

52. TBMの自動掘削と合理的な施工管理システム

電源開発(株)：青木 和浩
 (株)奥村組：中山 隆義, 鎌野 等
 井上 哲

1. はじめに

近年TBM工法は需要が増加し、その用途も、水力発電用水路、大断面トンネルの導坑、上下水道用トンネル掘削等、多岐に及んでいる。これは、①TBMが幅広い地質条件に適合するように改良されてきたこと、②支保・ずり搬出や切羽前方探査技術等周辺技術が進歩してきたことに起因すると考えられる。今回、さらなるTBM工法の効率化を目指して、方向制御の自動化と地山状況に適合する掘進制御の自動化ならびにこれらの施工管理システムの実証施工を徳島県阿南市の地中電線路築造工事で実施した。

TBMの自動掘削システムは掘削中のマシンの挙動、地山の状態を常に把握しながらファジィ推論を用いて掘削・方向制御作業を自動的に行うが、今回パソコンネットワークを利用した施工管理システムと統合することにより、より合理的な施工が可能になった。

2. システムの概要

2.1 システムの構成

今回実用化したシステムは、TBM自動掘削システムとパソコンネットワークを使用した施工管理システムから構成されている。図-1に実用化したシステムの概要を示す。

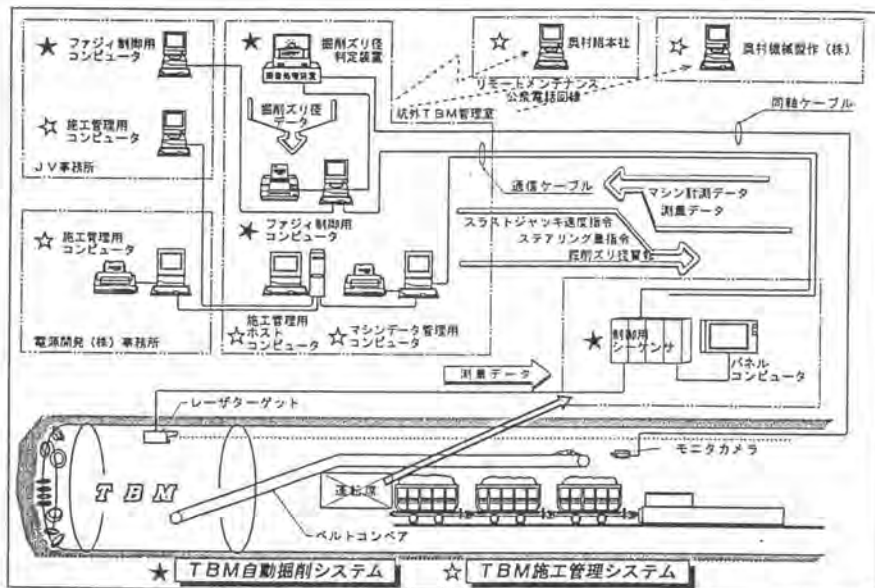


図-1 システム概要図

2.2 TBM自動掘削システム（図-1参照）

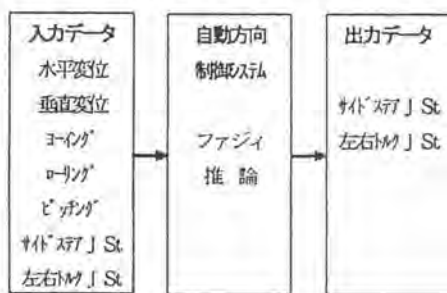
a. 自動方向制御システム

- ・本システムは、坑内に設置したレーザ発振器及びTBM本体に取り付けた受光装置より検出されるTBMの位置、方向角をもとにファジィ制御により方向制御を行う。
- ・カッタヘッドに連結したメインビームを上下、左右に操作する事により、TBMのカッタヘッド中心を基線に一致するように制御する。
- ・TBMのローリングはトルクシリンダ操作により自動修正を行う。
- ・TBMの方向制御間隔は任意に設定可能である（今回は掘進ストローク6cmごとに実施）。

図-2に自動方向制御ファジィ推論の概要を示す。

b. 自動掘進制御システム

掘進中のカッタトルク値・スラスト推力を検出して、掘進速度を最適値に制御する。切羽岩盤の状態にあわせて、掘進速度を制御することにより、カッタに加わる荷重を適正に保持しながら掘進する。これにより、効率的な掘削が可能になるとともに、カッタリングの異常摩耗を無くし、カッタライフを長くする。図-3に自動掘進制御ファジィ推論の概要を示す。



