

18. シールド自動化統合システムの開発

(株)鴻池組：井上 光治・*日置 昌治
古川 和義

1. はじめに

近年、シールド工法は、都市部におけるトンネル工事において、道路、ガス・電力、上下水道などライフラインを構築する技術として主要な工法となっている。

シールド工事においては機械化が他工種に比べ進んでいたことから比較的早いうちに、掘削やセグメント組立の自動化が進められている。当社においても1980年代から自動化システムの開発を行い、現在7システムが実用化レベルに達している。

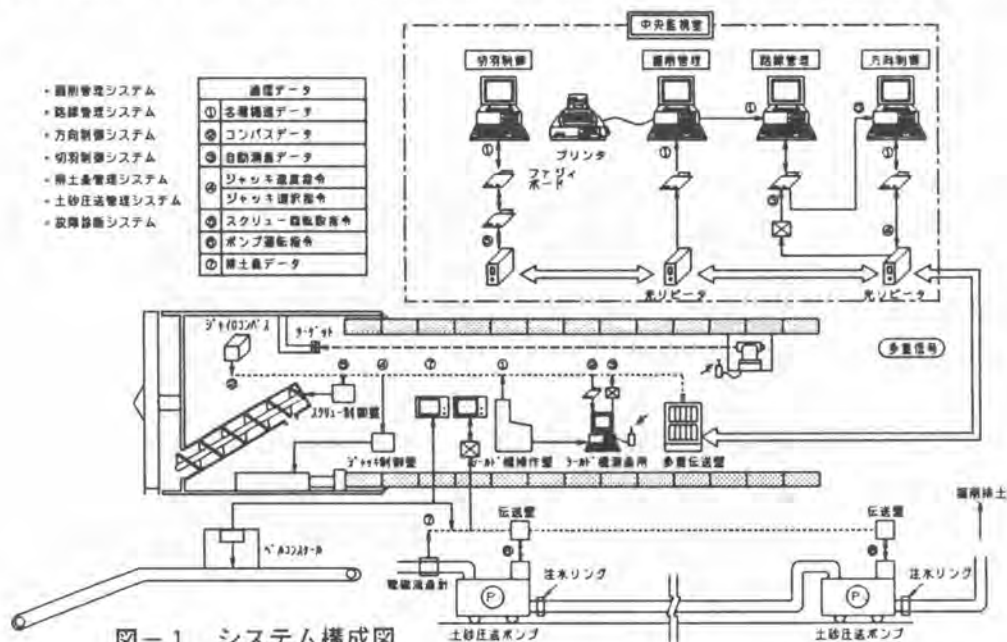
この度、これらのシステムを多重伝送とLANにて結合し、シールド自動化統合システム(K-EASIS : Konoike Easy-operating Automatic Shield Integrated System)を構築した。

本稿ではこれらシステムの概要を示すと共に、適用結果を紹介する。

2. 概要

本システムは、シールド機及び坑内に配置された各種センサー、計測機器及び制御盤と地上の中央監視盤とを多重伝送装置と現場内LANで結んだ統合化コンピュータシステムである。中央管理室における集中管理・ワンマンコントロールを目的とし、現場規模に応じたシステムの組合せが可能である。システム構成の概要を図-1に示す。

本システムは7サブシステムにより構成されている。以下に各サブシステムの概要を示す。



(1) 掘削管理システム

シールド機の運転状況や裏込め材作泥材の注入状況、排土や泥水の輸送状況などシールド掘進に必要なデータを、地上の中央監視室に設置したパソコンの画面に、リアルタイムに表示する。これらのデータを各種演算し、リング毎のトレンドグラフとして同じ画面に表示する。さらに、掘進長5mmピッチに記録保存するデータ蓄積機能、1リング毎や1口毎の掘進記録表を出力する帳票処理機能や他のサブシステムとのネットワークの機能を有する。

