸魚川－静岡構造線が走っており、大小の断層が多く分布している。このトンネルは、施工段階での地山調査より支保の設計変更が柔軟になされ支保パターンも 12 パターンに分けられたが、本研究では図－2 に示すように標準設計である 3 パターンにまとめて解析をおこなった。

（2）富士川トンネル

富士川トンネルは、第二東名高速道路の富士 IC（仮称）から清水 IC（仮称）間に位置し、富士川町から芝川町に抜ける延長 4.5km のトンネルである。本研究の対象としたのは、本坑より下方側の最大 76m に位置するずり搬出用トンネルで、延長 4,754m、シールド型 $\phi 3.5\text{m}$ TBM である。地質は、中央付近の入山断層帯を境に、西側に新世代第三紀の砂岩・礫岩系、東側に新世代第四期の安山岩系が多く存在している。第三期層では最大月進 564.9m を記録したが、入山断層帯では湧水や膨張性地山のため停滞を余儀なくされ、切り上げ作業など再掘進までに 1 ヶ月を要した。地山等級は良い方から（CⅠ、CⅡ、DⅠ）に分類されており、それに対する支保パターンは 4 パターンが設定されている。

（3）栗東トンネル

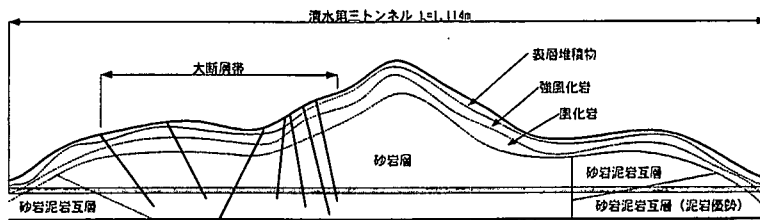
栗東トンネルは、第二東名高速道路の信楽 IC（仮称）から大津 JCT 間に位置する延長 3.8km のトンネルである。上り線では西坑口より導坑先進拡幅掘削工法が用いられ、オープン型 $\phi 5.0\text{m}$ TBM による先進導坑として 2.6km の区間が掘削された。地質は（B、C、D）の地山等級に分けられ、大部分は白亜紀後期の粗粒黒雲母花崗岩で占められている。支保パターンは図に示すように 4 パターンが設定されている。

（4）城端トンネル

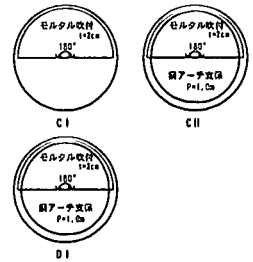
城端トンネルは、東海北陸自動車道の福光 IC の南方、富山県城端町から上平村に位置する延長 3.2km のトンネルである。本研究の対象としたのは、本坑に隣接して掘削された避難坑で、オープン型 $\phi 4.5\text{m}$ TBM が導入されている。地質は（B、CⅠ、CⅡ、D）という地山等級に分けられ、一部に新生代古第三期の流紋岩類を主体とした比較的良好な岩盤が分布し、この箇所では最大月進 548m を記録した。支保パターンは 4 パターン準備されたが、施工段階では図－2 に示した 3 パターンが使用されている。予想より地山が悪く、約半分の区間で D パターンが採用されている。

（5）袴腰トンネル

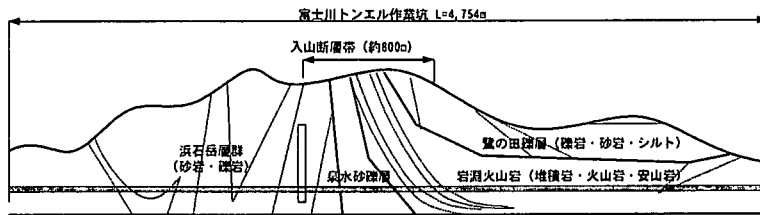
袴腰トンネルは、城端トンネルとほぼ同位置にある延長 6km のトンネルである。当トンネルも城端トンネルと同じく、オープン型 $\phi 4.5\text{m}$ TBM による避難坑として本坑と並行して掘削された。本研究ではこの避難坑掘削のうち約 2.5km の区間で解析を行った。地質は（B、CⅠ、CⅡ）という地山等級に分けられ、新生代古第三期の流紋岩類が主体である。また帯水や小断層も確認された。支保パターンは計画段階では 4 パターン準備されたが、施工段階では図に示した 2 パターンに限って使用され、地山が軟弱であったせいか鋼製支保工の設置が多く見られた。しかしパターン化した支保の施工により、平均月進 231m を記録している。



