

○

(株)奥村組 本社土木部 石井博之、氏本幸伸、北崎和博

1. まえがき

シールド工法の品質向上、急速施工、省略化などを目的とする施工機械の自動化の研究は、自動測量装置の開発をはじめとし、泥水推進工法（OAMS/A工法）を対象とした小口径機（ $\phi 600 \sim 800$ mm）での遠隔施工法（OAMS/PS工法）の開発へと進められてきたが、今回、自動化をさらに進め、状況判断と機器操作にまで自動制御を行う全自動泥水推進工法（OAMS/A工法）を開発したので、その概要を述べる。

2 泥水推進工法

0AMS/A工法の母体となる泥水推進工法とは、図-1に示すとおり、泥水シールド機で掘削しながら、その後に接続した管を立坑の圧入装置で圧入して管列を築造するものである。シールド機のカッターヘッドで掘削した土は、カッターヘッドの裏側の隔壁で地上から送られた水と混合し、泥水として搬出される。さらに地上の水槽で、適切な分離装置によって土と水とに分離する。この泥水圧を、切端に作用する土圧とバランスさせることにより、切端の安定が図られる。圧入は、シールド機の掘削能力に応じた推進速度となるように圧入装置によって速度を調整しつつ行なう。また、シールド機の方向修正ジャッキで、シールド機と圧入管の軸芯にある角度を持たせた状態で推進することによって、計画線とのずれを修正する。圧入と同時に圧入管の外側に滑材を注入して地山との摩擦力を低減させる。この注入は、シールド機に接続された1本目の管の注入口から行ない、シールド機到達後は、管のジョイント止水のための補助注入を各管の注入口から行なう。このように、本工法は、高度に機械化された施工法であり、優れた地盤適応性や施工性を有しているが、この特徴を生かすためには、機械の運転管理技術もまた高度なものが要求される。すなわち、シールド機をはじめ、圧入装置、環流設備、滑材注入設備、泥水処理設備など種々の設備機械が、同時に、連続的に、かつ、掘削と同調して稼動するため、機械稼動状況を把握しつつ、これ等の操作時期、操作量を的確に判断する必要がある。

3. 自動化の目的

通常の施工法では、地上の集中監視盤に必要な計測データを集めて表示し、熟練した技術者の一元的な管理手法によつて機械の操作が行われている。この運転管理技術は、多くの経験に基づいた技術者固有の所産となりがちで、容易に習得できないとも言える。また、シールド機の掘進方向の精度管理に関しても、現状では、測量を人手作業で行っているため、方向修正の作

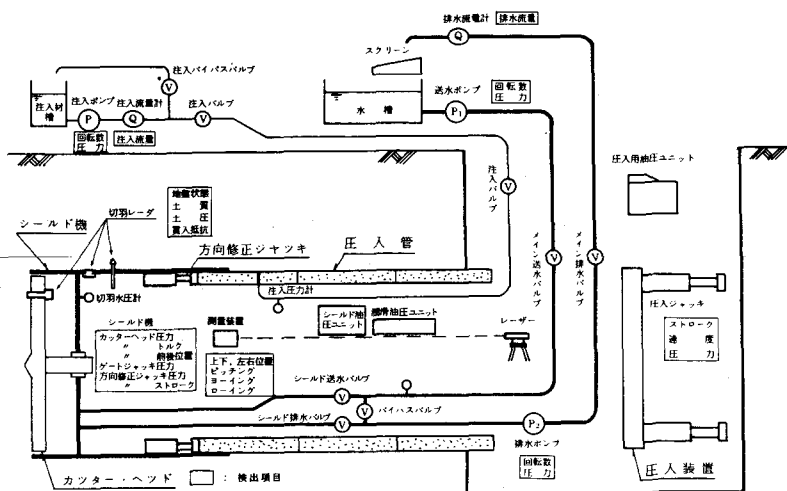


図-1 OAMS/A工法の機器および検出器の構成

業時には測量が困難であり、修正のタイミングや操作量の判断に的確性を欠く場合がある。後者の問題の解決は、自動化の第Ⅰの狙いであるが、自動化への取組みにおける副次的効果として前者の運転管理技術の標準化の問題も解決されてゆくと考ええる。換言すれば、自動化を行うことによって、施工の精度、信頼性、速度などが向上し同時に、測量人員や運転管理技術者の省人化が期待できると考え本工法の開発を行った。

