

地山情報を重視したTBM掘削管理システムの開発と適用事例

Development of TBM Navigator introducing geophysical and geological data, and application

白鷺 卓*・山本 拓治*・稲生 道裕*・西岡 和則**

Suguru SHIRASAGI, Takuji YAMAMOTO, Michihiro INOU and Kazunori NISHIOKA

This paper reports the development of TBM navigator system including geophysical and geological data and the application of this system to one tunnel site.

This system consists of three sub-system, management-system, surveying-system and observation-system. And we applied this system to one tunnel ($\phi 2.0\text{m}$) site, compared data from management-system with data from observation-system.

As a result, we confirm that estimated rock strength correlates with the result of Schmidt hammer test to a certain extent, and that the standard deviation of estimated rock strength can predict that the face rock is fractured or not.

1. はじめに

最近の社会・経済情勢の変化により、公共工事におけるコスト縮減が求められている。トンネル工事においても例外でなく、効率的な施工を目指し、急速施工への要請が高まっている。そのために、トンネル掘削にTBM工法を導入する気運が高まり、水路トンネルや第二東名・名神等の道路トンネル（導坑）への適用事例が増大している。

TBMによる掘削は、掘進速度が大きく、地山の緩みを抑えながら、しかも平滑な掘削面を形成できるという長所をもつ反面、切羽が機械でふさがれていて、容易には切羽観察ができないという欠点がある。従来のNATMによる掘削でも、切羽前方地山の状況把握は重要であり、事前地質調査だけでは不十分で、切羽観察・先進ボーリング等が実施されてきた。

TBM工法の場合も、切羽および切羽前方の地質状況把握はとりわけ重要なので、我々は切羽前方を探索する「切羽前方探索システム」、切羽観察に代る「壁面画像処理システム」および「ずり形状による地山評価システム」をこれまで開発してきた。

一方、TBMによる掘削作業を管理するための掘削管理システムは、各社で既に開発されているが、主にTBMの掘削制御や測量管理が目的であり、地山評価という観点では、リアルタイムにデータが評価されないために、なかなかフィードバックされていないのが現状である。

このような背景から、今回我々が開発した「TBM掘削管理システム」は、事前地質情報から前方探索結果、さらには掘削後の地山情報を取り入れられること、およびスラスト・トルク等の機械データと、地山情報をリアルタイムに処理して地山を評価し、次の掘削にフィードバックすることを特長とするものである。このシステムを現場に適用したので、以下にその結果を報告する。また、TBM掘削後に掘削壁面の地質調

*正会員 鹿島建設(株) 技術研究所 土木技術研究部

**正会員 鹿島建設(株) 土木技術本部

査を行い、機械データおよび地山情報データとの対比も検討したので、その結果も合わせて報告する。

2. TBM掘削管理システムの概要

今回開発した「TBM掘削管理システム」は、管理システム・測量システム・監視システムの3つのサブシステムから成っている。

● 管理システム

メインとなるシステムで、①事前地質情報や各種前方探査結果等の「地山情報データ^{*1}」や「機械データ^{*2}」を収集し、TBM周辺の地山を評価する。②次に示す測量システムから測量データを収集し、TBMの線形管理をする。③すべての情報を関連付けて見易く表示したり、集計したりする。

● 測量システム

ジャイロコンパスに自動追尾ステーションを組合せて、高精度の測量データを得ることができる。データとしては、TBMの位置座標、ヨーイング(水平方向の機体のずれ角)、ピッチング(鉛直方向の機体のずれ角)、ローリング(機体の回転角)がある。

● 監視システム

ITVカメラでテール部の画像(支保作業を監視)、ラインセンサーカメラでTBMルーフ直後のトンネル壁面画像^{*3}、ハンディビデオで局所監視のための画像、CCDカメラでベルコン上のずり形状の画像^{*4}を撮影し、これらの画像とTBMの機械音をTBM操作室および坑外の管理室に伝送して監視する。

