

合理的なTBM掘削を目的としたリアルタイム地山評価システムの開発と適用結果

中山 隆義¹・溜渕 孝治²・篠原 茂³・安井 義則⁴・進士 正人⁵・中川 浩二⁶

¹正会員 株式会社奥村組 技術本部技術開発部 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

E-mail: oku05759@gm.okumuragumi.co.jp

²日本道路公団 四国支社建設部 (〒760-0065 高松市朝日町4-1-3)

³正会員 工修 株式会社奥村組 技術本部技術研究所 (〒300-2612 つくば市大砂387)

⁴正会員 株式会社奥村組 名古屋支店土木部 (〒453-8555 名古屋市中村区竹橋町29-8)

⁵正会員 学博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

⁶フェローメンバ 工博 山口大学教授 臨床トンネル工学研究所 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

TBM掘削時の機械データを用いて、地山特性をリアルタイムに評価し支保判定を行う手法については、これまでいくつかの研究がなされている。支保判定を行うための地山評価の更なる精度向上を目的として、筆者らは、TBMオペレータにTBM掘削時の注目指標に関するアンケートを実施した。そのアンケート結果に基づき、従来からよく利用されている機械データにずり高さと機械振動の測定結果を加えたファジィモデリング手法を考案し、それによりリアルタイムに地山特性を自動判定する評価システムを開発した。本システムを掘削径5mのTBM実工事に適用した結果、地質担当者による岩盤評価判定に対して本システムは88%の合致率を達成し、その実用性が確認できた。

Key Words : TBM support design, rock mass classification, fuzzy modeling

1. はじめに

国内においてTBM（全断面トンネル掘進機）による山岳トンネルの施工事例が増加している。TBM工法の最大の特長は、その急速施工性であり、近年の施工技術の改良に伴い、我が国においても最大月進700m以上平均月進300m以上の好結果を得た実績も報告されている¹⁾。その一方、数10mの破碎帯を突破するのに数ヶ月を要した事例もある²⁾。

TBMを使って効率よく地山を掘進するには、マシンの掘削能力を最大限に発揮させるように、地質の変化に合わせて、機械調整を絶えずかつきめ細かく行う必要がある。しかし、TBMの構造的欠点のひとつとして、掘削中に地山の変化を目視確認できないことが挙げられる。それに加えて、事前の地質調査ではTBM掘進が必要とする地質精度に比較してきわめて粗い精度でしか地質情報が得られない問題点もある。そのため、先進ボーリングやTSP(Tunnel Seismic Prediction)等の弾性波探査を用いてTBM施工中に切羽前方の地山を事前に探査する技術³⁾も掘進に併用されているが、一般的には地山性状を完全に事前把握するのはきわめて困難である。

一方、通常のNATMでは、切羽観察や現場計測

により、支保部材の変更や補助工法の選定を切羽状況に即応し実施している。TBM施工においても、その急速施工性から通常のNATM以上に、最適な支保部材の選定などを合理的にかつ早期に選定し、地山の変化に対応することが重要である。そのため、TBM掘進中の機械データ（以下、「機械データ」と称す）などから地山状態をリアルタイムに評価するシステムの確立は、今後のトンネル施工にTBMの高速掘進性を活用するために最も必要とされている研究課題のひとつである。

本研究では、まず機械データによるTBM施工時の地山評価法の現状を総括し、筆者らが新たに提案するTBMオペレータの感性を組み込んだファジィモデリングに基づくリアルタイム地山評価システム開発の経緯と判定指標（データ）の採用理由を明らかにする。そして、実施工で本システムを適用し、その実用性を評価した結果について述べる。

2. 従来の地山判定方法と問題点の抽出

TBM掘削では、TBMの機長分は坑壁を観察することはできないという問題を内包している。従つ

表-1 従来の評価方法とその指標

提案者 判定指標	福井	Sanio	コマツ	Gong
スラストジャッキ推力	○	○	○	○
カッタヘッドトルク	○	○	○	○
カッタ切込み量	○	○	○	○
カッタ取付間隔		○		○
ローラーカッタ直径		○		○

て、機械データを利用した適正な支保の予測が極めて重要であり、その目的のために種々の研究が行われている段階である^{④~⑧)}。以下、代表的な地山評価の方法とその問題点を整理する。

(1) 従来の判定方法と指標

TBM施工のための従来の代表的な地山評価方法の提案者と、判定に用いる様々な指標の一覧を表-1に示す。表から明らかなように、これらの評価方法のどれも、スラストジャッキ総推力（以下「推力」と称す）、カッタヘッドトルク（以下「トルク」と称す）、カッタ切込み量（掘進速度）に着目している。

例えば、福井は、ローラーカッタを用いた掘削試験結果を使って、TBMの推力 F_f 、トルク T_f と一軸圧縮強度に関して以下の式を提案している^{⑥)}。

$$F_f = C_1 * \sigma_c * P_e \quad (1)$$

$$T_f = C_2 * \sigma_c * P_e^{1.5} \quad (2)$$

ここで、 C_1 、 C_2 は、岩盤強度とTBMの諸元に依存する係数である。

Sanioは、ローラーカッタの切削抵抗に関する理論解析により以下の式を提案している^{⑦)}。

$$F = S_k \cdot \tan \frac{\phi}{2} \cdot D^{\frac{1}{2}} \cdot P_e^{\frac{1}{2}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$T = \frac{4}{5} \cdot S_k \cdot \tan \frac{\phi}{2} \cdot P_e \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここで、 S_k は、岩盤強度を表す係数である。

また、Gongは、岩石の切削試験から、以下の式を提案している^{⑧)}。

$$F = K_d \cdot \tan \frac{\phi}{2} \cdot D^{\frac{1}{2}} \cdot P_e^{\frac{1}{2}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$T = K_s \cdot \tan \frac{\phi}{2} \cdot P_e \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

ここで、

$$K_d = 0.045 \cdot E^{0.27} \cdot \sigma_c^{0.28} \quad (7)$$

$$K_s = 0.029 \cdot E^{0.27} \cdot \sigma_c^{0.37} \quad (8)$$

式(1)～(8)において、それぞれの記号は以下の諸量を表している。

F_f ：掘削中の推力、 T_f ：掘削中のトルク

F ：カッタの推力（背分力）

T ：カッタの移動方向力（カッタ主分力）

P_e ：カッタ切込み量、 ϕ ：カッタ刃先角度

D ：カッタ直径、 S ：カッタ取り付け間隔

σ_c ：岩石の一軸圧縮強度

E ：岩石の弾性係数

また、コマツは、自社の製造するTBMそれぞれの機種と地質に対応した独自の岩盤強度推定式を提案している^{⑨)}。

岩盤強度の算出に用いるカッタ切込み量、推力、トルク値などがTBMの管理データとして常時計測されているので、これらの提案式を用いると岩盤と個々のTBMに依存する係数が算出できるため機種に対応した施工管理が可能となる。しかし、岩質やTBMの仕様によって地山状態を表す係数は異なり、その上事前に係数を決めるることは難しく、TBM掘進がある程度進まないと係数が決められない問題点も有している。