J:ジャッキ、St:ストローク

図-2 自動方向制御ファジィ推論概要

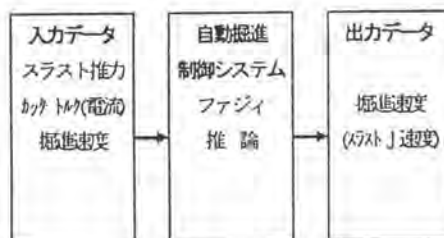


図-3 自動掘進制御ファジィ推論概要

c. 掘削ずり径判定システム

ずり搬出用ベルトコンベヤ終端上の掘削ずりを監視カメラで捉え、画像処理する事によって、排出されるずりの大塊の出現個数を定量的な情報として得るシステムである。また掘削ずりの状況を定量的に捉えることができるため、掘削中の切羽地山の変化（亀裂の多少、崩壊性の有無）に迅速な対応が可能となる。

図-4に掘削ずり径判定システムを示す。

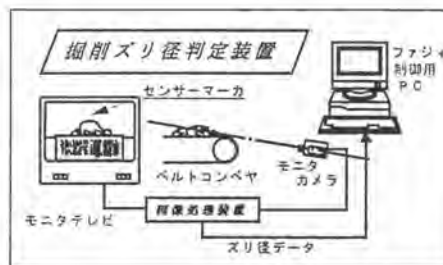


図-4 掘削ずり径判定システム

2.3 TBM施工管理システム（図-1参照）

a. リアルタイムモニタ機能

TBM掘削中のデータ（方向制御、掘進制御、マシンの負荷、ずり径等）を同一画面上に、グラフとして表示する。また、1ストローク掘削完了時に掘削記録を自動作成する。

b. 掘削情報ネットワーク機能

TBMの掘進情報を電話回線を用いて、中央管理室、施工者事務所、発注者事務所等の必要力所からモニタリングできるシステムを構築し、情報の共有化が可能である。

c. リモートメンテナンス機能

電話回線を使用し、TBM制御用コンピュータ（現場設置）と本社及び自動制御システム管理業者のコンピュータを接続する。このことにより、制御システムの作動状況の確認や、制御ルールの入力・変更、トラブル時の原因究明、処置を遠隔地より行える。

3. 実証施工

3.1 工事概要

発注者：電源開発株式会社、工事名：阿南紀北直流幹線（地中線）新設工事

施工場所：徳島県阿南市、工期：平成7年12月11日～平成10年3月15日

工事内容：TBM掘削による地中電線路築造工事、掘削径φ3.3m、延長1,716m（TBM施工区間）

地質は砂岩と頁岩から形成され、一軸圧縮強度は、平均650kgf/cm²、最大1,200kgf/cm²程度である。使用するTBMはオープンタイプ（電源開発株式会社所有）で、以前に本四連系線地中線洞道の掘削（2,731m）に使用されたものの転用である。本工事への適用に当たり、カッタヘッド等の主要構造部、駆動・油圧・制御系統等に必要の整備・改造が実施されている。TBMの仕様を表-1に示す。

表-1 TBM本体仕様

形 式	小松TG 330-3	
カッタヘッド	掘削径	3,300 mm
	回転トルク	55.7 t-m
	回転数	8.3 rpm
	カッタ径×数量	15.5 in × 22
推進装置	掘進ストローク	1,200 mm
	推進力	500 t
本体支持装置	クランピング方式	グリッパ式
	クランピング径	3,300 mm
ズリ搬出装置	形式	ベルトコンベヤ
	搬出能力	140 t/h
	ベルト幅	500 mm

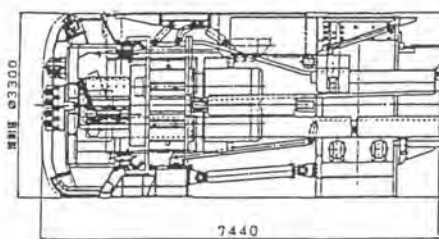


図-5 TBM構造図

3.2 適用結果と考察

3.2.1 TBM自動掘削システム

システムの稼働状況を写真-1に、表示画面を写真-2に示す。



写真-1 システム稼働状況



写真-2 システム表示画面

a. 自動方向制御システム

①方向制御結果

図-6、図-7に1ストローク掘進する間(1,200mm)の水平及び鉛直方向の代表的な制御パターンを示す。水平、鉛直方向とも、基線に対するTBMの変位と方向角を常時検知し、ファジィ制御により、ステアリング用シリンダを適正に操作している。

