

シールドトンネル施工における掘進制御

CONTROL SYSTEM ON DRIVING SHIELD

田中博三*・園田徹士**

By Hirozo TANAKA and Tetsushi SONODA

まえがき

シールドトンネル施工に際しては、地盤の性状・構造物の用途や諸元・施工環境などから決定される機種および施工関連設備と、施工管理上に必要な設備など、種々の面からの検討が求められる。前者に対しては、多くの型式の掘進機の開発が進められ、今日では大部分の地盤に対して効果的な機種の選定が可能となっている。しかし、後者に対しては、管理技術者の経験的な判断によっているのが実体で、極端な場合は同一現場で昼夜の技術者の交替によって判断が違い、与えられた線形にシールドトンネルを施工するための管理手法に不統一な部分がみられる。特に線形管理に関してはシールドトンネル内での、常時の線形測量が困難であるばかりでなく、トンネル作業を阻害する要因となって、測量による線形管理に対して十分な管理の行いがたい状況にある。

一般的な条件におけるシールド掘進機（以下掘進機という）の掘進速度は、日進数mから十数m程度であるが、既応の資料を分析すると、上述した測量の頻度とリアルタイムなフィードバックが、完成したトンネル線形の精度に多大な影響を与えていることが判明している。掘進中の切羽の保持は、シールドトンネル施工で最も重要な課題であり、過去の例でも路面陥没や地盤沈下など、シールドトンネル施工に伴う種々の影響が発生している。近年、大断面シールドの機械化が進むなかで、掘進中の切羽状況をリアルタイムに把握し、発生する諸現

象に早急な対応が取れる管理体制が求められている。

このような背景から、シールドトンネル施工における掘進制御の自動化に機械・計測器メーカーなどが早くから取り組んでいる。しかし、これまでの取り組みは、掘削土量と排土量を調整して土圧を一定に保つ制御、注入量を一定に保つ制御、また、測線上に設置した機器により掘進機位置のずれを測定する装置など、シールドトンネル工事のなかの特定部分に対する自動化であり、各々独立したシステムであった。

シールドトンネル工事の管理は、坑内、坑外のデータを一元的に集め、総合的に判断して行う必要がある。今回はこれらの中で、方向制御を含めた掘進管理システムを、既存の土圧制御装置などと新たに開発した自動測量装置・ジャッキ制御装置・光データ通信装置などと組み合わせ、これらの装置を総合的に管理するシステムを作成した。

本文は、これらのシステムの開発経過と、利用状況、および今後の問題について述べるものである。

1. 従来のシールド制御の問題点

(1) 位置の測定

シールドトンネル施工時の測量における役割は、一般の構造物測量と異なり、掘進機の方向を制御して地中を三次元的に移動させ計画された位置にトンネルを構築するための基本資料の提供である。

そのため、測量に際しては、掘進機の位置と姿勢や計画ルートからのずれなどを常に把握する必要がある。

従来の掘進機の制御としての測量には、一般の測量方

* 正会員 (株) 問組 土木本部技術部次長
(〒107/東京都港区北青山 2-5-8)

** (株) 問組 横浜支店末吉共同溝作業所所長
(〒231/神奈川県横浜市中区海岸通り 4-23)

法を利用しているため、以下に示すような欠点がある。

- ① 測量時間が長い。
- ② 計算が煩雑で、土木技術者が対応しなければならない。
- ③ 掘進機が移動するごとに測量が必要なために、測量技術者が現場に常駐しなければならない。
- ④ 位置測定の時間が、作業工程のきめどとなる。
- ⑤ 測定頻度が少なくなると、施工精度が悪くなる。

(2) 方向制御

掘進機の方角制御は、測定された掘進機の現在位置と計画路線との位置関係により、計画路線上を掘進機が進むために必要な方向制御量を求め、掘進機のオペレーターに指示し、オペレーターは指示された方向に掘進機を修正しつつ掘進することにより行っている。

この場合、方向修正量を決めるのは経験豊富な技術者の判断により求められ、オペレーターの指示は定性的に行われている。指示を受けたオペレーターも、運転技量により修正される量に大きな差異を生じ、一度蛇行が発生するとその修正と施工精度の確保には多くの困難を伴う。

(3) 切羽の安定

シールドトンネル工法における切羽安定の方法は、時代とともに大きく変化している。

当初は、圧縮空気を利用した切羽開方型の圧気シールド工法が一般的で、その後液圧を利用した泥水シールド工法、泥蔴材を利用した土圧系シールド工法と変化し、制御も気体から液体としたいに高度な技術が必要となってきている。

圧気工法では、ロックマンによる圧力制御が可能であるが、泥水制御・土圧制御はオペレーターの直接操作による制御では困難である。そこで、各メーカーが電子技術を応用した制御システムを開発し実用に供用している。

