

土圧式シールド機の土圧・速度制御システムの開発

植田 勝 紀 * 濱 田 和 人
**小 崎 正 弘

要 旨

シールド工事における自動化は、掘進技術・搬送技術・組立技術・維持管理技術と多くの技術開発が行われ、現在では開発からしだいに運用の時代に入っている。五洋建設においても、これらの技術開発を総合的に進めているが、中でも「シールド機掘進自動化の開発」というテーマについては早い時期（1986年）から取り組んできた。これは、シールド機掘進に係わる管理技術と自動掘進技術の研究と開発を行うものである。このテーマにおいて、昨年度から土圧式シールド機の掘進制御システムである「土圧・速度制御システムの開発」に着手し、引き続き本年度は大阪支店神呪新川雨水幹線工事にて現場実証実験を行った。

本システムの目的は、土圧式シールド機掘進時の土圧制御と速度制御を中枢とした制御要素すべてを、遠隔地上事務所のコンピュータが、熟練オペレータと同レベルで自動制御しようとするものである。本システムの特徴は、土質変化に伴う制御特性変化を学習し予測制御するものである。実証実験では、巨礫を含んだ土質変化の激しい神呪新川雨水幹線工事にて、十分な制御効果が得られることを確認した。

1. まえがき

近年のシールド工法は、トンネル断面径2 m ϕ クラスの小口径シールドから、1.4 m ϕ クラスの大断面シールドまでと都市型トンネル施工のほとんどに幅広く使われている。この密閉型シールド工法には、大きく分けて土圧式と泥水式の2つがある。いずれの場合も、シールド機の構造において前面切羽部を隔壁にて遮断し、この密閉された切羽部分に加わる圧力を安定土圧（泥水圧）に保持しながら掘削前進する工法である。この安定土圧値を算出する理論式は、静止状態の地盤でボーリング結果による詳細土質データ等が明確な場合に算出できる。云い替えれば、シールド機掘進中の掘削されて流動している土砂の安定土圧値を理論式にて的確に掴むことはむずかしく、これを推測するために過去の経験則が必要になる。特に、圧力伝搬が比較的良好な泥水式シールドに比べて、地山を直接掘削する土圧式シールドは、土質や地下水の変動による影響を受けやすく切羽土圧安定保持に関するリスクも大きい。長距離施工・急勾配施工・土質変化に富んだ施工等、次第に施工対象は拡大する傾向にあり、さらに定量的な管理手法の確立と、操作する人間の負担を軽くする自動化技術が求められている。

本編は、こうした問題を解決する目的で開発した、土圧式シールドの掘進制御「土圧式シールド機の土圧・速度制御システム」の概要と、現場実証結果他につき述べる。

2. 制御上の課題

自動・手動に限らず、土圧式シールド機掘進制御の基本は、シールド機掘進に際してその通過断面の地山を過不足なく掘削し取り込み、土圧バランスを保持しながら停滞なく排土することである。このことによりトンネル近隣の地下埋設物や構造物への影響を極小にし施工することができる。同時に、これは様々な施工状況変化に対し臨機応変な対応が出来てこそ可能である。掘進制御に係わる問題点として、一般的に以下のような課題があげられる。

- ①シールド機は、通常一工事に一機製作が原則である。この機械の構造・機能・能力は設計スタッフにより綿密な検討の結果決定されるが、製作コストの問題や、予期できにくい施工条件に対して常に万全というわけにはいかない。機械の制御特性も大きく異なる。
- ②一現場の中でも、土被りの変化・土質の変化・地下水圧の変化等、施工条件の変化により制御管理目標値が一定しない。
- ③制御に係わるオペレータは、土質変化に対して一人で立ち向かうため、試行錯誤の繰り返しになり、この部分のリスクが無視できない。
- ④熟練オペレータが育って、様々な運転手法を修得しても、培われた経験則は恒久的な情報として残りにくい。

3. 目標とする制御システム

土圧・速度制御システム開発着手時、以下の項目を設計目標とした。

- ①これまで坑内オペレータが操作していた、土圧制御、掘進速度制御に代表される制御要素すべてを地上事務所から遠隔自動制御できること。
- ②土質・地下水圧等現場条件の変化に伴う制御上の目標管理土圧の理論値が容易に検討できること。
- ③製作されたシールド機の能力を十分引き出す自動制御が行えること。
- ④フェイルセーフを基本とした安全性が確保できていること。
- ⑤一般的な土圧式シールドに対して、プログラムを変更せず設定変更により適用システムができあがる汎用機能が充実していること。
- ⑥得られた自動制御の結果が、定量的に評価できるシステムであること。