4 自動制御の対象と種類

泥水推進工法の基幹作業であるシールド機の推進工程を自動化の対象とし、この工程のなかでも、同時に、かつ関連性を有しつつ稼動する ⅰ)シールド機 ⅱ)圧入装置 ⅲ)環流設備 ⅳ)滑材注入装置 の4系統の機器操作を総合的に行うことにした。推進工程における付帯工種として、泥水処理、滑材混練、圧入管セット、などがあるが、これらは、シールド機の掘進と必ずしも同調するものではなく、制御システムの一環として取り扱うメリットが小さいと考え、対象から除外した。操作項目は、表-1に示すとおりである。

これらの制御対象は、プロセス制御とフィードバック制御に大別できる。前者は、状態の変化や時間の経過にもなつて機器の運転、停止を行うもので、工程の進行を定められた手順と様式で行なう。この制御ではモーターの ON-OFF やバルブの開閉などが具体的対象であり、主として2ポジションの1つを選択する。制御対象には、フィードバック制御そのものを開始したり終了したりすることを含むもので、全体制御系から見ると、プロセス制御が骨子となる。後者は、望ましい状態を維持するものについて行い、工事条件に応じた設定値と、他の項目を計量した値とを基準として、量的な調節制御を行う。この制御には、ⅰ)シールド機の姿勢 ⅱ)圧入速度 ⅲ)切端水圧 ⅳ)環流水量 ⅴ)滑材注入量 の5項目が対象となる。これらの操作と調節は、各機器の稼動状態の相互関連において決定されるので、その判断に必要な各機器の稼動状態

表-1 操作項目

装置	操 作 項 目	手 動	自 動
シ イ ル ド 機	・ カッターヘッド回転 (ON, OFF)	○	○
	・ カッターヘッド正転、逆転切換え	○	
	・ ゲート閉止油圧力	○	
	・ 方向修正ジャッキ押引	○	○
	・ 潤滑油ユニット (ON, OFF)	○	○
	・ シールド油圧ユニット (ON, OFF)	○	○
圧 入 装 置	・ 圧入ジャッキ速度	○	○
	・ 圧入ジャッキ押引	○	○
	・ 圧入油圧ユニット (ON, OFF)	○	○
環 流 設 備	・ 切端水圧 (P1ポンプ回転数)	○	○
	・ 送水圧 (P1ポンプ回転数)	○	○
	・ 排水量 (P2ポンプ回転数)	○	○
	・ P1ポンプ回転 (ON, OFF)	○	○
	・ P2ポンプ回転 (ON, OFF)	○	○
	・ メイン送水バルブ、排水バルブ (開・閉)	○	○
	・ シールド送水バルブ、排水バルブ (開・閉)	○	○
	・ シールドバイパスバルブ (開・閉)	○	○
滑 材 注 入 装 置	・ 注入ポンプ回転 (ON, OFF)	○	○
	・ 注入量 (注入ポンプ回転数)	○	○
	・ 注入バルブ、バイパスバルブ (開・閉)	○	○

を検出器で検出し、そのデータは制御装置に入力している。検出結果と制御状況はこれまでの方式と同様に監視者のために表示する。状況のすべてを表示することは、自動制御では本来は不要であるが、開発において過渡的に制御状態の確認や、制御の良否を評価する必要があること、制御装置の設置調整時の検査に利用することなどを考慮して組入れた。なお、自動制御が不調のときは、手動に切換えることができる。この場合、すべての機器は、遠隔操作によることになる。

5. 制御内容

(1) プロセス制御

シールド機の掘進開始から終了までの工程の進行は、現行の方法と同様である。図-2に推進工程のフローを示す。このフローは、3段階に大別できる。すなわち、運転開始から定常状態に至る始動段階、定常運転段階、1サイクルの掘進終了段階である。始動段階では、前述の4系統の機器の各操作項目を順次に始動する。この順次始動の判断基準は、主として時間を基準としており、この値は任意に設定できる。定常運転段階では前述の5つの項目についてフィードバック制御を行う。また、この段階では、運転が正常であるかどうかを自動的に監視し、異常があれば停止することなどの必要な処置を施す。この処置により一部の制御不良が生じたとき、それが全体制御系に