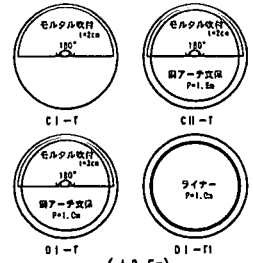
清水第三トンネル縦断面図と支保パターン



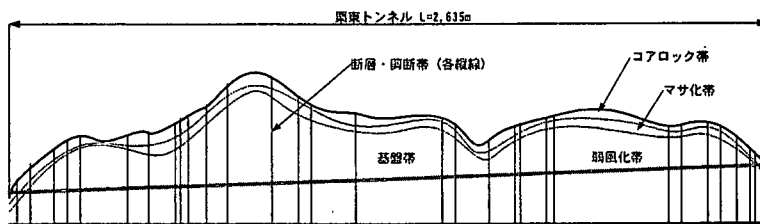
(φ 5.0m)



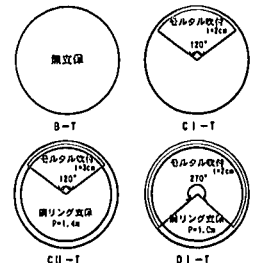
富士川トンネル縦断面図と支保パターン



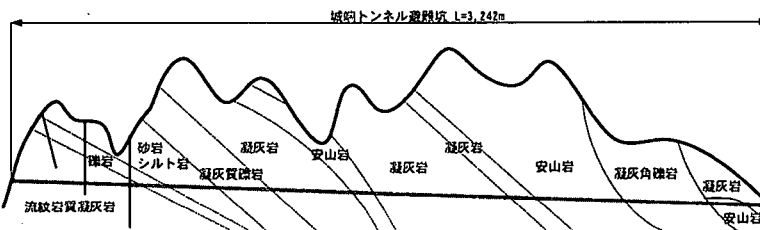
(φ 3.5m)



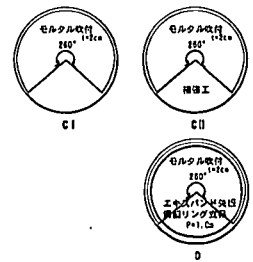
栗東トンネル縦断面図と支保パターン



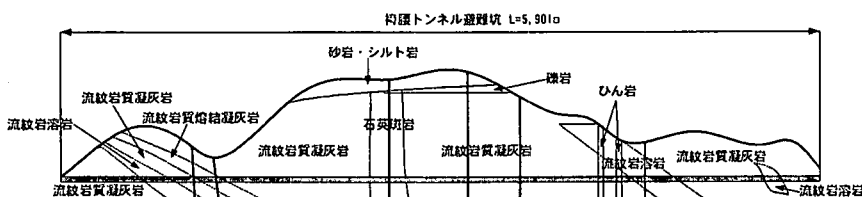
(φ 5.0m)



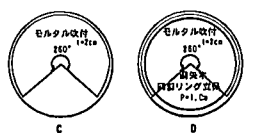
城端トンネル縦断面図と支保パターン



(φ 4.5m)



構腰トンネル縦断面図と支保パターン



(φ 4.5m)

図-2 解析対象 5 トンネルの縦断面図と支保パターン

4. 解析結果と考察

5 トンネルのデータを用いて得られたそれぞれの支保パターンに対する掘削体積比エネルギーのヒストグラムは、その殆どが正規分布の形状を示した。以上の解析結果を図-3に、また表-1にそれぞれの平均値と標準偏差を示す。そして以下に、掘削体積比エネルギーと支保パターンの相関性に関する5トンネルの特徴を示す。

清水第三トンネル：掘削体積比エネルギーと支保パターンの間には明確な相関性が認められる。微妙ではあるが、軽装な支保パターンCⅠ、CⅡになるほど、分布のピークの位置が掘削体積比エネルギーの大きな箇所になっていることが分かる。

富士川トンネル：清水第三トンネルと同様に相関性が確認できる。すなわち重装な支保パターンになるほど、分布のピークの位置が掘削体積比エネルギーの小さな箇所になっていることが明瞭である。