以上のように本システムは、切羽前方をはじめとする地山の状況、TBMの掘削状況、TBMの現在位置および掘進線形、さらにトンネル坑内の様子を一箇所でリアルタイムに把握できるものである。

3. 地山を評価する各サブシステムの概要

次に、前章で下線を付したサブシステムについて説明する(図-1参照)。

3.1 切羽前方探査システム(*1)

(1) 反射トモグラフィ²⁾

ジオトモグラフィ技術の一種で、主にS波を発振源とし、速度構造と反射面深度を同時に求める新しい調査・解析手法である。この技術は、TBMの掘削時の振動が不連続面で反射してくるのを、TBM後方のトンネル壁面に設置した複数の受振器で記録し、その波形記録を解析して、切羽前方の破碎帯や地質境界等を把握するものである。

(2) 削孔検層システム³⁾

油圧パーカッションドリルを用いて、TBMルーフ直後から切羽前方50m程度まで削孔し、削孔時のデータから筆者らの提案した次式により破壊エネルギー係数 E_v 等を求めて、地山状況を予測するシステムである。

$$E_v = (E_s \cdot N_s) / (V_d \cdot A_r)$$

E_s : 油圧ドリルの仕事量 N_s : ピストンの打撃回数

V_d : 削孔速度 A_r : 削孔断面積

破壊エネルギー係数は、岩盤が硬い程増大するので、これを地山評価の指標として用いる。

3.2 TBM機械データによる地山評価システム(*2)

TBMに関するデータ(貫入量・推力・スラスト・トルク・カット回転数等)を自動計測し、地山評価に

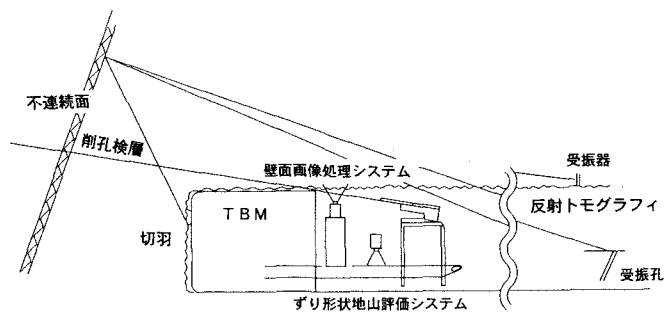


図-1 TBM掘削管理システムに取り入れた地山情報

必要な貫入量・岩盤強度・掘削体積比エネルギー等を自動計算する。

3. 3 壁面画像処理システム (*3) TBM機械本体のルーフ直後に円形アクチュエータ（トンネル中心軸を中心に所定の半径で円周方向に動く）を設置し、そこにラインセンサーカメラを取り付ける。円形アクチュエータを回転させることにより、壁面の周方向画像を撮影する。掘削の進行につれ、順次周方向画像を撮影すれば、それらを合成して壁面の展開画像を作成することができる。

3. 4 ずり形状による地山評価システム (*4)

ベルコン乗移り部を落下する掘削ずりの静止画像を連続的に撮影し、この画像からずり形状やずりの粒度分布を計測して、地山状況を推定・評価するシステムである。CCDカメラを使って、1/2000の高速シャッターで撮影し、画像処理によりずり形状を求める。その形状から、測定項目（長軸径・短軸径・円等価径・平均径・長短比）や統計処理項目（単純平均・メジアン・モード・標準偏差・分布表示等）を求めることができ、これらから地山状況及びその変化を評価する。

4. 適用事例

φ 2m級のTBMで掘削されたトンネルにおいて、今回我々が開発した「TBM掘削管理システム」より得られた情報と、掘削後に行なった壁面地質調査のデータの対比を行なったので、紹介する（図-2）。