しかし、切羽の安定を図るために必要な設定値を決めるのは技術者の経験により行われているのが現状である。

2. 開発手順および成果

従来のシールドトンネル施工の掘進制御法が持っている問題点を解消するため、昭和52年頃から以下の順序で逐次開発を進めた。

(1) 掘進機方向修正方法の把握

掘進機の方角を修正する場合、オペレーターはジャッキ

の推進を止めてストロークを測定し、修正量を確認する方式によっている。

したがって、ジャッキストロークを常に把握できれば方向修正が正確になると考え、ポテンショメーターを利用してストロークを電気信号に変換し、運転席にデジタル表示できるジャッキストローク計を開発した。

利用した結果は、計器の構造上から見て測定精度は十分ではなかったが、運転中の目安となり蛇行が少なくなった。

(2) 掘進機位置測定方法の標準化

掘進機の位置の測定方法、計算方法、結果の表現方法が個々の技術者で違っていたので標準化を試みた。方法は、座標管理とし、方眼紙に20分の1の縮尺で計画路線を書き、測定結果をプロットして図上で実測路線とのずれや、方向のずれを求めた。

座標管理での問題点は、座標管理図を作成するために計画路線1mごとの座標値が必要であり、また、頻繁に行う計算が煩雑であり、計算ミスが多発した。

そこで、計算にプログラム電卓を利用した標準化を考え、次のプログラムを開発した。

- ① 直線座標の計算
- ② 円曲線座標の計算
- ③ トラバース測量の計算
- ④ 掘進機の位置座標の計算

①、②は管理図作成のための計画路線座標を求めるために利用し、③は坑内のトラバース測量計算に、④は掘進機位置の計算に利用した。

このプログラムの特長は、測量した生データを対話方式で入力できることと、現場の測量を簡単にするため、たとえば④のプログラムでは、測定位置でのセグメント組立No.を入力することにより距離の測定を省いた。

当時利用したプログラム電卓は記号入力方式で、255ステップと容量が少なく、一つのプログラムしか記憶できず、別の計算を行うたびにプログラムの入れ替えが必要であり入力ミスの発見に苦労した。

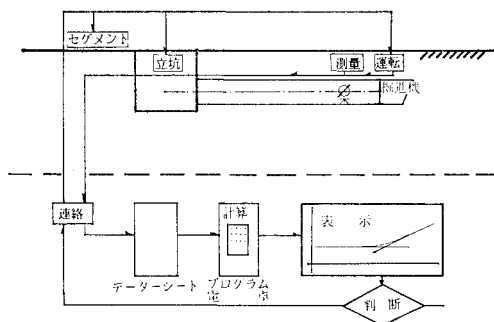


図-1 管理システムフロー

図-1 に、管理システムのフローを示す。

結果は、シールド位置の測定が簡単なために測定頻度が高くなり、施工精度が向上した。座標計算はプログラム電卓にデータを入力するだけで結果が求められるため、容易に利用できるようになった。

このシステムは、岩手県の北上川流域下水道工事で利用した。従来は、土木技術者が現場に出て測定し、事務所に戻って計算して位置を把握し、方向修正を現場に行ってオペレーターに指示していたが、当工事では、測定したデータを事務所に電話連絡して事務所で事務員が計算し、管理図に現在位置を記入し修正量を数値で求め、オペレーターに電話で指示した。

このシステムでデータを送ることにより、制御のための作業を別々に行うことができ、しかも、特に掘進機制御の経験が無くとも何ら支障ないことが判った。

(3) マイクロコンピュータによる演算解析システムの開発

ここでは、マイクロコンピュータにより、シールド制御の演算解析を試みた。

システムの機能は、図-2 に示すように、データのキーボード入力により掘進機位置を演算し、計画路線からのずれ量を解析して、さらに測定された現在位置から計画路線に対する修正量を求めることができる。特長は、計画路線データ・演算解析プログラムは、すべてリード・オンリー・メモリー (ROM) に記憶させ、現場における勝手な計画路線とプログラムの変更を防止して、システムの信頼性確保と、ミスを防いだ。トラバース測量や掘進機位置などのデータを停電による消失から防ぐために、特に、コアメモリーを組み込んだ。

写真-1 に方向修正解析の CRT 表示を示す。

このシステムは、横浜の電力洞道工事で利用したが、以下の事柄が判明した。

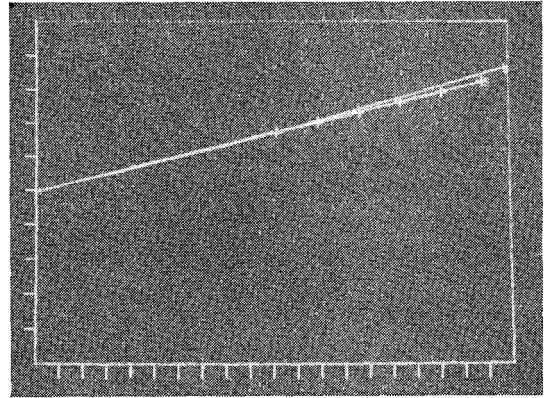


写真-1 方向修正解析の CRT

- ① 水平方向の方向修正量は、ほぼ解析結果と同じであった。
- ② 縦断方向の方向修正量は、地質などの条件により大きく変化する。図-3 に実測例を示す。
- ③ 掘進機の位置は、掘進機の2点を測定することにより把握できる。
- ④ オペレーターへの運転指示は、ジャッキストロー