また、これらの方法による評価結果はどのトンネルにもあてはまるものではなく、その地点の地質やTBMの仕様（TBMの型式、掘削径、カッタ径、カッタの配置等）により判定ルールを補正することが必要となる。さらに、得られる結果は基本的に地山の一軸圧縮強度であり、岩盤亀裂の発達状況判定を考慮した支保判定としてはそのまま用いることができない。

(2) より的確な地山評価を行うための着目点の抽出

表-1に示すように、TBM運転に関わる機械データとしては、カッタ切込み量、推力、トルクの他、カッタヘッド回転速度などが一般によく計測されている。従って、これらの値を地山状態に応じて調整し、最適掘進性能を発揮させることができるとTBMを安定して高速掘進させるポイントとなる。言い換えれば、機械データは、切羽の地質状態を表すものであり、地山評価を行う上で重要な要素となる。特に、セグメントやライナー類をTBMに併用し施工する場合は、坑壁観察する時間がほとんどないため、基本的に機械データが地山評価するための重要な指標となる。

しかし、TBMのオペレータは、これら機械データはもちろんあるが、オペレータの五感に感じる機械データ以外のすべての情報をも活用してマ

表-2 TBMオペレータが注目する指標と操作

TBM オペレータの注目指標		トンネル名				
		A	B	C	D	E
注 目 指 標	推力の変化	◎	◎	○	◎	○
	トルクの変化	○	○	○	○	○
	ずりの形状（大・小）	◎	◎	◎	◎	○
	ずりの量	○	○	○		
	TBM の振動	○	○			
操作	掘削速度（切込量）の調整	◎	◎	◎	◎	◎
	カッタヘッド回転数の調整	○	○		○	○

(◎：特に注目、○：注目)

シンを操作していると思われる。そこで、実際の施工において、オペレータが掘削中に何を観察・着目しかつ地山のどんな状態を評価し、TBM を操作しているかについて 5 現場に聞き取り調査を実施した。オペレータの注目指標を、表-2 に示す。オペレータは、表に示したこれらの指標の変化を絶えず観察しながら、(i) 掘削速度の調整操作（カッタ切込み量の調整による負荷の適正化すなわち推力の調整）や、(ii) カッタヘッド回転速度の調整（掘削ずりの取り込み量の調整による崩壊性地山での切羽崩壊防止や搬出用ベルコンのトラブル防止）を行っていることが明らかになった。

オペレータの着目点に関する聞き取り調査の結果を取りまとめると以下のようになる。

- ①地山の強度変化を主に TBM の推力とトルクの変化で感じとっている。
- ②地山の亀裂の発達状態や崩壊性・崩落性の程度をコンベア上のずりの大きさで判断し、①に示した推力とトルクの変化も合わせて、ずりの形状（大・小）から地山の特性を総合的に判断している。
- ③掘削ずりの量により切羽の崩壊や TBM カッタヘッド開口部の閉塞程度を予想している。
- ④TBM 機体の振動の大小により地山の強度変化と亀裂の発達状態を補助的に判断している。

これらを踏まえて、筆者らは、切羽の地山評価指標として、従来の方法で用いられている推力、トルク、カッタ切込み量に加えて、これまで評価指標として重要視されていなかった掘削ずりの形状（大・小）、TBM 機体振動に特に注目した。その上で、これらの指標を評価指標として組み込んだ地山評価システムを新たに開発することとし、それらの指標と施工結果との関係を整理した。

3. TBM掘削時の機械データと施工結果との関連性の検討

(1) 推力とカッタ切込み量

TBM の推力 F_x は、掘削に要する純スラスト推力に加えて、スキンプレートと地山間の摩擦抵抗と地山による拘束力、並びに後続台車の牽引力の合力である。そのため、地山を TBM で掘削する際には、これらの要素を考慮する必要がある。また、式(1)にも示されるように、推力 F_x は同一地山掘削時でも掘進速度（カッタ切込み量）の変化により増減する。そのため、カッタ切込み量との関連も合わせて考慮することが重要である。

(2) トルク

TBM のトルクは、カッタヘッドが回転する際の回転モーメントの総和である。従って、トルクはカッタヘッドの回転に対する地山の抵抗モーメントを表している。一般に、トルクは、推力のように他の抵抗要素の影響を受けることが少ないと言われており、トルクが切羽の自立性や強度の判定指標として有効な指標とされている²⁾。例えば、切羽の自立性が乏しい場合や、強度が低い時、トルクは低下する。これは、カッタが岩盤を切削するときの抵抗力が小さいためと考えられる。

(3) 掘削ずり高さ（ずり径）

通常、TBM の掘削ずりは、カッタヘッドにより破碎され、ベルトコンベヤ上に積み重なった状態で搬出される。その状態は、地山の亀裂状態や岩種によりその形状が異なる傾向がある。すなわち、比較的硬質で亀裂の少ない良好な岩盤では、ずりは安定的に発生し、カッタ刃先部で生じる粉碎された岩片とカッタ間で生じた剥離岩片が混じった状態を呈し、より扁平なずり形状となる。そのた

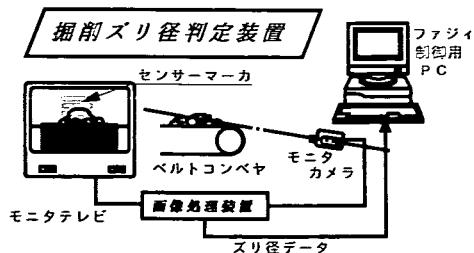


図-1 システムの概要

め、ベルトコンベヤ上のずりの堆積高さは低くなる傾向がある。一方、地山の弱層部に比較的硬い岩塊が点在している場合や、地層の変わり目で亀裂が発達し、岩盤が大塊のまま崩落しやすい状態では、ずりの発生は不連続になり、また形状は、TBMのカッタによって破碎されずに、大きな岩塊のままでベルトコンベヤ上に乗った状態となる。この場合、ずり高さは高く測定される場合が多く、岩片の大きさは、地山の亀裂の発達状態によって異なるが、10cmから数10cmの大きさになることもある。風化の進んだ地山では細粒分が増加し、剥離岩片は減少する。