当システムを適用した現場の地質は、主に第三紀の安山岩(An)で、それを角礫とした凝灰角礫岩(Tb)や黒色頁岩(Sh)も見られる。安山岩は比較的堅硬であるが、亀裂が発達している。凝灰角礫岩はそれに比べて固結度はやや低く、所々風化している。ここでは、ロックシュミットハンマによる推定岩盤強度 q_u (式④)を真の地山強度とし、TBM機械データから求められる岩盤強度および掘削体積比エネルギーと比較・検討した。表-1に適用した式を示す。図-2中の岩盤評点は、表-2に示すように、5m区間に含まれる岩級の割合によって点を与え、それらを平均したものである。また、壁面観察結果や掘削状況、支保工の位置も合わせて示した。

4. 1 岩盤強度と掘削体積比エネルギーの検討

q_u と σ_c ②および q_u と σ_c ③の相関を取ると、前者が0.42、後者が0.25と若干低いですが、グラフの傾向としてはどちらも比較的一致している。また、 σ_c ②および

σ_c ③と掘削体積比エネルギーの相関を見ると、前者が0.81、後者が0.71と、明確な相関が認められる。このようなことから、 σ_c ②、 σ_c ③および掘削体積比エネルギーは、地山の強度をある程度正確に反映していることが確認できる。

4. 2 掘削状況との対比

掘削状況から、TD380~422mは切羽は硬く、大目の亀裂で抜け落ちがよく発生し、カッターが回転不能となった区間(区間①)、TD404~434m、514~535mは切羽が安定していた区間(区間②)、TD651~654m、688~740mは切羽が未固結で、ずり泥濘化によりチャンバーが閉塞した区間(区間③)であることがわかっている。これら3区間におけるそれぞれの σ_c ②、 σ_c ③、掘削体積比エネルギーについて、平均値および標準偏差、変動係数を計算し、バラつき度を見てみた(表-3)。これより、亀裂の多い区間①においては岩盤強

表-1 計算式一覧

| | 式 | 説明 |
|----|--|--|
| 式① | $E=F/A+2\pi \cdot N \cdot T/(A \cdot v)$ | E:掘削体積比エネルギー F:スラスト荷重 T:トルク N:回転数 A:掘削断面積 v:掘進速度 |
| 式② | $\sigma_c=F/(C_1 \cdot P_e)^{1/3}$ | F:スラスト荷重 P _e :貫入量 C ₁ :定数 |
| 式③ | $\sigma_c=T/(C_2 \cdot P_e^{1.5})^{1/3}$ | T:トルク P _e :貫入量 C ₂ :定数 |
| 式④ | $\log_{10}(q_u)=0.0165R+2.131$ | q _u :推定一軸圧縮強度 R:ロックシュミットハンマ反発度 |

表-2 岩盤評点

| | C _H | C _M | C _L | D |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----|
| <25 | 5 | 6 | 11 | 16 |
| 25 ≤ <50 | 4 | 7 | 12 | 17 |
| 50 ≤ <75 | 3 | 8 | 13 | 18 |
| 75 ≤ <100 | 2 | 9 | 14 | 19 |
| 100% | 1 | 10 | 15 | 20 |

表-3 3区間におけるバラつき度

| | | 区間① | 区間② | 区間③ |
|--------------|------|-------|-------|-------|
| σ_c ② | 平均値 | 69.41 | 55.94 | 38.24 |
| | 標準偏差 | 43.85 | 30.25 | 19.39 |
| | 変動係数 | 0.63 | 0.54 | 0.51 |
| σ_c ③ | 平均値 | 56.83 | 43.17 | 32.76 |
| | 標準偏差 | 38.08 | 25.88 | 20.53 |
| | 変動係数 | 0.67 | 0.60 | 0.63 |
| 掘削体積比エネルギー | 平均値 | 59.02 | 48.32 | 34.65 |
| | 標準偏差 | 31.58 | 21.92 | 18.40 |
| | 変動係数 | 0.54 | 0.45 | 0.53 |