栗東トンネル：同じく、各支保パターンに相当する掘削体積比エネルギーの平均値が明瞭に分離していることから、相関性が明確に現れている。すなわち、CⅠ-T、B-Tと軽装な支保パターンになるほど、分布のピークの位置が掘削体積比エネルギーの大きな箇所になっている。

城端トンネル：各支保パターンの分布のピークがほぼ同じ箇所に集中しており、掘削体積比エネルギーと支保パターンの間には相関性は認められない。

袴腰トンネル：軽装な支保パターンCⅡの方が、分布のピークの位置が掘削体積比エネルギーの大きな箇所になっていることから相関性が認められるが、当トンネルの支保パターンは2種類と少ないことからやや結論し難い。

以上から、掘削体積比エネルギーと支保パターンの相関性をまとめると、城端トンネルを除いた4トンネルで相関性があることが確認できた。すなわち、支保パターンが軽装になるにしたがって、これは地山等級が良くなることを意味するが、分布のピークの位置が掘削体積比エネルギーの大きな箇所になっていくのが認められる。これは、“2(1)掘削体積比エネルギーの選択”で示した仮説が、ほぼ検証されたことを意味する。

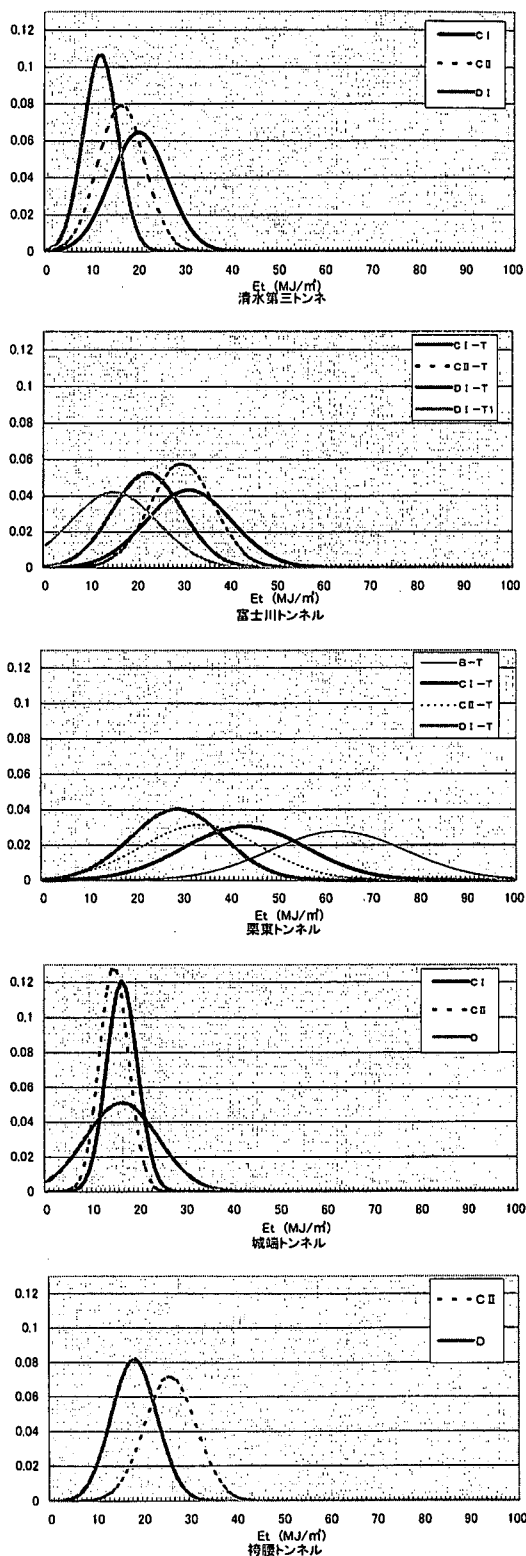


図-3 掘削体積比エネルギーと支保パターンの相関性

表-1 各トンネルにおける支保パターンと掘削体積比エネルギー

(平均値/標準偏差、単位: MJ/m³)