これらの破碎特性を考慮することで地山の状況をある程度把握することができる。表-2にまとめたアンケートからも分かるようにTBMオペレータは、掘削ずりに含まれる岩片のサイズ、ずり量に常に注目しており、岩片のサイズが大きくなると地山の崩落性が高くなったと判断し、掘削速度を低減する等の処置をしている。これは、ベルトコンベヤで搬送されるずりの性状が切羽岩盤の状態を判断する上で重要な指標となり得ることを示唆している。

この考え方を掘削システムに取り入れるために、ベルトコンベヤで搬送中の掘削ずりの搬送状況をカメラで撮影し画像処理することにより、ずりの高さからオペレータが地山の崩落性の目安としているずり径100mm以上の礫の発生数（以下、「発生大塊数」と呼ぶ。）を定量化するシステムを新たに考案した⁹⁾。図-1に計測システムの概要を示す。図-2に、支保形式毎に分類した掘進長1m当たりの大塊の発生個数とその個数毎における総掘進距離(m)を示す。図中、リング支保とは、H-100の鋼製支保であり、記号「@0.5」および「@1.0」のは、リング支保の設置間隔が0.5mならびに1.0mであることを意味している。また、「ファイコン吹付」とは、ファイバーモルタル吹付け(厚さt=2cm、上半240度施工)を表す。図から明らかかなように、支保が重くなるにつれて大塊の発生を多数伴う掘進

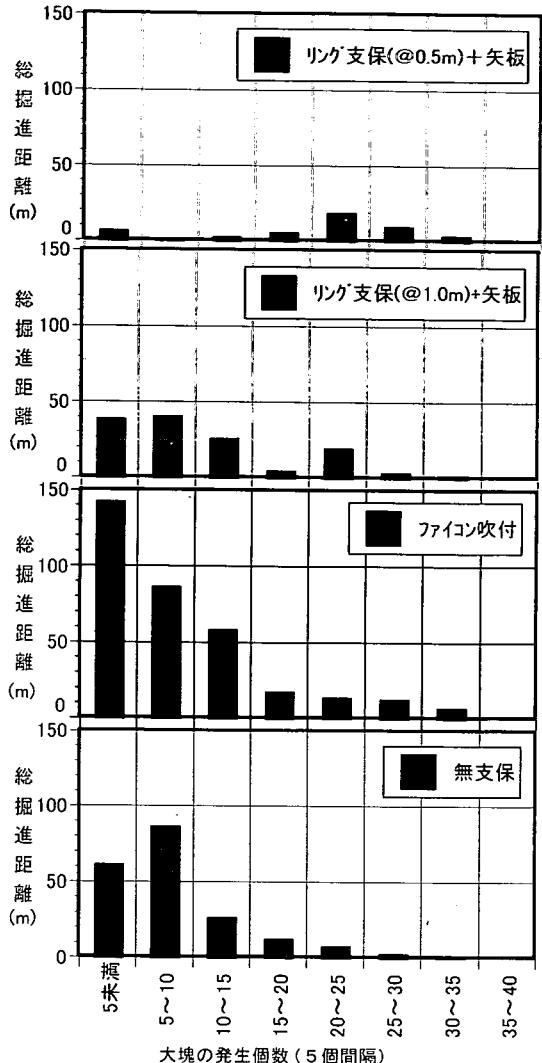


図-2 掘進長1m毎の大塊(100mm以上)の発生個数と総掘進距離(m)

の割合が多くなることが読み取れ、重い支保を必要とする崩壊性の地山においては、大塊が数多くベルトコンベヤ(幅600mm)で搬出されていることがわかる。図-3に、無支保とリング支保@0.5mそれぞれの施工支保パターン毎における回転トルクと大塊の発生数との関係を示す。この図からも明らかのように、無支保区間では、回転トルクは大きいが、大塊の発生は比較的少ない。その一方、リング支保を0.5mピッチで施工している箇所では、回転トルクは小さいものの、発生大塊数は多い事例が多数あることがわかる。これは、破碎性を有する岩盤において、岩盤掘削は、岩盤をカッタで破碎するのではなく、カッタで岩盤を打撃するなどにより、亀裂に沿って岩塊が剥離するため、カッ

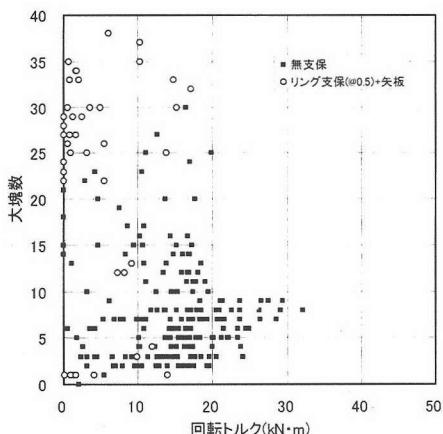


図-3 トルクと大塊の発生数との関係

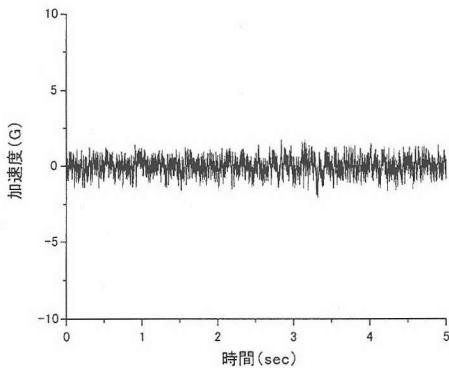


図-5 安定地山掘削時の振動波形

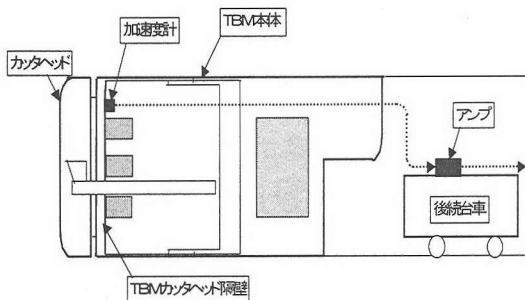


図-4 振動測定の概要

タヘッドの回転負荷が小さくなると考えられ、(2)で述べた切羽での岩盤状態と回転トルクに関する考察が裏付けられる結果となった。

(4) TBM の機械振動

表-2 のアンケートに示すように、A, B トンネルのオペレータは、TBM の機体振動も体感しながら切羽状態を評価しているようである。このことに着目して、自立性の良い地山（亀裂の少ない安定した状態）と悪い地山（亀裂が発達して大塊が崩落する状態）における TBM 掘削時の機械振動を実際に測定し、著者の一人が提案する切羽安定評価方法¹⁰⁾の適用性を検討した。振動測定には圧電型加速度計を用い、図-4 に示すようにカッタヘッド隔壁に固定し、後続台車に取り付けた直流アンプで増幅した後、データレコーダーに波形を収録した。