及ぶことを防いでいる。ノサイクルの掘進が終れば終了段階に入る。この停止順序は、始動時とはほぼ逆である。掘進終了の判定は、圧入ジャッキのストロークによつて

(2) 姿勢制御

シールド機を計画線に沿つて掘進させるため、自動測量装置によつてシールド機の姿勢を測量し、必要があれば、掘進方向の修正を行う。自動測量装置は、検出部とデータ処理部から成る。シールド機に取付けた検出部では、後方からのレーザー光を受け、光学的方法によつて計画線に対するシールド機の変位と傾きを各々のターゲットにスポットとして結像させる。これを内蔵の小型テレビカメラで撮影し、その画像信号をデータ処理部へ送る。ここでは、信号を処理してスポットの位置を計数値として出力する。この装置によつてシールド機の下上変位、左右変位、前後の傾き（ピッチング）、左右の傾き（ヨーイング）の4つの要素を検出できる。検出結果から

修正の必要性の判断が行われる。その判断基準は、計画線を中心とするある幅の領域を設定して行う。すなわち、シールド機の変位（A）と傾き（B）とを、ノ次関数（ $0 = A + \alpha B$ ）で合成し、0値が、管理領域内にあるかどうかで判断する。係数 α は、管理領域内での修正が可能とするように設定する値である。方向修正の制御は、方向修正ジャッキに対して行い、修正に用いるジャッキの選択と、そのストロークが対象となる。これらは油圧の切換弁の作動と置き換えることができるので、作動の時期と量を制御すればよい。ジャッキの選択については、測量結果の鉛直、水平方向成分を組合わせてシールド機を修正すべき方向の対称位置にあるジャッキを加圧し、他のものはフリー状態とする。

(3) 圧入速度

圧入装置の圧入速度は、シールド機の掘削能力と調和したものでなければならない。すなわち、速度が高すぎれば、シールド機カッター・ヘッドの圧力とトルクや環流排土能力の不足が生じ、また低くすぎれば、施工能率が低下する。従つて、カッター・ヘッドの圧力とトルクを基準に圧入速度を自動的に決定することにした。すなわち、切端水圧に対して必要かつ安定な圧力となるよう速度を選択し、このときのトルクが所定値を越えれば、圧力値とトルク値の等価加算値を求め、その結果から速度を決定する。なお、圧力には、カッター・ヘッド押付け油圧機構の油圧力を、トルクには、カッター・モーターの電流値を各々交換し、制御装置へ送る。

(4) 切端水圧と環流量

切端水圧と環流量は、安定した掘削を行うために所定の値に保つ必要がある。これらの外乱要因には、搬送土量、泥水濃度、管路長などがあり、掘進時には、かなりの状態変化があるので、通常は可変回転型モーター付の環流ポンプを用い、これを自動制御の対象としている。

(5) 滑材注入量

圧入管外周の摩擦抵抗力を減じるための管外周への滑材注入は、シールド機の進行とともに形成される空間を満たす必要があり、注入量の過不足をなくするためにシールド機の進行のタイミングと同調して注入する。注入量は単位時間あたりに形成される空間と等量にすることが同調注入の場合には重要であるので、注入量を制御している。空間の形成速度はシールド機の掘進速度と通常10～20mmのテール・クリアランスで決まる。従つて、掘進速度