1) 設計時のシステム構想

上記の目標は、単に自動制御ができれば良いというシステムを目指すものではなく、一次覆工全般が円滑にかつ合理的に進み、その結果が的確に評価できる情報化施工システムの構築を目指している。これを実現させるために、図-1に示す4つの処理ブロックが連携して動作するシステムを基本構想とした。

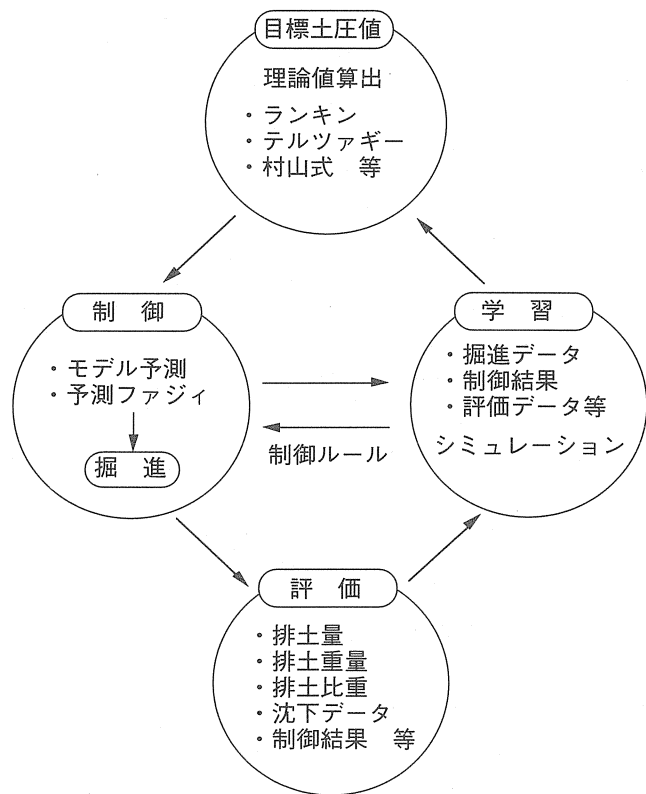


図-1 システム構想

4. 開発したシステム

4. 1 ハード構成

開発した土圧・速度制御システムの付属機器を表-1に示す。一般的な土圧式シールド機に対しこれらの機器の設置により、シールド機製作時に一部制御回路設計上の仕様調整を行うだけで、その構造・機能を大幅に変更することなく自動制御が可能となる。システム概要構成を図-2に示す。

表-1 付属機器

| 項 | 名称 | 型式 | 数量 | 設置場所 | 備考 |
|----|---------------|----------------|----|------|-------|
| 1 | ワークステーション | Σステーション230 | 1 | 事務所 | |
| 2 | 20インチカラディスプレイ | R03L-0008-0258 | 1 | 〃 | |
| 3 | プリンタ | PF6014B | 1 | 〃 | |
| 4 | モニタ用パソコン | FMR70HX3 | 1 | 〃 | |
| 5 | 同上用20インチCRT | FMDPC661D | 1 | 〃 | |
| 6 | カラービデオプリンタ | FMVPR711G | 1 | 〃 | |
| 7 | 伝送装置-1 | DATA-M | 1式 | 〃 | |
| 8 | 伝送装置-2 | DATA-M | 1式 | 坑内 | |
| 9 | 絶縁変換BOX | 自社設計 | 1 | 〃 | |
| 10 | 坑内コントローラ | 自社設計 | 1 | 〃 | |
| 11 | 同上用表示パネル | 自社設計 | 1 | 〃 | |
| 12 | 排出土砂量計測装置 | 自社設計 | 1式 | 〃 | オプション |