切羽が自立性の良い地山であれば、カッタと地山との接触状態は常にほぼ同じ状況である。そのため、硬岩部では振幅そのものは大きくなるが振動の変動は少ないと考えられる。それに対して、自

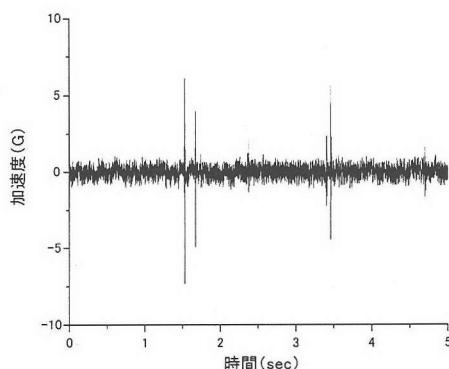


図-6 不安定地山掘削時の振動波形

立性の悪い地山では、岩盤をカッタで打撃したり岩塊がカッタと地山との間に噛み込まれて二次破碎される。この時、通常の岩盤の切削時よりも大きな振動が発生するため全体として振幅の変化が激しくなることが予想される。このような機械振動の変化を表す指標として、「振動指数」を新たに考案した。すなわち、振動指数とは、TBM の機械振動を 1 分間測定し、その加速度波形を 60 等分し、得られた 1 秒毎の加速度の最大値の変動係数（1 秒毎の加速度の最大値 60 データの標準偏差／同 60 データの平均値 × 100）である。

測定の結果、自立性の良い地山では、図-5 に示すように全体として加速度の大きさそのものは大きいものの変動は小さい波形が得られた。この時の振動指数は 18 であり、支保パターンは無支保であった。一方、切羽が掘削時点ですでに崩落を起こし始めているような自立性の悪い地山では図-6 に示すように加速度の大きさそのものは小さいものの、所々に岩石の二次破碎で生じる大きな加速度が発生している波形が得られた。この時の振動指数は 80 であり、支保パターンは 0.5 m ピッチでリング支保工 + 矢板を施工（支保を最も重く）

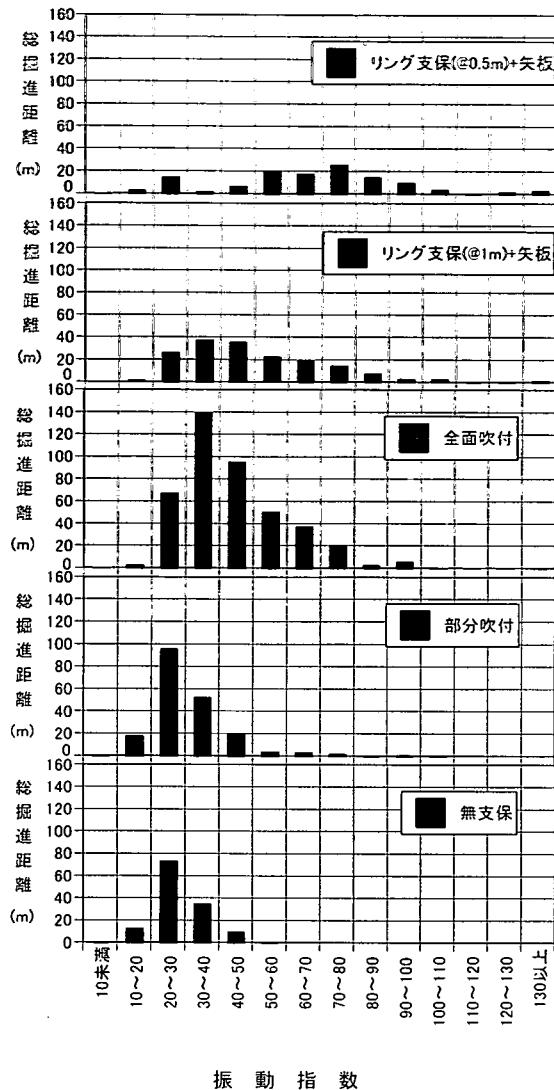


図-7 掘進長 1 m 毎の振動指数とそれに対する総掘進距離の頻度分布

している。

図-7 に、実績支保パターンに対応した、掘進長 1 m 毎の振動指数とそれに対する総掘進距離の頻度分布を示す。図から明らかのように、無支保の地山では振動指数が小さく、支保が重くなるほど、ばらつきは大きくなると共に振動指数も大きくなっている。このように、掘削中の機械振動の測定結果は、振動指数を新たにモデルに導入することによって、地山の安定性や支保量を表現する指標として有効である可能性を示すことができた。

4. ファジィモデリングによる TBM 地山評価法の開発

(1) 開発方針

実際の現場における TBM の支保判定では、通常発注者と施工者側の地質担当者が TBM テール部に出た坑壁を観察することにより行っている。しかし、この判定には以下の問題点が考えられる。

①TBM の機長分は坑壁の観察ができないため、観察者は、テール部に出現した坑壁を観察し直ちに地山評価を行うことを要求され、地山の急激な変化への対応が難しい。

②TBM の進行が速いため、地山の変化時に、発注者と施工者側の地質担当者が常時立会するのは現実的には不可能である。

これらの問題点のため、結果的に TBM 掘進で採用される支保が過大や過小となり、安全性や経済性の問題発生の要因となっている。

これらの問題を解決するために、筆者らは、下記を開発方針とした。

①ファジィモデル¹¹⁾により機械データから発注者と地質担当者による地山評価結果を推定する地山自動判定システムを開発する。

②ファジィモデルの判定ルールには、機械データに加え、ずり高さ、機械振動などの TBM オペレータが特に注目している指標も組み込む。

③地山性状の変化が激しく、判定ルールの修正が必要と判断される場合には、修正の指示を行うだけでファジィモデル化手法により自動的にルールを修正し、当該地山に適合するようにモデルを再構築することができるようとする。

このようにルールを構築・修正することにより、地山の状況をリアルタイムに判定し、支保の早期選定が可能となるモデルとした。

なお、ここで用いる指標はすべて切羽位置におけるものである。切羽における地山は、TBM マシン通過までの時間が経つにつれ地山の緩みなどを含んだ状態でマシン通過後のテール部において評価される。本システムにおいては、切羽におけるデータからファジィ学習を行うことによりテール部通過時における地山状況が判断できるものと考えた。