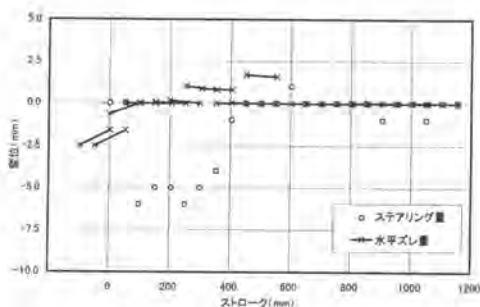


図-6 水平方向制御結果

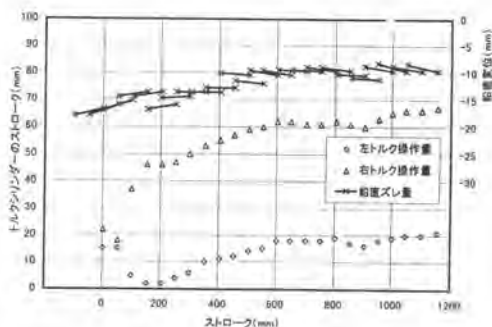


図-7 鉛直方向制御結果

水平方向制御では、掘進開始時は盛替えの関係から、TBMの位置が右にずれていたが、すぐに修正し、基線に一致するように制御し、後半では、位置、方向ともずれ量ゼロで制御している。

鉛直方向制御では、掘進開始時の-17mm程度のずれ量を左右のトルクシリンダを操作して、徐々に基線に近づけている。後半では、ずれ量が小さくなった(-10mm)と判断して、無理にゼロに近づけず、マシンの方向を重視して、基線に平行にしようとしている(特に基線付近の姿勢制御は、TBMの方向角を重視している)。

②自動ローリング修正

図-8に同一ストロークにおける自動ローリング修正結果を示す。

掘進開始時に、盛替え作業で発生したローリング角度を検知し、掘進ストローク200mmまで左右のトルクシリンダを操作して、ローリング角度を-1度から、ほぼ0度に修正している。この時、TBMのピッチングは、ほとんど変化していない。

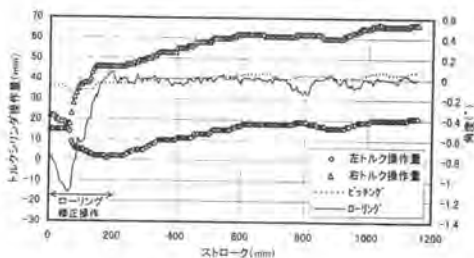


図-8 自動ローリング修正結果

b. 自動掘進制御システム

①自動掘進と手動掘進のデータ比較

図-9に自動掘進と手動掘進の各データの変動率を示す。

自動掘進においては、TBMの負荷に応じて掘進速度を制御した結果、手動掘進に比べて、推力、カット電流、速度とも変動が少なく、安定した掘削を行っている。

②自動及び手動掘進における掘削エネルギーの比較

図-10、図-11、図-12に地山特性に対する、単位掘削エネルギーを示す。

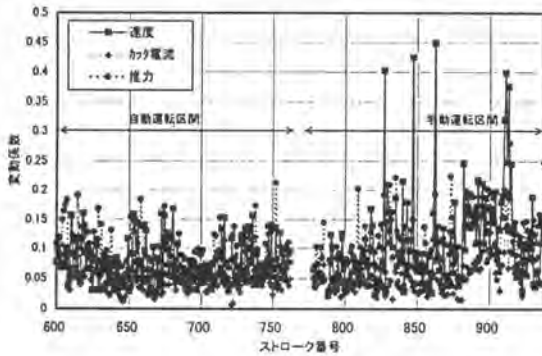
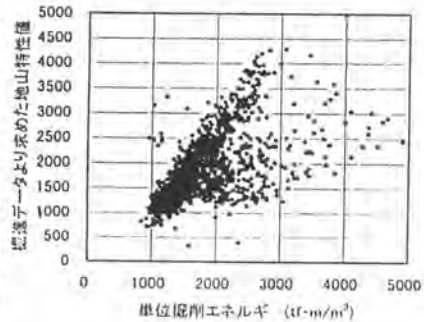


図-9 自動、手動掘進データ変動率



*地山特性値：岩盤強度、亀裂数等に依存する常数

(Sanioの理論式より引用)