(2) 路線管理システム

現場の条件に応じて、レーザー・トータルステーション・ジャイロコンパスなどの測量装置を適宜組み合わせ、掘進中のシールド機の位置・姿勢を自動測量し、それらのデータを演算処理することにより施工計画線からの現在のシールド機のずれ量・ずれ角を求める。測定したデータは中央監視室・マシン運転席に表示する。

なお、中～大口径の現場で適用する自動追尾式トータルステーションは、当社が独自に開発したもので以下のような特徴がある。

- ①測距精度±1mm、測角精度±2秒のトータルステーションを使用しているため高精度な測量が可能である。自動追尾時の精度は、100mで1cm程の誤差になる。
- ②自動追尾できる距離は200m程度である。
- ③坑内に設置されている基準点をもとに、トータルステーション本体の座標を演算処理する機能があるため盛り換え作業を容易に行える。
- ④計測部と演算部は無線でデータ通信をしているため、日々の掘進に応じてケーブルを延長しなくてもよい。

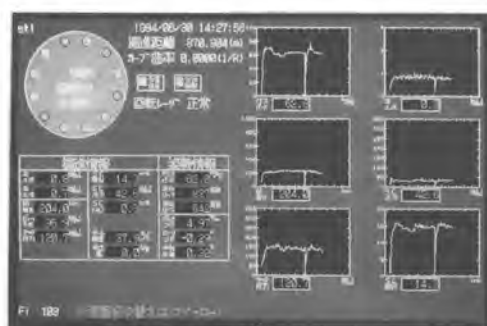


写真-1 掘削管理システム画面



写真-3 トータルステーション取付状況

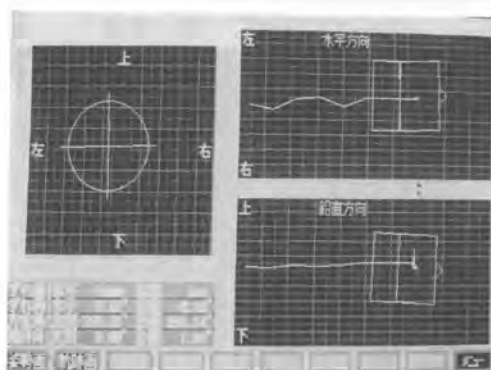


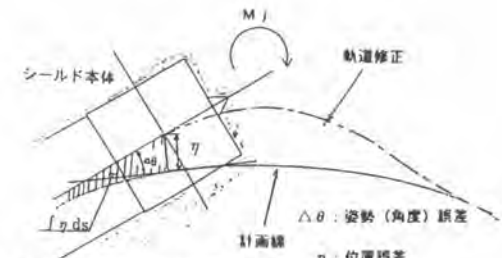
写真-2 路線管理システム画面

(3) 方向制御システム

路線管理システムからのシールド機の位置・姿勢データをもとに、シールド機を計画線どおりに施工させるために最適なジャッキパターンを自動的に選択する。制御方法は、学習機能を有したPID制御もしくはファジー制御の選択が可能で、地山やシールド機の方角特性の変化に対応できる。このシステムは、制御対象となるシールド機が、その位置や姿勢を変化しながら運動する時の施工計画線からの位置・姿勢のずれ、すなわちずれ量及びずれ角の検出データをもとに、このずれ量及びずれ角を修正するようなジャッキモーメントを演算しジャッキパターンを求め、制御要素であるジャッキのON、OFF信号として出力するものである。この発生したジャッキモーメントによって新たに生ずるシールド機の位置・姿勢の変化は再び位置・姿勢検出システムから本システムにフィードバックされ、リアルタイムに検出したずれ量、ずれ角の信号に対し制御を行うことができる。位置・姿勢の検出は10秒おきに、またジャッキ制御は、10cmごとに行っている。