(2) ファジィモデリングによる地山評価システム

既往の理論やオペレータのヒヤリングをもとに検討した結果、掘削時の地山特性を的確に反映するための指標として推力、トルク、カッタ切込み

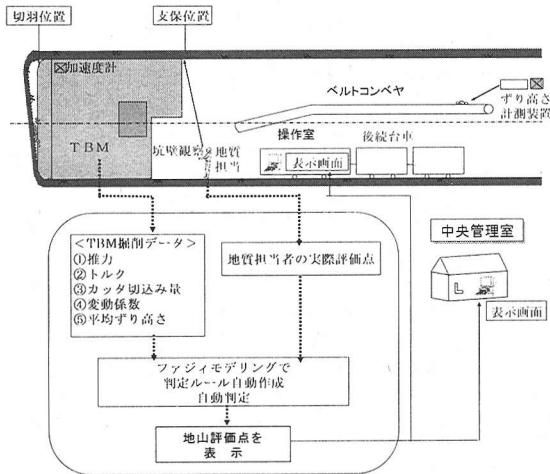


図-8 地山評価システムの概要

量、機械振動の振動指数、ずり高さの5個の指標を学習パラメータとして設定した。これらの機械データと地質担当者による岩盤（評価点）判定結果より、

if 「機械データ」 then 「岩級区分」型のルール表示によるファジィモデル¹¹⁾を作成した。

ファジィモデルは複数個のルールと機械データや岩級区分を表すメンバーシップ関数から構成されている。こうして、学習により、あらかじめ設定したモデル評価法（平均平方誤差法、平均相対誤差法等）を用いて入力データの岩盤判定結果（地質担当者が採点した地山評価点）に最も適合する判定ルールを作成することができる。

具体的には、工事の初期段階において、以下の手順でファジィモデルの学習を行い、判定ルールを作成した。

- ①初期ファジィモデルを従来の経験に基づいて作成する。
- ②現場の地質担当者の地山評価結果とファジィモデルによる評価結果を比較する。
- ③評価結果にずれがある、あるいは、ずれが生じ始めたと判断された場合は（合致率が低い時は）、再度学習を行い、ファジィモデルを再構築し、合致率の高い判定ルールを即座に作成する。

(3) システムの概要

本研究で開発したシステムの概要を図-8に示す。TBMの機械データは、リアルタイムにTBM中央管理室のパソコンモニターに送られ、ファジィ

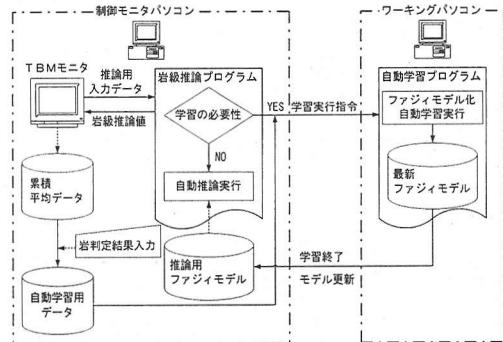


図-9 ファジィモデリング岩級判定システム

モデルを使って、地山評価（地山等級）を自動的に推論し表示、リアルタイムで地山等級を判定する。また、判定結果に対して技術者が不適合と評価する場合は、判定モデルを即座に調整し最適な判定モデルを再構築することができる。

本システムで用いたファジィモデルは、以下の2つのサブプログラムから構成されている。図-9にモデルの構成概要を示す。

①地山評価推論サブプログラム

TBM掘進中にTBM制御モニタパソコンから送信されるファジィ推論に必要な（ストローク長10mm毎の）入力データに基づき、自動推論を実行し、推論結果をTBMモニタに地山評価点として表示する。

②自動学習サブプログラム

ワーキングパソコンを用いて、学習データの作成や、学習パラメータの設定を行う。学習上必要なデータ（判定指標の累積平均データ、地質担当者の地山評価結果）を自動学習サブプログラムへ送信し、学習を実行する。学習終了時に、出来上がった最新ファジィモデルを地山評価推論サブプログラムへ送信し、推論用ファジィモデルを自動的に更新する。

(4) システムの運用

地山評価を定量的に行うために、日本道路公団の新切羽評価点法^{12), 13)}を用いた。新切羽評価点法は、切羽観察データシートに対応し、岩石グループ別に定められた配点により、観察項目（圧縮強度、風化変質、割れ目の間隔、割れ目の状態）の評価区分値に該当する点数を足し合わせた上で、湧水量と劣化の評価区分の組み合わせにより得られる湧水調整点を評価値から減点するなどし、地

山評価点を算出する方法である。この方法は、掘削中の地山の変化が数量的に評価できるため山岳トンネルでは支保判定の基礎資料としてよく採用されている。

図-8に示すように、地質担当者の地山評価は、切羽よりTBMの機長分（掘削径5m、シールド型TBMで約10m）後方での評価結果となる。本研究においては、坑壁観察による地山評価点（以下実評価点と称す）をカッターヘッドがその地点を通過する時の機械データからファジィ学習により修正し、算出できるようにし、それを地山評価点とした。その結果、以下に示すような利用が可能となった。

- ①坑壁観察と機械データに基づく地山評価点を比較することによる掘進方法の見直しや支保量の早期判定と支保材料の準備
- ②判定ルールの整合性が容易に判断できることを利用したより合致率が高いルールへの簡便な更新

それに加えて、このシステムは、前述の通り、地質担当者の判定結果を「正解」として、その手法（ルール）に近づくように、モデリングを行う。そのため、各トンネルのローカルな地山条件に即した判定（例えば、地質担当者が別の評価点法を用いて採点すれば、その採点法に合致するルールを作成し、判定を行うことになる）を実現できる利点がある。

5. 実工事における地山評価システムの試行

実工事（掘削径5m、シールド型TBM）の坑口より800m地点から本システムを適用した。適用に当たっては、地質担当者が坑壁等を細かく観察し、新切羽評価点法を用いて実評価点を算出した。そして、機械データからファジィモデルを構築して地山評価点を推論した。これらの結果を比較し、システムの適合性を検討した。

適合性の評価を行うために、両者の合致条件を明確にする必要がある。新切羽評価点法では、支保選定の目安として15～20点の幅を許容している。そこで、判定結果の合致程度は地質担当者の実評価点に対して本システムによる評価点が±10点の範囲内の場合は合致と評価した。すなわち、10箇所の判定結果の内、9箇所が±10点以内の場合は合致率を90%とした。