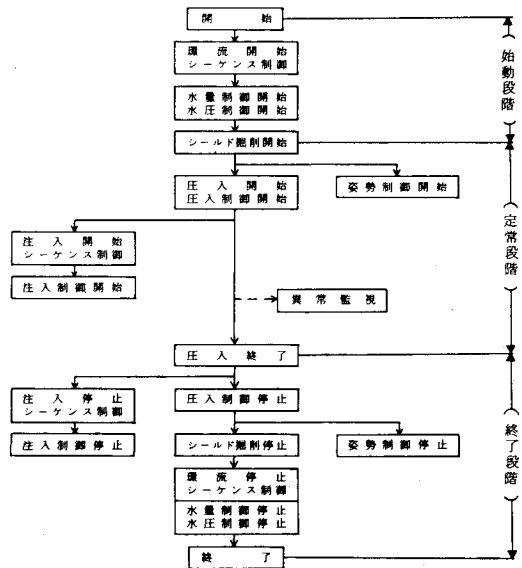


図-2 推進工程制御フロー

に応じた単位時間あたりの注入量となるように制御する。

6. 制御装置

制御装置は、図-3に示すように、検出部、演算部、操作・表示部、記録部、制御部から構成されている（写真-1参照）。

検出部は、運転者の目や耳などの代替となるもので、ジャツキのストローク、ポンプ回転数、シールド機の変位など連続した物理量を検出するもの（アナログ式）と、スイッチのON-OFFのように2つの動作を検出するもの（デジタル式）から構成される。前者は制御量を逐次変更しなければならない場合に、後者は運転動作が2種類または3種類のいずれかを選択する場合に用いている。使用している主な検出器は、傾斜計、ストローク計、自動測量装置などである（図-1参照）。

演算部は、本制御装置の中核となるもので、5で述べた制御演算と、検出結果や計算結果を出力するための演算を行い、プログラマブル・コントローラと中央処理装置の2台のコンピューターで構成される。前者は主としてデータや制御信号の入出力とロジックコントロールを、後者は主として四則演算、論理演算、アナログ入出力処理などを受ける。

操作・表示部は、指令した内容、制御状況などを集中監視盤に設けたメーター、ランプ、またはカラー・グラフィック・ディスプレイに表示する機能をもち、これにより、掘進や機械稼動状況を確認することができる（写真-2参照）。

記録部は、シールド機の変位と傾き、ポンプの回転数などの計測データや、方向修正ジャツキ、排水バルブなどの制御結果の記録を行うもので、プリンターとフロッピー・ディスク装置を利用している。

制御部は、人間の手や足の代替となるもので、機械の駆動を行う。演算した結果の制御信号は、制御機器へ送られ、この駆動を行う。プログラマブル・コントローラから出力された信号は、電氣的に微弱なので制御にあたっては、直接モーターやバルブを駆動する制御盤に送り駆動を制御する。制御機器の主なものは、リレー、電磁弁、ジャツキなどである。

演算部、検出部、制御部間の信号は、テレコン・テレメーターによって連続信号に変換されて転送される。また、この転送経路には、光ファイバーを用いている。

7. あとがき

本工法は、実際の下水道工事に採用され、極めて良好な成果を得ることができた。今後も、コンピューター利用技術を大いに活用し、施工技術の向上を図ってゆきたい。なお、建設業にとつて、工事のロボット化は避けて通ることのできない重要な課題と言え、本工法が、シールド工事以外の工種も含め、ロボット化への取組みの一助となれば幸である。

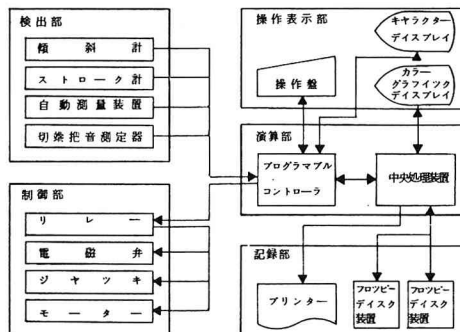


図-3 制御装置の構成

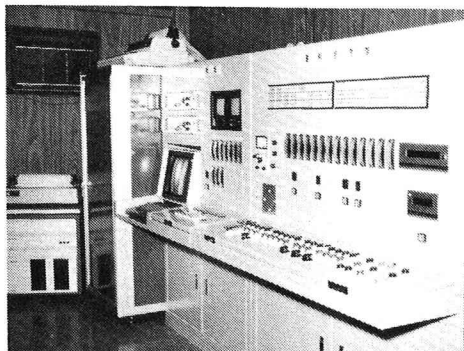


写真-1 制御・管理盤

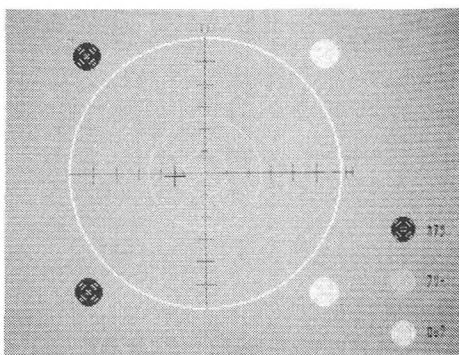


写真-2 ディスプレイ表示の一例