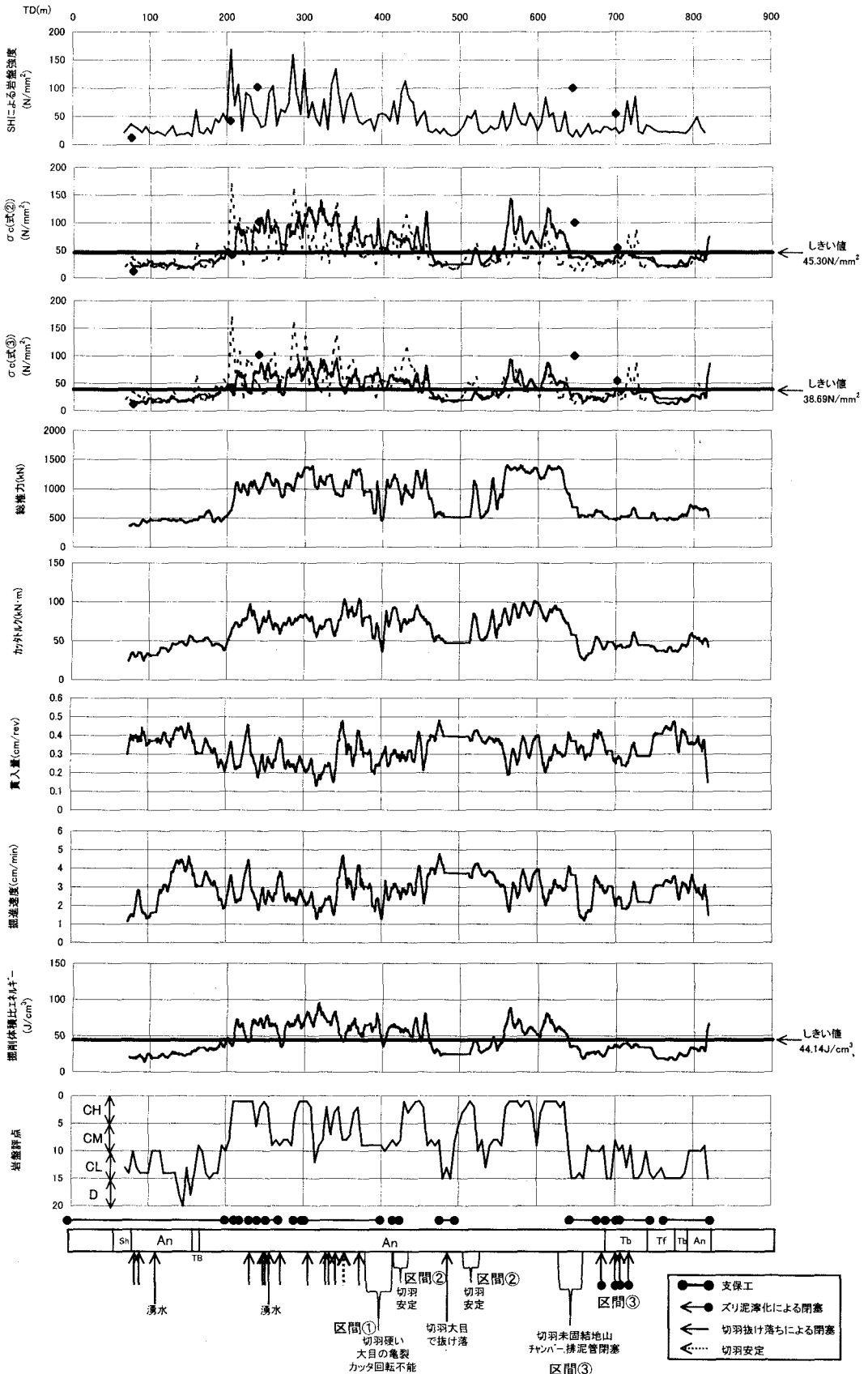


図-2 現場適用例

度および掘削体積比エネルギーのバラつきが最も大きく、切羽が安定している区間②においてはバラつきが小さいということが言える。つまり、岩盤強度および掘削体積比エネルギーの変動係数を見ることで、その岩盤が亀裂性であるかどうか、ある程度予測可能であると言える。