(1) 各判定指標と実評価点との関係

TBM掘進に伴う推力、カッタ切込み量、トルク、

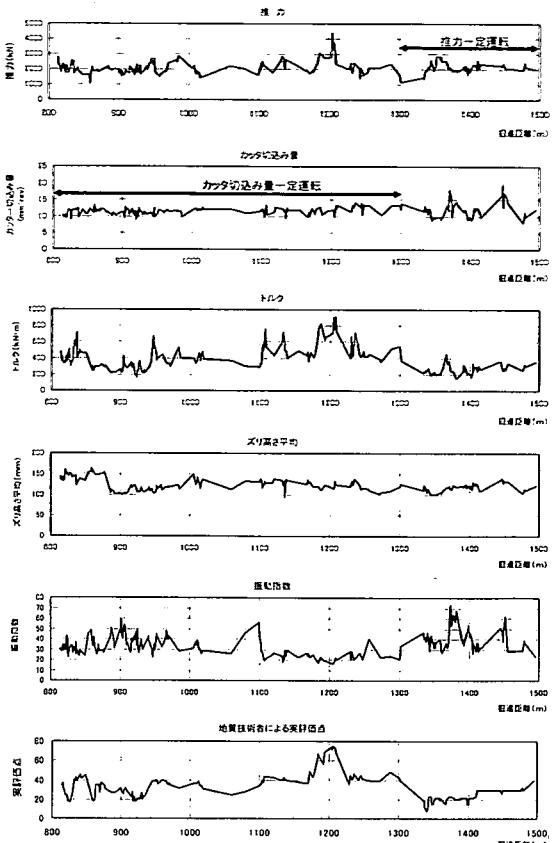


図-10 各判定指標、地質担当者による実評価点と掘進距離

ずり高さ及び振動指数の各データと実評価点の掘進距離における変化を図-10に示す。この図において、推力とカッタ切込み量は、オペレータが操作できるものであり、図中の矢印の範囲で示すとおり今回の掘進では、800m～1300m区間はカッタ切込み量を一定、すなわち速度一定運転を実施した。また1300m～1500m区間は、推力をほぼ一定として掘進を行った。

800m～1300m区間は、推力、トルクの推移が実評価点の推移の傾向と比較的良く一致している。これは、現場における地質担当者による実評価点を真の値（正解）として扱うとして、カッタ切り込み量を一定とした場合に推力及びトルクが地山状態に対応して変化するためと考えられる。それに対し、1300m～1500m区間は、推力を一定として、カッタ切込み量を変化させているが、実評価点の推移とトルク、推力の推移の傾向は一致していない。このことより、推力、トルクを組み合わせて地山状態を判定するには、掘削速度を一定とする

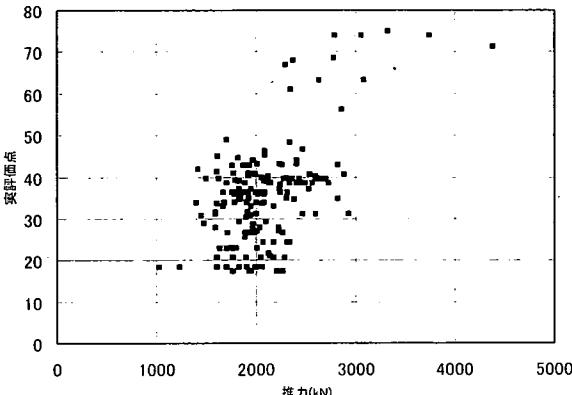


図-11 推力と実評価点との関係
(カッタ切込み量一定運転区間)

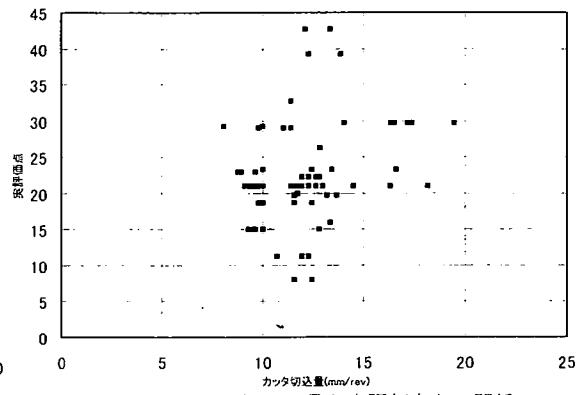


図-12 カッタ切込み量と実評価点との関係
(推力一定運転区間)

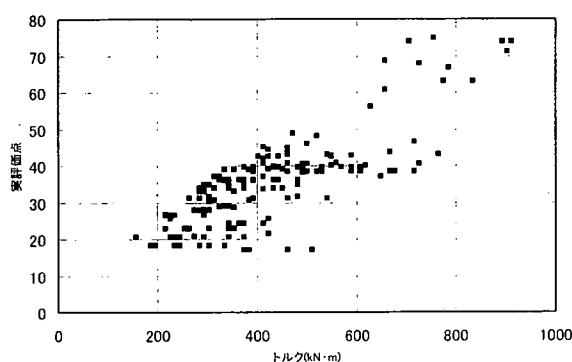


図-13 トルクと実評価点との関係
(カッタ切込み量一定運転区間)

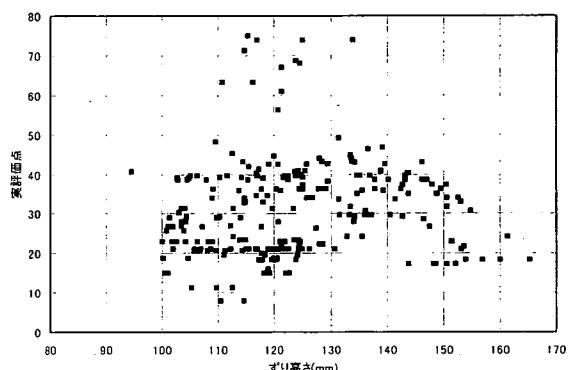


図-14 ずり高さと実評価点との関係

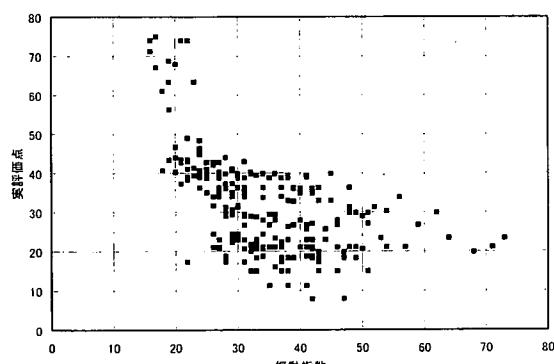


図-15 振動係数と実評価点との関係

ことが有効である。しかし、実際の施工においては、表-2に示すように地山状況に応じて速度を変化させることは必須な操作であり、速度の変化をも組み込んだ判定手法が必要となる。なお、今回の適用にあたっては、カッタヘッド回転数は一定として運転を行っている。

各判定指標と実評価点との相関に関して、図-11から図-15にまとめて示す。これらの図か

ら以下のことが明らかになる。

①推力と実評価点（カッタ切り込み量一定運転区間）

図-11に、その関係を示す。推力と実評価点には弱い相関が認められる。また、1000kN以下 のデータは存在せず、推力には、掘削に要するスラスト力以外のオーバーヘッドがある程度必要となることがわかる。