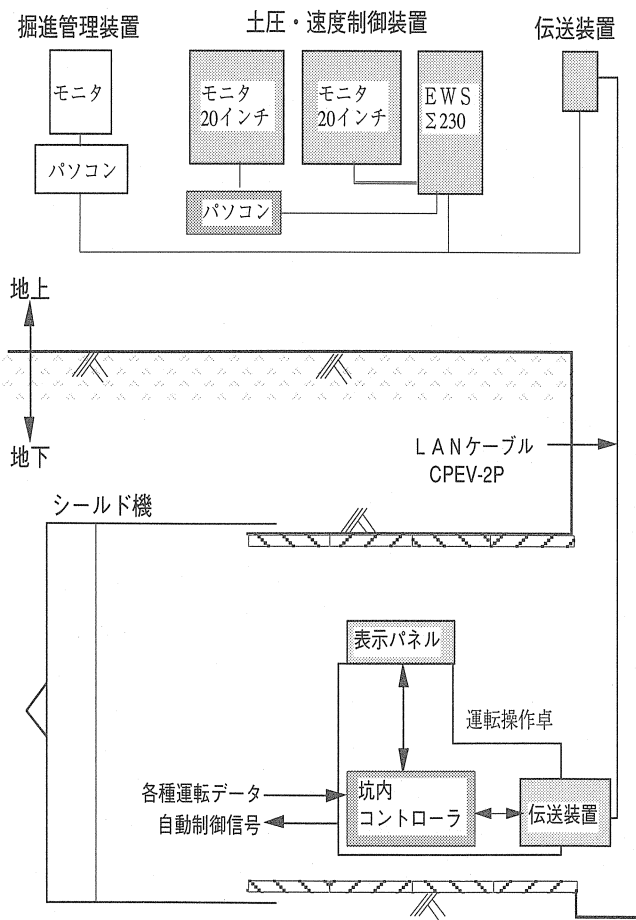


図-2 システム概要構成

4. 1. 1 制御項目

坑内運転操作卓には以下の制御項目に関する、自動/手動の切り替えスイッチが設置される。

- ①カッタ操作
- ②シールドジャッキ速度操作
- ③スクリュウコンベア回転操作
- ④スクリュウゲート開閉操作

いずれの制御項目においても、地上事務所のワークステーションがスタンバイ状態にあり、自動モードが選択されると、対象項目についての自動制御が可能となる。全自動掘進を行う場合は、上記すべての選択スイッチを自動選択する。

4. 1. 2 自動制御の指令

シールド坑内の作業は、掘進作業とセグメント組立作業の繰り返しである。このため掘進作業開始の判断は坑内作業者に任せる必要がある。自動制御の①始動、②中断、③終了の3選択スイッチを、運転操作卓上に置かれた坑内コントローラ表示パネル上に設け、この3つの操作ボタンいずれかの指令により地上事務所のコンピュータが連動し動作する。

4. 1. 3 ハード的な安全装置の具備

安全装置についてはフェイルセーフを基本として様々な角度から検討した。何らかの事情でプログラム上の安全機能が動作しなかった場合、坑内に設置された坑内コントローラのハード装置が優先作動して自動停止をかけるよう設計した。本自動制御システムの緊急停止動作をその作動順にまとめると、

- ①地上コンピュータによる掘進異常停止
 - ②坑内コントローラのハード装置による安全機能
 - ③シールド機自体に元来組み込まれている安全機能
- の3段階構えとなっている。これらの動作状態や地上事務所コンピュータのスタンバイ状態は、坑内コントローラ表示パネルの表示灯にて確認できる。本器の設置状況を写真-1に示す。

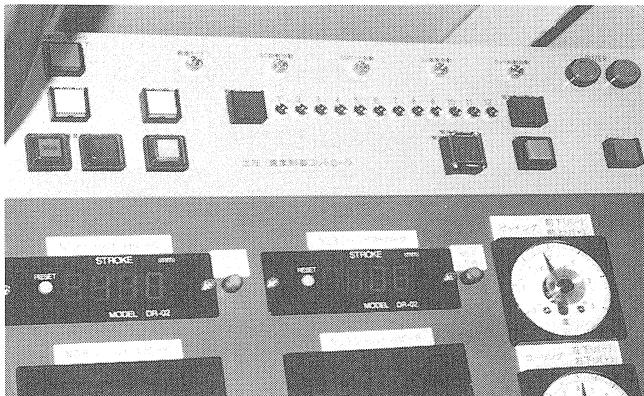
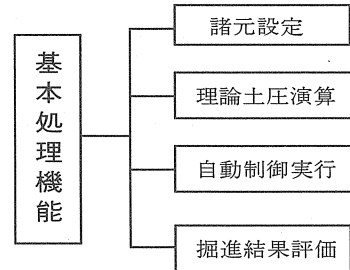