	支保 パターン		地 山 等 級					
			B	C		D		
				C I	C II	D	D I	D II
清水第三T		平均値 (標準偏差)		19.85 (6.15)	16.06 (5.03)		11.56 (3.72)	
富士川T	T	平均値 (標準偏差)		30.94 (9.20)	29.36 (6.89)		21.97 (7.57)	
	T1	平均値 (標準偏差)					14.73 (9.47)	
栗東T	T	平均値 (標準偏差)	62.45 (14.43)	42.86 (13.02)	33.69 (12.73)		28.47 (9.88)	
城端T		平均値 (標準偏差)		16.11 (3.30)	14.41 (3.09)	16.03 (7.79)		
袴腰T		平均値 (標準偏差)			25.49 (5.54)	17.77 (4.86)		

5. 掘削体積比エネルギーを用いた地山分類と支保パターン標準化のための課題

以上大略的に掘削体積比エネルギーと支保パターンの間に相関性があることは分かったが、一方、以下の問題が新たに明らかになった。

- ① 各トンネルとも、各支保パターンの掘削体積比エネルギーの正規分布曲線が相互に大きくラップしており、掘削体積比エネルギーによって厳密には支保パターンを決定しにくい。
- ② 支保パターン略称記号の頭部は各トンネルで評価した地山等級を意味しているが、表-1の地山等級と掘削体積比エネルギーの平均値を取り出し図-4を作成した。同図よりトンネルを横断的に見ると、地山等級が同等でも掘削体積比エネルギーおよび支保パターンが各トンネルでかなり異なっている。たとえば同じC I分類でも、掘削体積比エネルギーは16~43MJ/m³までの範囲を示している。この結果は、現時点では掘削体積比エネルギーによる標準地山分類、標準支保パターンを決めるのは困難なことを意味している。すなわち、当該現場ごとに試行錯誤しながら、掘削体積比エネルギー～地山等級～支保パターンを決めていくことが現時点では必要のようである。

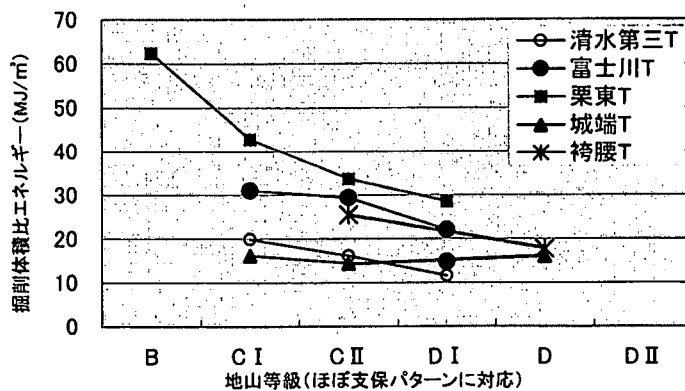


図-4 地山分類と掘削体積比エネルギー

以上の考察から、今後掘削体積比エネルギーを用いた地山分類と支保パターン標準化のためには、

- ・各トンネルの支保パターンごとの分布曲線がより明確に分離されていること、また
- ・掘削体積比エネルギーと地山分類がトンネル相互間でも同じ値をとること、

の条件が満たされねばならない。言い換えれば、TBMの特徴を考慮した地山分類と支保パターン（支保設計）

検討の必要性を示唆している。

たとえばその特徴の一つとして以下がある。一般のトンネルでは、切羽掘削の直後に支保が設置される。この場合の支保の機能は、変形を抑制することであり、またゆるみ領域を補強して剥離剥落を防止することである。一方、TBM の場合では、支保は(1-2)D 程度後方で施工されることになる。そして掘削するカッターフェイスの直径はシールド部の直径より大きいいため、すなわち弾性連続体地山での支保は変位が収束に近づいたところに設置されることから、シールド自体は地山変形を抑制する効果は小さい。したがってシールド型 TBM における支保の機能は、弾性地山における変形制御効果は僅少で、

- ① 崩壊性・剥落地山（凝集力不足）における崩落・剥落防止、および
- ② 弾塑性的挙動やレオロジー的後荷（膨張性、押出し性）が作用する地山での一時的大変形抑制、の目的ということになる。

従来の地山分類と標準支保パターンは、通常の 2 車線道路トンネルサイズでかつ切羽近傍で支保を設置する場合を想定している。しかしシールド型 TBM では、支保の機能も異なるし、トンネルの大きさも小さいことが多い。掘削体積比エネルギーを支保パターン選定の指標として一般化するには、前述したシールド型 TBM の固有の特徴を考慮し、地山分類と支保パターンを新たに定式化する必要性を示唆しているようである。たとえば、特に重要になるのは地山自体の凝集力であり後荷評価であるが、掘削体積比エネルギーのみではそれらを評価するのは難しいので、他の指標も考慮する必要がある。