4.3 しきい値の設定と的中率

TBM機械データおよびそれから求められる岩盤強度や掘削体積比エネルギーと岩盤評点の間には、傾向として比較的密接な相関が見られる。ここで、評点10点未満のもの(C_H, C_M級)と10点以上のもの(C_L, D級)のしきい値を統計処理により求めたところ、 $\sigma_{c②}$ では45.30 N/mm², $\sigma_{c③}$ では38.69 N/mm², 掘削体積比エネルギーでは44.14 J/cm³となり、この的中率は、 $\sigma_{c②}$ においては88.8%, $\sigma_{c③}$ においては88.6%, 掘削体積比エネルギーにおいては90.4%とかなり高い値を示した。つまり、壁面観察により得られた地山情報とTBM機械データからしきい値を決定し、適宜修正を行いながら施工すれば、TBMの急速な施工に遅れることなく、適切に支保パターンを決定し、支保工設置の必要性の判断が行えるものと思われる。図-2に示すように、実際の支保工の設置位置と比較してみると、しきい値以下のところで支保工の建て込みが行われていることが多い。

4.4 単相関マトリックス

表-4に各データ間の相関係数を示す。これを見ると、ロックシュミットハンマによる推定岩盤強度と岩盤評点との相関はそれほど高くない。これは、一断面内でも、地質や亀裂のバラつきが大きかったためと考えられる。

これに対し、岩盤評点と総推力およびカッタールクの相関が高いことがわかる。これは、オペレータが今回開発した地山評価システムを有効に活用し、地山に合わせて推力と回転数の制限を行い、合理的な掘削を行った証拠である。今回適用した地山評価式と岩盤評点との相関はまだまだ低く、人間の感覚にまでは及んでいない。今後は振動音、ずりの形状、抜け落ちの程度などをより人間の判断力に近いところで定量的に判断し、地山評価の精度を高めていきたいと思っている。

表-4 各データ間の単相関マトリックス

| | SHIによる推定岩盤強度 | 岩盤評点 | $\sigma_{c②}$ | $\sigma_{c③}$ | 総推力 | カッタールク | 貫入量 | 掘進速度 | 掘削体積比エネルギー |
|---------------|--------------|-----------|---------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| SHIによる推定岩盤強度 | | -0.444771 | 0.4170032 | 0.2504734 | 0.3991745 | 0.2504734 | -0.241062 | -0.127672 | 0.1011205 |
| 岩盤評点 | | | -0.460344 | -0.310033 | -0.703191 | -0.606945 | 0.2052203 | -0.013661 | -0.44799 |
| $\sigma_{c②}$ | | | | 0.8069484 | 0.6172398 | 0.2966351 | -0.66172 | -0.490565 | 0.8149895 |
| $\sigma_{c③}$ | | | | | 0.4526473 | 0.2822749 | -0.660488 | -0.48116 | 0.7185031 |
| 総推力 | | | | | | 0.7873446 | -0.174405 | 0.0542424 | 0.5413901 |
| カッタールク | | | | | | | 0.0925034 | 0.3714313 | 0.4315108 |
| 貫入量 | | | | | | | | 0.6329485 | -0.649093 |
| 掘進速度 | | | | | | | | | -0.430487 |
| 掘削体積比エネルギー | | | | | | | | | |

5. まとめ

今回は、TBM掘削管理システムのうちTBM機械データと壁面画像処理システムによる地質評価システムのみを報告した。今後も、さらに切羽前方探査システムやずり形状による地山評価システムを総合的にリンクさせ、より実用的なシステムとしての完成度を高めていく所存である。

【参考文献】

- 1)福井他：TBMの掘削抵抗を利用した岩盤強度の推定,資源と素材,Vol.112,No.5,pp.303-308,1996
- 2)戸井田他：反射トモグラフィによるトンネル前方探査技術について,第30回岩盤力学に関するシンポジウム,投稿中
- 3)白鷺他：削孔検層の適用性に関する検討,土木学会第54回年次学術講演会,VI-206,pp.412-413,1999