②カッタ切り込み量と実評価点（推力一定運転区間）

図-12に、その関係を示す。両者の相関はほとんど見られない。すなわち、オペレータの操作による掘削速度（カッタ切り込み量）の変化では、直接的に実評価点との関係が小さいことがわかる。しかし、カッタ切込み量の変化は、推力、トルクと合わせて重要な機械データであるとともに、オペレータの個人差（技能差）を表現するデータとして重要と判断しているためモデルに組み入れることとした。

③トルクと実評価点（カッタ切り込み量一定運転区間）

図-13に、その関係を示す。トルクと実評価点

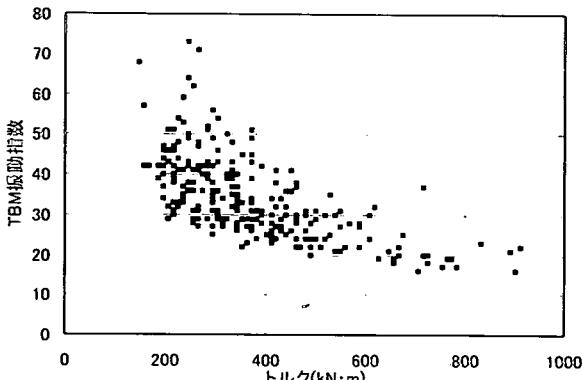


図-16 トルクと振動指標との関係

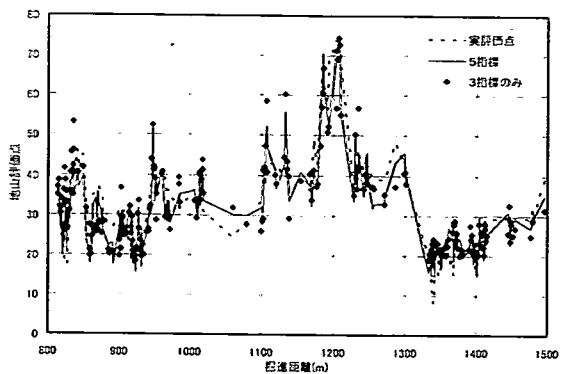


図-17 最適指標(5指標)と従来指標(3指標)の評価結果と実評価点の縦断面分布

表-3 判定指標の組み合わせと合致率の変化

判定指標数	メンバーシップの数					学習回数	合致率	採用
	総推力	トルク	カッタ切込み量	ずり高さ	振動指標			
Case1 Case2 Case3 Case4 Case5	5	-	-	-	-	100	66.9%	
	-	5	-	-	-		83.9%	
	-	-	5	-	-		61.6%	
	-	-	-	5	-		65.3%	
	-	-	-	-	5		73.1%	
Case6 Case7 Case8 Case9 Case10 Case11 Case12 Case13 Case14 Case15 Case16 Case17	3	5	5	5	-	100	88.4%	
	3	3	5	5	5		95.0%	○
	3	5	3	5	5		91.7%	
	3	5	5	3	5		91.3%	
	3	5	5	5	3		94.2%	
	5	3	3	5	5		94.2%	
	5	3	5	3	5		92.1%	
	5	3	5	5	3		92.6%	
	5	5	3	3	5		90.9%	
	5	5	3	5	3		93.8%	
	5	5	5	3	3		91.7%	
	5	5	5	5	5		93.0%	

*合致率は地質評価者とファジィモデルによる評価点が同程度 ($\pm 10\%$)

は良い相関を示している。従って、トルクの変化からある程度地山の状態が推察できることがわかる。

④ ずり高さと実評価点

図-14に、その関係を示す。ずり高さは、実評価点に関わらず 100mm 以上に分布することがわかる。

⑤ TBM 振動指標と実評価点

図-15に、その関係を示す。合わせて、トルクと振動指標との関係を図-16に示す。これらには、明快に負の相関が認められる。従って、振動指標をファジィモデルに組み入れることにより地山評価点の判定精度向上に寄与できると考えられる。

(2) 判定指標とメンバーシップ関数分割数の組み合わせによる最適評価モデルの選定

地山評価に用いる指標の組み合わせとそれぞれの指標の分割数を変化させ、地山評価に最適なファジィモデルを選定するための組み合わせを検討した。なお、学習回数はそれぞれ 100 回とした。表-3 に、単独あるいは個々の指標を組み合わせて推定した地山評価点と地質担当者による実評価点の合致率の一覧を示す。まず、Case1 ~ 5 は、各指標を単独で採用した場合の合致率である。表から明らかのように、合致率は、高い順にトルク、振動指標、推力、ずり高さ、カッタ切込み量となる。最も合致率が高いトルクの場合、単独指標においても約 84% の合致率であり、その有効性が示される。更に、Case6 に示すとおり、従来指標である推力、トルク、切込み量の 3 指標を同時に用いる場合の合致率は、約 88% に向上する。

Case7 ~ 17 は、5 指標すべてを用いた場合の検討結果である。表によると、どの組み合わせを採用しても 90% 以上の合致率となるが、評価点の組み合わせの中で、最も合致率の高いものは、カッタ切込み量、ずり高さ、振動指標のメンバーシップ関数を 5 分割、推力とトルクを 3 分割としたモデルの場合 (Case7) であり、その合致率は 95.0% である。一般に、分割数を多くする方がその項目の感度を強く評価することになり、今回新たに評価に加えたずり高さ並びに振動指標の分割数を多くした方がより合致率が向上していることは、今回の指標としての採用が効果的であったことを意味している。この組み合わせで学習したファジィモデルによる学習結果を図-17 に示す。参考までに、従来の岩盤強度の判定^{6,7)}にしばしば用いられている推力、トルク、カッタ切込み量の 3 指標のみで学習したファジィモデルの結果 Case6 も同

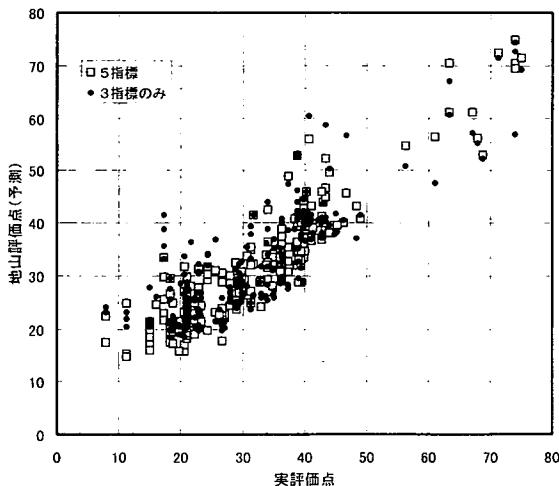


図-18 最適指標と従来指標の組合せと実評価点との比較

図に併せて示す。図からみられるように、3指標で学習したファジィモデルは、過敏に反応し、5指標を用いた方がよく実評価点の変化に追従していることがわかる。

5指標を採用することで、合致率が向上したのには以下の要因が考えられる

- ①単一指標によるファジィモデルから得られた地山評価点と実評価点の相違を他の指標が補い、より合致率の高いモデルが構築できた。
- ②推力やトルクの値は掘削速度の影響を受けるが、カッタ切込み量を用いたモデリングにより、速度の変化に配慮した適正なルールを構築できた。
- ③地山の硬軟変化に敏感な推力、トルクの値に加え、地山の安定度（亀裂の発達度等）の指標であるずり高さや振動指数を加味することにより、地質担当者の判定により合致するファジィモデルを構築できた。