本システムの主な特徴を以下に示す。

- ①シールド機の施工計画線からの位置・姿勢のずれを、平面内・縦断面内について同時に軌道を修正するシステムである。
- ②施工地山に対する学習機能を有する。現在の地山の性質を見直すもので地山の変化に対応しかつ各施工地山の土質にあった制御をすることができる。
- ③ジャッキストロークを約10cmごとに、ジャッキパターンの選択・変更ができるため、緻密な制御が可能である。
- ④あらかじめ施工計画線データを入力しておくことにより、曲線区間を事前に予測し、直線から曲線に入る場合のカーブを切るタイミングなど、熟練オペレータの操作に合わせた制御方法を採用している。なお、本システムは平成元年建設省の建設技術評価を取得している。



施工計画線に対するずれ量(η) ずれ角(Δθ)を10cm毎に認識し、

次式により、シールド機に与えるべきモーメントを算出する。

$$M_j = \underbrace{-\alpha \cdot \eta}_{(1)} - \underbrace{\beta \int \eta ds}_{(2)} - \underbrace{\gamma (\Delta\theta + K22)}_{(3)} - \underbrace{\frac{K14}{K11}}_{(4) \quad (5)}$$

- (1) P(Proportion) 比例項：ずれ量(η)により比例的に与えるモーメント
- (2) I(Integral) 積分項：ずれ量の積分値(ずれ面積)より与えるモーメント
- (3) D(Differentia)微分項：ずれ量の微分値(ずれ角)より与えるモーメント
- (4) (5)基本モデル係数 ④：フィードフォワード制御項

なお、 $\alpha : \beta : \gamma : K11 : K14 : K22$ は、学習機能より求められる係数

図-2 ジャッキモーメント演算アルゴリズム (PID制御時)

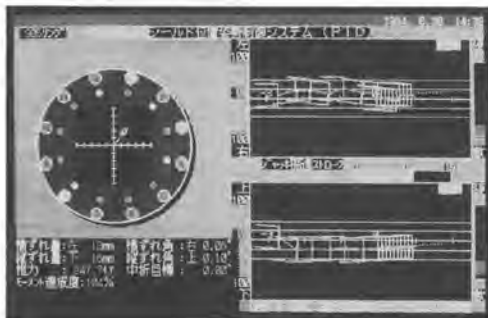


写真-4 方向制御システム画面

(4) 切羽土圧制御

泥土圧式シールド工法においては、チャンバー内に掘削土砂を充填させ、土圧と水圧に応じて添加材を注入し、掘削土砂の塑性流動化を図りながら連続的に排土を行う。このとき、オペレータはチャンバー内土圧の変化を観察し、観測値と目標の偏差を小さくするように掘削速度やスクリュウコンベア回転数を調整する。図-3は、ファジィ推論概念図で前件部に切羽土圧・掘削速度・カッタートルク・推力・スクリューコンベア回転数・の掘進データを設定、後件部には制御対象となるスクリュウコンベアの回転数と掘削速度を設定している。

本システムはこれら従来、熟練オペレータが行っていた作業を自動化したものである。

制御方法の基本的なアルゴリズムは以下の通りである。

- ①チャンバー内土圧を目標値に対して偏差が小さくなるように掘進する。
- ②予め設定した目標値どおりの速度で掘進する。
- ③推力・カッタートルクが予め設定した注意レベルを超えないように掘進する。