写真-1 坑内コントローラ

4. 2 プログラム構成

制御プログラムの概略処理機能は、以下の4項目に大分される。

- ①理論土圧演算処理。
- ②各種、諸元設定。
- ③自動制御実行処理。
- ④掘進結果評価処理。



4. 2. 1 諸元設定

開発した制御システムが一般的な土圧式シールド機全般に適用できるために、シールド機諸元や適用現場条件をこの項目で設定入力する。高度な汎用システムをめざして、施工情報として必要なデータのほとんどを本設定にて変更可能なシステムとした。

4. 2. 2 理論土圧演算

全施工区間を施工条件上共通した管理土圧で扱えそうな区間に小分割する。各ブロック毎にボーリングデータを入力することにより、理論土圧値をシミュレーションし、目標とすべき管理土圧値を試算・検討する。微妙な土質変化や地下水圧の変化など予想される範囲で変更入力し、理論土圧を確認しながら次々にシミュレーションできる。的確な管理土圧値を掴むための考える道具として、使い勝手を配慮し設計した。

自動制御に用いる目標土圧値は、本理論値と実掘進状況を考慮して、別途、リング毎に設定入力する。写真-2にシミュレーション中のCRT画面を示す。

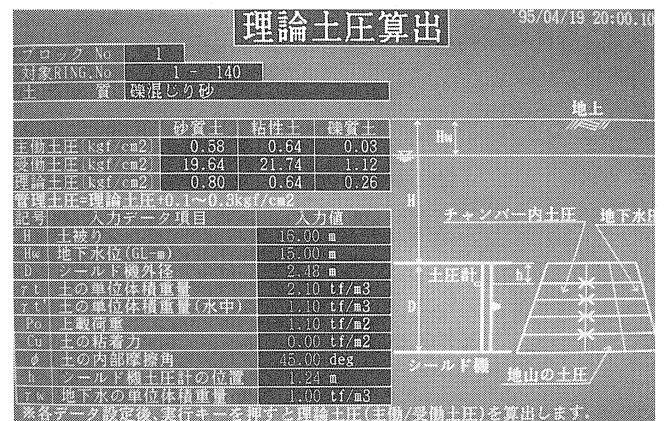


写真-2 理論土圧算出画面

本シミュレーションにて、処理されている基本理論式はランキン、テルツアギー、および村上理論を用いている。写真-2中、中段左上の主働土圧、受働土圧、理論土圧の項目がシミュレーション結果である。

4. 2. 3 掘進結果の評価

掘進結果は、生データ群および統計処理結果のデータ群の2通りに分けられファイルされる。これらのデータを用いた以下の掘進結果評価機能がある。

①掘進状態再現管理（生データファイル使用）。

再現したいリングNO. を選択することにより、運転中にモニタしていたCRTの最終画面を再現表示する。

②掘進結果を用いたシミュレーション（生データファイル使用）。

自動制御の各制御パラメータを様々な角度から検討するため、実掘進データを用いたシミュレーションを行う。これはファジーのメンバーシップ関数やPID制御等の各定数について、実掘進データを用いて最適値を検討するためのチューニングプログラムである。特に自動制御開始前、手動掘進データを用いて各制御定数を定める際有効である。

③統計処理（統計処理データファイル使用）。

1リング掘進後のデータ（土圧、速度、排土量、沈下量、他）の各平均値、標準偏差値、最終値等を汎用表計算ソフト（EXCEL）に吸い上げ、相関集計、グラフ化、帳票等で使用する。工事全般に渡った大まかな評価が可能である。