6. まとめ

本論文では、計 5 つの TBM トンネル（清水第三・富士川・栗東・城端・袴腰）のデータを用いて、機械データすなわち掘削体積比エネルギーと支保パターンの相関性を調べ、掘削体積比エネルギーを用いた支保パターン選定方法の技術的可能性と標準化のための課題を検討した。研究成果を総括して以下に示す。

- ① 1(ないし 2)例を除いて、掘削体積比エネルギーと支保パターンの間には比較的良好な相関性が認められた。すなわち、硬岩になるほど掘削体積比エネルギーは大きくなると考えられるが、それに応じて軽装な支保パターンが選定されている傾向が明瞭に認められた。これは、TBM が掘進速度管理で制御されていたとしても、単位体積当りに要する掘削体積比エネルギーは、軟岩であれば小さく硬岩になるほど大きくなるものとして理解できる。したがって支保パターン選定（間接的には地山分類）のための指標としては、掘削体積比エネルギーの選択は適当といえる。
- ② ただし、個々のトンネルにおいては掘削体積比エネルギーと支保パターンの間に相関性は認められたが、トンネル相互に共通の掘削体積比エネルギーに相当する共通の支保パターンの一般的傾向はまったく表れていない。したがって現状では、各トンネルで試行錯誤的に、地山条件に対応しながら TBM の運転操作を習熟したり支保設計していかざるを得ないことを意味している。
- ③ 今後、掘削体積比エネルギーを地山分類ないし支保パターン選定のための一指標として、さらに手法として一般化標準化を図っていくためには、シールド型 TBM の特質に合せた、たとえば支保の機能と役割、また施工トラブル防止と事後対策法など、地山分類とそれに相当する支保パターンの標準化が必要となる。

日本の岩盤の複雑多様性を考えると、シールド型およびオープン型 TBM の改良とともに、今後ともその適用が増大すると予想される。現時点でも相当数のデータが集まりつつあり、TBM 機械データの掘削体積比エネルギーをシールド型 TBM 用の地山分類、支保パターン選定の一指標として標準化できるよう研究開発を進めていくことが期待される。

謝辞

最後に、多くのデータを提供いただきました富士川、清水第三、栗東、城端、袴腰各トンネルの関係者の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本浩之、猪狩哲夫、越野洋一、矢野寛：TBM 掘進データを用いた判別分析による定量的地山評価について、第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、岩の力学連合会、土木学会、pp. 491-496、1998 年 1 月
- 2) 福井勝則、大久保誠介：TBM の掘進抵抗を利用した岩盤物性の把握、トンネルと地下、第 28 巻 2 号、pp. 35-43、1997 年 2 月
- 3) 中村創、今岡彦三、山本松生、鈴木仁志：TBM 掘進データによる地山判定方法について、第 52 回年次学術講演会講演論文集Ⅲ、土木学会 pp. 106-107、平成 9 年 9 月
- 4) 城間博通、赤木渉、伊藤文雄、谷卓也：導坑掘削時の TBM 機械データを用いた掘削時の岩盤評価手法、第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会岩盤力学委員会 pp. 158-162、2000 年 1 月
- 5) 名村均、高道利光、今岡彦三、小林裕二：国内月進記録を達成した小断面 TBM の合理化施工、2001 トンネル技術の特別講演と技術研究発表会論文集、北海道土木技術会トンネル研究委員会、pp. 27-36、2001 年 2 月
- 6) Iwai, K., Akagi, W., Hamada, S. : A STUDY ON TBM MECHANICAL DATA ANALYSIS METHODS, 10th Road Engineering Association of Asia and Australasia Conference Tokyo 2000, Sept. 2000
- 7) 森田達夫、深尾延弘、高崎英邦、関伸也：TBM 掘削の機械データと支保工パターンに関する研究、第 55 回年次学術講演会講演概要集Ⅲ、土木学会、平成 12 年
- 8) Teale, R. : The concept of specific energy in rock drilling, International Journal of Rock Mechanics, Min., Sci., Vol. 2, pp. 57-73, 1965