図-3 ファジィ推論概念図

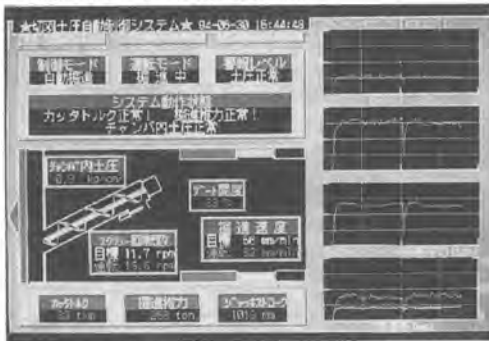


写真-5 切羽土圧制御モニタ画面

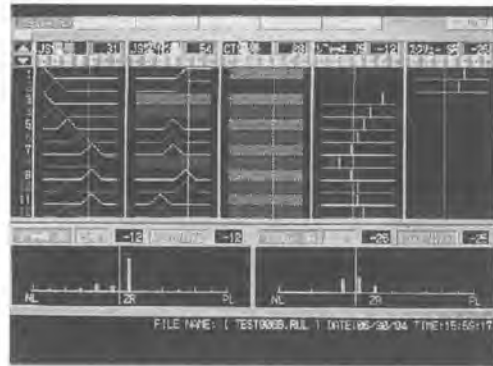


写真-6 ファジィルール

(5) 土砂圧送管理システム

複数の土砂ポンプを直列に接続して使用する場合、1台のポンプが閉塞気味であれば全体の圧送能力に大きな影響が現われる。本システムは、掘削管理者やシールド機のオペレータが全てのポンプの運転管理・監視をいち早くできるようにしたシステムで、以下のような機能を有している。

- ①中央管理室とシールド機運転席に設置した表示パネルに、土砂圧送ポンプと注水ポンプの運転状況と各データを表示する。

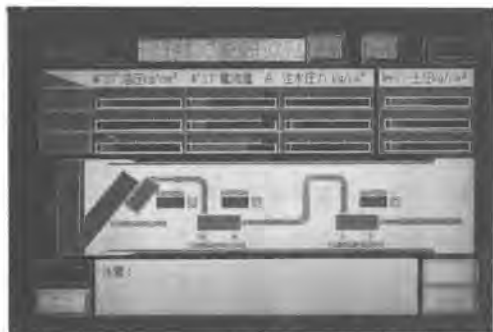


写真-7 圧送管理モニタ画面

②ポンプの土砂ホッパー内の土圧を監視することにより、ポンプを自動運転・停止する。

③ポンプに異常が発生した場合には、そのポンプより切羽側のポンプやシールド機を自動的に停止させて掘削を中断させる。

(6) 排土量管理システム

システムは、各種センサーで計測された排土体積とシールドジャッキストローク値とから得られる掘削管理グラフを、ディスプレイ上にリアルタイムに表示し、数値データよりも判断の早い視覚情報を提供するシステムである。

(7) 故障診断システム

本システムはシールド機の機器の稼働状況を常に監視し、異常時には警報を発するとともに故障機器の特定を行い、その機器の設置場所と原因、簡単な点検・処置方法を中央管理室及び運転席内のタッチパネルに表示するものである。これを設置することにより、専門的な知識がなくても故障の状況が明確に把握できるため、対応時間の短縮が図れる。

3. システム適用結果

本システムにおける方向制御、切羽土圧制御、各サブシステムにつきそのシステム適用結果につき、以下に述べる。

3-1 方向制御システム

本システムの適用結果を図-5に示す。これらの図から、自動運転時の施工計画線に対するずれ量は、直線部で±10mmまた曲線部では±15mm内に収まっていることがわかる。

3-2 切羽土圧制御システム

本システムの適用結果を熟練オペレータとの比較により行う。表-1に自動掘削と手動掘削の代表的な掘進データを、図-6に、自動と手動で各々5リングずつ連続運転したときの掘進データのうち、チャンパー内土圧の目標値からの偏差の度数分布の比較を以下に示す。