5. 自動制御内容

5. 1 自動制御概略フロー

図-3に自動制御の概略フローを示す。

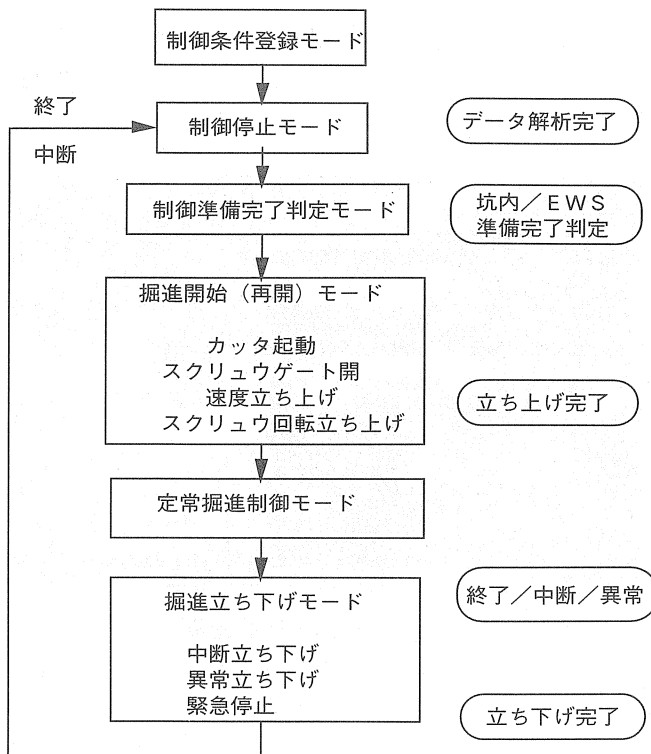


図-3 制御概略フロー

5. 2 カッタ制御

シールド坑内から自動掘進開始指令を受けると、まずシールド機本体の姿勢（この場合ローリング他）を考慮したカッタ回転方向が自動判定され起動する。起動中また起動完了後、常にシールド機の姿勢を監視しシールド機のローリングが過大にならぬよう、状況に応じて反転再起動制御が行われる。

また、カッタトルクの負荷状況によって、

- ①掘進速度変更
- ②カッタ異常警告
- ③カッタ異常停止
- ④自動掘進停止

等の制御モードが起動する。

5. 3 スクリューゲート開/閉制御

カッタ起動制御が無事完了すると、次ステップのスクリーューゲート開制御モードに移行する。

スクリーューゲートの開制御は、ゲートストロークを考慮した多段制御で、土圧等の変動をみながら数秒かけて開動作する。掘進終了モードあるいは中断モードが起動すると、掘進速度減速処理後、数秒かけて閉動作を行う。

5. 4 土圧・速度制御

本システムの中核を担う制御処理部分である。制御は、①立ち上げモード、②定常モード、③立ち下げモードの3モードに分けられ、それぞれ異なった手法で自動制御される。図-4に定常モードフローを示す。本編では定常モードにつき、その概要を紹介する。

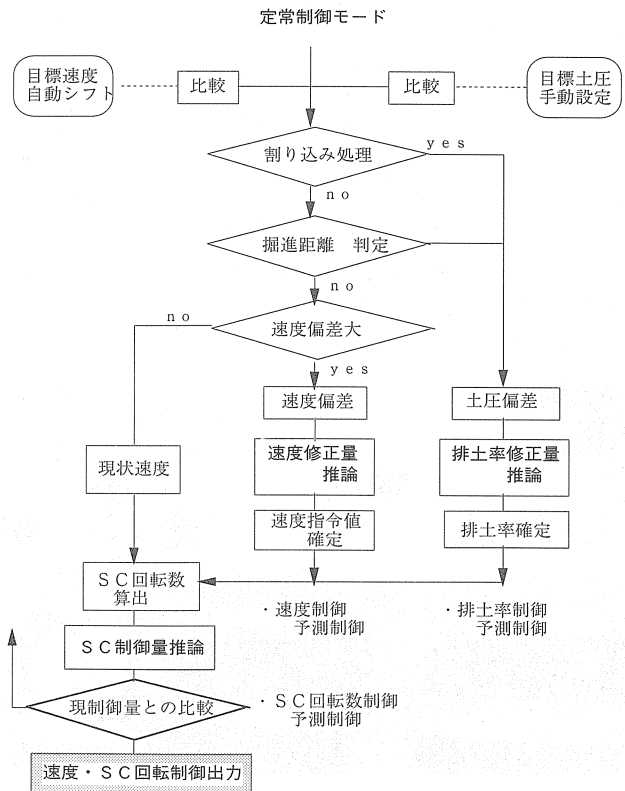


図-4 定常制御モードフロー

5. 4. 1 掘進速度制御

①目標速度設定値の自動シフト

シールド機駆動系の設計能力と実際の負荷状態を考慮し、目標掘進速度を緩やかに自動シフトし、高效率掘進をねらう。

②目標速度値に対する実掘進速度の追従制御

P I D制御が常時動作する。しかし、方向制御の目的でジャッキ選択数が増えられた場合等、一次的に制御追従に遅れがでることがあり、この場合、過去の学習データを用いた予測制御・フィードフォワード制御が数秒間作動する。