また、図-18に、実評価点と、5指標、3指標を使った場合の地山評価点（予測）の比較を示す。これらの図並びに表-3から明らかなように、3指標の合致率は88.4%と5指標の場合(95.0%)より明らかに低下する。このことは、従来用いられている指標に加えて、ずり高さと振動指数をファジィモデルに組み込むことにより、通常の指標では捉えきれない亀裂の発達度や地山の安定度も反映しており、TBMオペレータの感覚や地質担当者の判定に、より似通った地山評価ができるモデルが構築できるようになったからと考えられる。

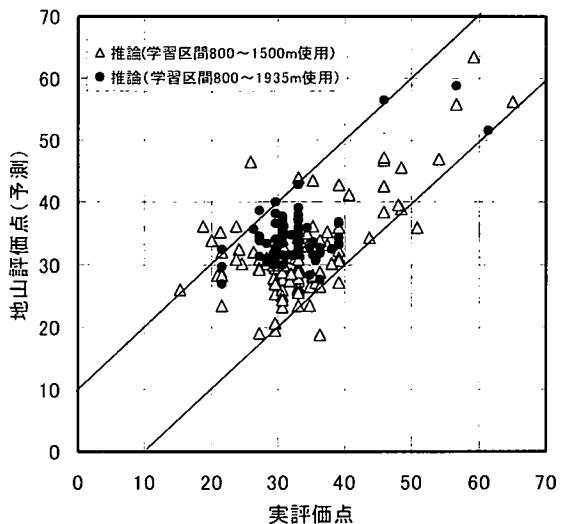


図-19 学習区間を変えたときの地山評価点の変化(推論判定区間1935～2000m)

(3) 判定精度向上への試行結果

ここでは、学習区間を延長したことによる判定精度向上効果について述べる。800m～1500m区間で学習した判定ルールを用いて1935m～2000m区間を自動判定した結果合致率は88%であった。また、同様のデータから学習区間を800m～1935mまでに延長し再構築した判定ルールを用いて1935m～2000m区間を自動判定した場合の合致率は94%に向上した。実評価点とファジィモデルによる地山評価点（予測結果）との比較を図-19に示す。図から明らかなように、学習区間を延長することにより正解に対して±10点の幅以内に予測結果がほぼ収れんし、同一区間の判定であっても合致率が明らかに向上することが示された。

従って、自動学習によるルール変更の頻度を高める（例えば100mごと、地質の変化点ごとに最新ルールに見直す）ことにより、今後合致率が向上することは容易に考えられ、今回提案したファジィモデルを使った地山評価システムの有用性は十分確認できた。

6. おわりに

機械データと地質担当者の判定結果（実評価点）をファジィモデルとして構築し、自動作成した判定ルールを用いて、掘削と同時に地山評価点を自動的に算出・表示するシステムを開発し実工事に適用した。その結果、本システムにより算出した地山評価点の合致精度は、地山性状の評価手法とし

て十分満足できる結果を得た。

今後は、地質の異なるTBM工事の実績データを本手法により学習し、判定ルールを事前に作成、蓄積することが重要である。そうすることで、TBMの掘進開始時から当該工事の地質に適合性の高い初期ルールを選定することが可能となり、合致率の高い地山評価が期待できると考えられる。

参考文献

- 1) 日本プロジェクトリサーチ：TBM日本の岩盤に挑む，2001. 7.
- 2) 日本トンネル技術協会：TBMハンドブック，2000. 2.
- 3) ジェオフロンテ研究会：トンネル切羽前方探査技術資料，1996. 5.
- 4) 山本拓治，白鷺卓，水戸義忠，山本真哉，青木謙治：TBM掘削データを用いた支保の合理的選定方法について，第1回岩の力学国内シンポジウム,F22, 2002. 1.
- 5) Barton, N.: TBM performance estimation in rock using QTBM, *Tunnel and Tunnelling International*, pp.30-34, 1999.9.
- 6) 福井勝則，大久保説介：TBMの掘削抵抗に関する研究，第30回岩盤力学に関するシンポジウム論文集,pp.303-307, 2000. 1.
- 7) Sanio,H.P.:Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock, *Int. J. Rock mech. & min. sci. geomech. abstr.*, vol.22, No.3, pp.153-161, 1985.
- 8) Gong,F., 佐藤一彦，浅井秀明：円周軌道切削における切削抵抗—ディスクカッタによる岩石の切削抵抗に関する研究（第1報），資源・素材学会誌，No. 108, 1992.
- 9) 中山隆義，青木和浩：TBMの自動掘削と合理的な施工管理システム，建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp. 262-267, 1997. 9.
- 10) 篠原茂，中山隆義：TBM機械振動による切羽の安定性評価，土木学会第52回年次学術講演会概要集, pp. 254-256, 1997. 9.
- 11) 浅居喜代治：ファジィ科学, pp. 215-235, 1994. 9.
- 12) 日本道路公団：設計要領第3集（トンネル）。
- 13) 赤木涉，佐野理，進士正人，西琢郎，中川浩二：山岳トンネル施工支援のための切羽評価法の適用性に関する研究，土木学会論文集, No. 686/VI-52, pp. 121-134, 2001. 9.

(2002. 6. 27 受付)

DEVELOPEMENT AND ITS APPLICATION RESULTS OF REAL-TIME ROCK MASS CLASSIFICATION SYSTEM FOR TBM TUNNELS

Takayoshi NAKAYAMA, Koji TAMARIBUCHI, Shigeru SHINOHARA,
Yoshinori YASUI, Masato SHINJI and Koji NAKAGAWA

Various research works on rock mass classification using mechanical parameters obtained during TBM excavation has been achieved. The authors conducted a survey of the mechanical parameters on which experienced TBM operators relied most at TBM operation. Selecting the mechanical parameters based on the survey results in conjunction with TBM vibration and muck height on the muck transfer conveyor, we built a fuzzy model and developed a real-time rock mass classification system to yield rock conditions and support requirements ahead of the tunnel face. The authors applied the system on a 5m diameter TBM tunnel. 88 percent of the system output agreed with the evaluation by geologist.