①チャンパー内土圧の変動については、ファジーコントローラによる制御のほうが熟練オペレータによる制御にたいして小さくなっており、良好な制御をしている。

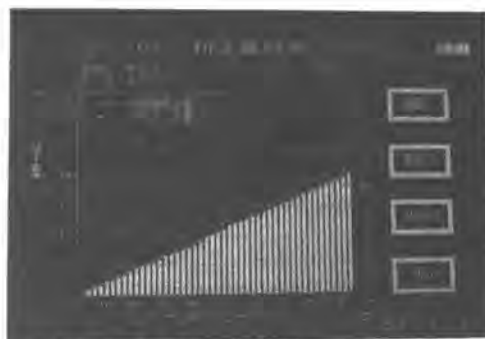


写真-8 排土量管理モニタ画面

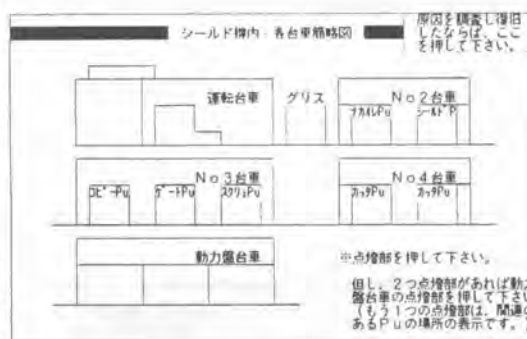


図-4 故障診断システム管理画面

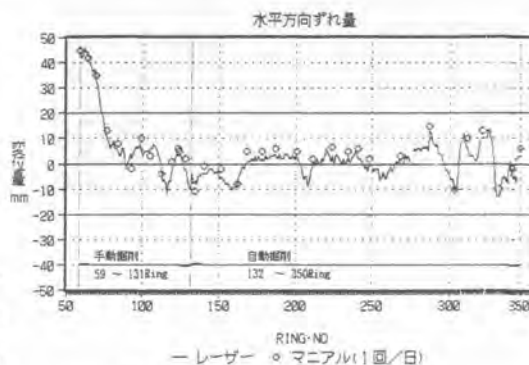


図-5 横ずれ量適用結果

②チャンパー内土圧の目標値からの偏差については、ファジーコントローラによる制御のほうが熟練オペレータによる制御に対して小さくなっており、良好な制御をしている。

③掘進速度は、ファジーコントローラによる制御のほうが熟練オペレータによる制御より若干遅くなっているが、予め設定したカッタトルクの注意レベルを超えないように制御しているため、実用上十分な制御をしている。

④カッタトルクは、ファジーコントローラによる制御のほうが熟練オペレータによる制御に対して予め設定したカッタトルクの注意レベルを超えないように制御している。

⑤スクリュウコンベアの回転数については、ファジーコントローラによる制御のほうが熟練オペレータによる制御に対して、チャンパー内土圧に応じて頻繁に変化させている。

以上、本システムが実用上十分な制御機能を有していると評価される。

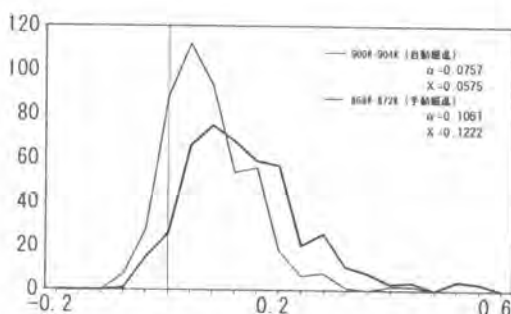


図-6 切羽土圧偏差度数分布

表-1 手動・自動運転の比較

		手動	自動
条件設定値		切羽土圧目標値 0.8kg/cm ² スクリュウコンベア目標値 70km/min カッタトルク注意レベル 40t 推力注意レベル 300t	切羽土圧目標値 0.8kg/cm ² スクリュウコンベア目標値 70km/min カッタトルク注意レベル 40t 推力注意レベル 300t
変更部分		手動掘進	自動掘進
実	切羽土圧		
種	スクリュウコンベア		
種	カッタトルク		
果	スクリュウ回転数		

4. あとがき

以上、シールド自動化統合システムについて述べた。現在、本システムは10数現場で実施され、良好な結果を得ているが、今後さらに改良改善を加え、より使い易くまたより広い土質をカバーできるシステムへ機能アップをしていきたいと考えている。また、シールド工事の完全自動化へと発展させるよう努力する所存である。