③速度制御に対応させる速度センサの選択

一般的にシールド機の掘進速度は、シールドジャッキストロークセンサ測長データの微分値として検出されている。速度制御対象とするセンサはこのスピード計（上、右、左、平均値）いずれの選択も可能である。

④データの平均化処理

シールド機は掘進中、前面・側面の圧力分担不均一により、常に上下左右ギクシャクした動きの中で前進する。このため、データの移動平均を制御対象として用いる。

5. 4. 2 土圧制御

土圧式シールドの自動土圧制御は、これまでP I D制御やファジー制御等の理論を用いた、いくつかの事例が報告されている。これらは、土圧をコントロールするに際し、スクリーコンベアの回転数制御の制御手法としてこうした理論を利用したものである。今回開発したシステムは、土圧制御の制御対象としてスクリーコンベア回転制御を行う点と同じだが、この間に排土率というパラメータを考慮にいたした制御システムを構築した。これは、排土率という定量的な制御情報により、予測制御を容易化することを狙ったもので、掘進速度変化や土質に対する制御特性の変化を学習させるためのものである。

①排土率制御

排土率の定義は以下のとおりである。

$$\text{排土率} = \frac{\text{スクリーコンベア回転によって排出される計算土量}}{\text{掘進速度によってシールド機内に取り込まれる計算土量}} \times \text{排土効率}$$

シールド機掘進中の土圧バランスとは、前方地山を掘削しシールド機チャンバ内に取り込んだ土砂と、スクリーコンベアによって排出された土砂との過渡的なバランスの結果生じる土圧と考えて良い。同一土質の中で掘進速度によって変化する排土効率の違いをある程度予測できれば、土圧制御上のトライ&エラーは減少する。そこで、過去最新10リングの掘進特性（土圧変化量－排

土率相関）を学習し、目標土圧に収束させるために用いるべき排土率を予測しながら実制御する。写真-3に実制御に用いた排土率とその結果変化した土圧の相関結果の例を示す。この場合の実例から判ることは、

- ①当該土圧を維持する排土効率は、約50～60%である。
- ②土圧を0.1kg/cm²（9.8キロパスカル）制御するためには、約10%の排土率シフトが必要である。

上記を予測情報として、ファジー制御・割り込み処理等を駆使し実制御する。

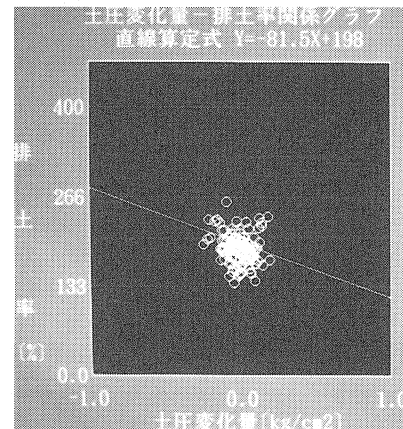


写真-3 排土率-土圧変化量相関

②スクリーコンベア回転数制御

前項①により、目標土圧値に対する現状土圧の偏差を補正するために排土率が推論される。次にこの排土率を実制御に与えるためのスクリーコンベア回転数が掘進速度との関係で演算される。この演算されたスクリーコンベア回転数を確実に得るために、さらにここでも予測制御を用いる。写真-4に最新過去10リングのスクリーコンベア制御特性の実例を示す。写真-4中、対角線の薄い実線は、与える制御量と実回転数の設計データである。実際の制御特性は幾分か効率低下している。この結果を用いてスクリーコンベア制御信号を与える。

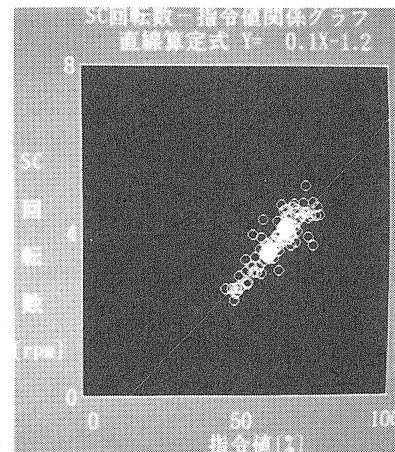


写真-4 スクリュー回転数-指令値相関

6. 現場実証実験

本システムの実証は、大阪支店神祝新川雨水幹線シールド工事にて行った。当現場は300mm径の巨礫がでる土質条件で、しかも50%の下り勾配のため、土質変化・土被り・地下水圧の変化が極めて大きく、自動制御の現場としては、相当厳しい施工条件下での実証となった。