*単位掘削エネルギー：1m掘削に要したエネルギー

図-10 単位掘削エネルギー（自動、手動混合）

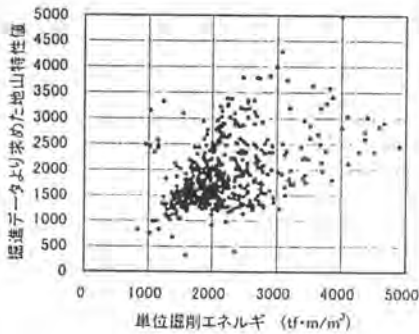


図-11 単位掘削エネルギー（手動掘進）

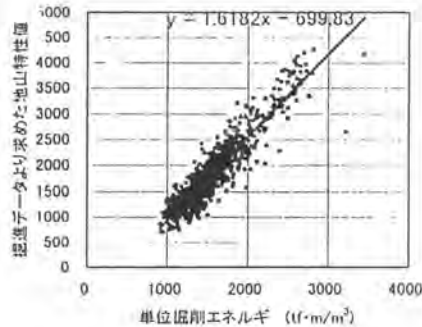


図-12 単位掘削エネルギー（自動掘進）

縦軸に示す地山特性値は地山の状況を反映しており、手動掘進の場合では、同じ地山を掘削するのに要したエネルギーが大きくばらついている。一方、自動掘進の場合に見られる地山特性値と単位掘削エネルギーの強い相関（相関係数=0.9）は、TBMの負荷（スラスト、カットトルク値）を地山の状況に対して、適正に保つべく掘進速度を自動制御したことを示している。また、効率的で安定した掘削は、切羽崩壊の防止、負荷の適正化によるカッタライフの延長、消費電力量の低減に寄与しているものと考えられる。

c. 掘削ずり径判定システム

写真-3に稼働中のずり径判定システムを、図-13にずり径と支保パターンとの関係を示す。

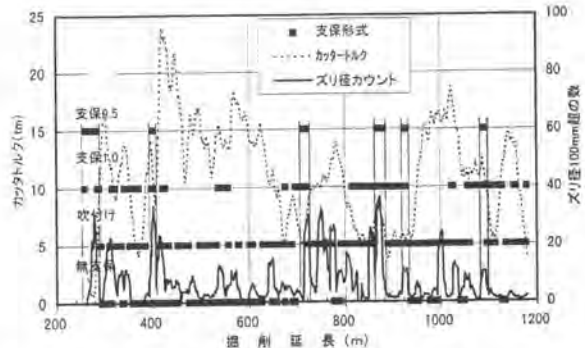


写真-3 稼働中のずり径判定システム 図-13 掘削ずり径と支保パターンとの関係

図-13は、100mmをオーバーした大塊の出現個数をグラフ化している。ずり径グラフのピークとリング支保間隔0.5m（地山崩壊多発区間）を施工した位置が概ね一致しており、崩壊性の地山を掘削する場合に、大塊がベルトコンベヤで搬出されたことを示している。また、大塊が多い区間とカッタートルクが小さい区間が一致する区間が多く、地山強度とずり径データの間には何らかの相関関係があることが分かる。このことは、本システムが、掘削と同時に切羽地山の崩壊性や亀裂の情報を定量的に提供できる可能性を示している。

3.2.2 TBM施工管理システム

- a. リアルタイムモニタ機能；掘進データ及びTBMずり量を常に把握することが可能になり、施工管理の精度向上に寄与できた。
- b. 掘削情報ネットワーク機能；現場、施工者事務所、発注者事務所間（電源開発株式会社で導入された管理システムとリンク）の掘削情報ネットワーク機能により、リアルタイムな情報の共有化が可能となり、共通した認識に基づいた迅速な指示、対応が可能となった。
- c. リモートメンテナンス機能；（株）奥村組本社及び奥村機械製作（株）のコンピュータから、自動掘進状況の確認及び制御ルールの変更等が実施できた。この結果、TBMの稼働状態に合わせた迅速な対応が可能となり、また、制御回路等のトラブル原因の究明にも大きく寄与した。

4. おわりに

今回の実証施工の結果、TBM掘削における本システムの実用性を確認できた。

この成果を広く水平展開し、より厳しいTBMの施工条件（長距離・急速施工用TBM、急勾配斜坑施工用TBM、複合地盤施工用TBM、等）に対して適用していきたいと考えている。

最後に、本システムの開発・実用化に御指導、御協力をいただいた関係各位に感謝の意を表するとともに、本報告が今後のTBM施工合理化の一助となれば幸いである。

<参考文献> 1) 中山隆義、井上哲、背野康英：TBM全自動掘削システム、第13回国際建設ロボットシンポジウム概要集、H8年6月

2) 吉村豊、小菅正敏、青木和浩：ネットワークを利用したTBM施工の合理化、電力土木、H9年3月