・工事概要

- 一次覆工施工期間：平成6年3月～11月
- シールド機：外径2.480mφ、ディスクカッタ装備
- 施工延長：721.45m
- 施工最小曲線半径：150m
- 施工勾配：-50‰
- 土質：玉石混じり砂礫 N値30～60

6. 1 自動制御結果

図-5に自動掘進時、重要制御項目のデータを示す。

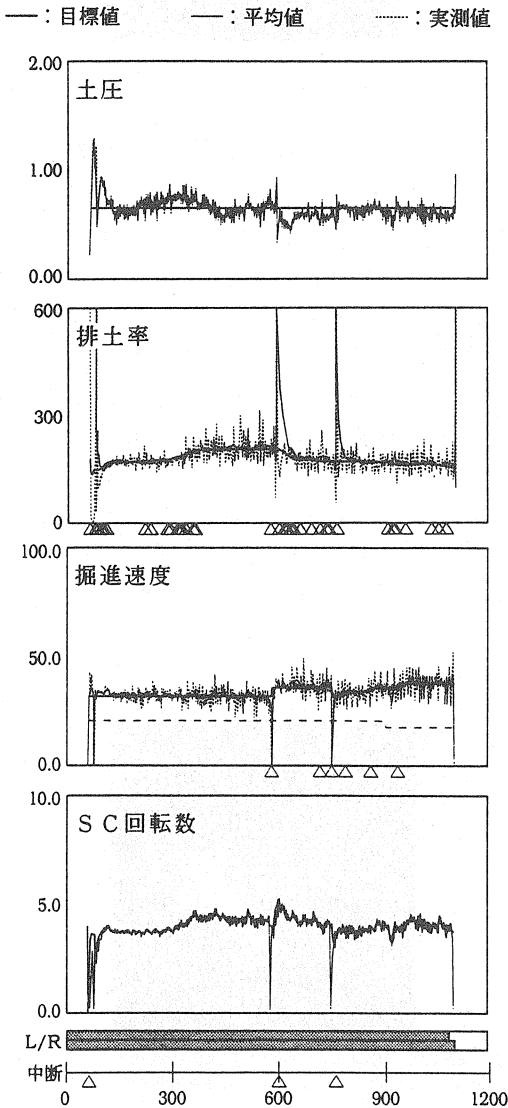


図-5 自動掘進データ

6. 2 現場事務所機器配置

写真-5に当神祝新川雨水幹線シールドでの自動制御用機器配置状況を示す。



写真-5 事務所機器配置

6. 3 自動制御のまとめ

当現場の実証実験により、今回開発した「土圧式シールド機の土圧・速度制御システム」において以下の内容につき確認した。

- ①シールド機の通常運転操作に関して、オペレータが坑内運転席にて行っていた制御要素すべてを、遠隔地上事務所から連続して自動制御できる事を確認した。
- ②上記の制御効果は、少くとも熟練オペレータと同レベルの制御効果があることを確認した。
- ③設定されたシールド機の設計能力の範囲で、徐々に目標値を高効率制御へ向けシフトすることを確認した。
- ④ハード、ソフトの様々な異常を強制的に発生させ、このときの緊急停止動作等、安全機能に問題がないことを確認した。
- ⑤今後の課題として、排土効率の学習効果をさらに多くの土質で検証し、土質と機械と操作法における、定量的なノウハウの確立をめざしたい。

7. あとがき

今回開発し現場実証した土圧式シールド機の土圧・速度制御システムは、数年前計画した「シールド機掘進の自動化の開発」という長期テーマの中の一要素技術として完成したものである。今後は、本システム以外の既開発システムとの統合化をはかり、さらに完成レベルを高めたいと考えている。

当開発に当たり、ご助言・ご指導を頂いた関係各位、および実証実験を行った神祝新川工事事務所の皆様に深く感謝するとともに、さらに今後のご支援をお願いするものであります。