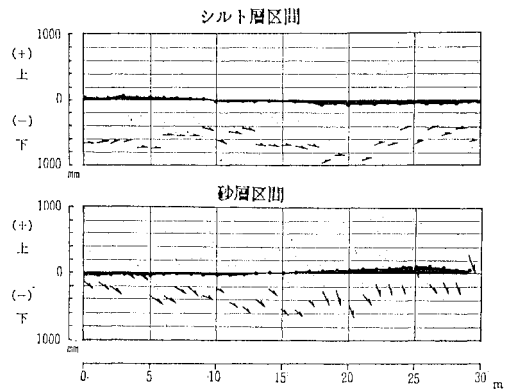


図-3 異なる土質中での掘進機の方向の実測例

ク差を指示することにより定量的に可能である。

- ⑤ 掘進方向の制御は、掘進中に指示されたストローク差を保持することで可能である。
- ⑥ 掘進機方向制御は、ジャッキ使用数を変化させて行い、推進速度とは無関係である。

以上のデータが、システムの利用により定量的に把握できたので、掘進機の位置測定とジャッキ制御装置開を発することにより、位置測定・演算解析・方向制御までの自動化の可能性が生まれた。

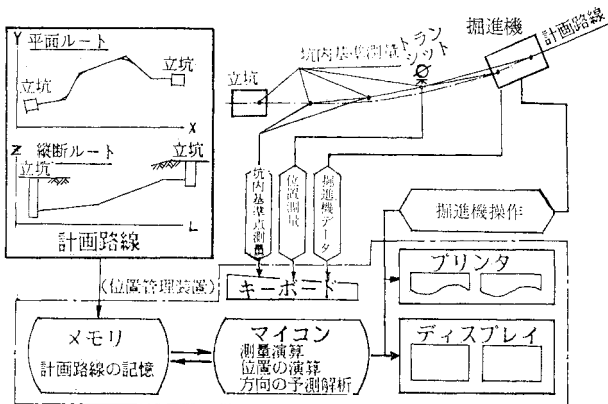


図-2 掘進機の位置管理システム

3. シールド制御の自動化に必要なシステムの選定

2. の結果をふまえて制御の自動化に必要なシステムを以下のように選んだ。

(1) 掘進データの収集方法

制御の自動化は、切羽安定制御と方向制御が干渉せず両立し、また、自動制御時あるいは手動制御時でも制御状況を把握できるデータ収集装置が必要である。

土圧系シールド掘進の制御の例としては、土圧・泥蔭注入・裏込注入などの既存の制御装置と自動測量装置・ジャッキ制御装置とを組合せて、方向・切羽安定・泥蔭・裏込の制御とこれらのデータの収集を行う。データ収集は、各制御装置が持っている圧力や流量などのセンサーからの信号を光データ通信装置により中央のコンピュータに直接入力して行う。また、制御信号の伝送も光データ通信装置で行う。

(2) 自動測量装置

掘進機の位置測定装置には、方位ジャイロ、レーザー光と CCD カメラ、レーザー光とトランシットの組合せ等が利用される。以下にそれぞれの特長を示す。

a) 方位ジャイロによる方式

掘進機の方位測定には有利であるが、後方測点までの方位角、距離の測定には複雑な装置が必要である。図-4 に、測定モデルを示す。

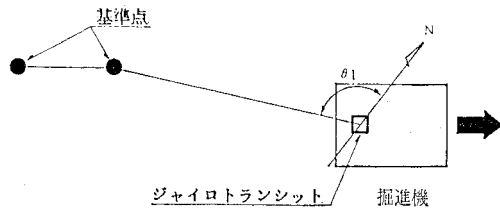


図-4 方位ジャイロによる方法

b) レーザー光と CCD カメラによる方式

レーザー光を決められた方向 (測量線) に固定し、掘進機に設置した CCD カメラにより測定する。

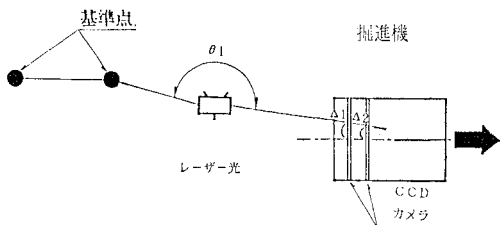


図-5 レーザー光と CCD カメラによる方法

この方式は、ローリング修正や測定範囲の問題と、レーザー発光器を決められた位置に正確に設置しなければならない。図-5 に、測定モデルを示す。

c) レーザー光とトランシットによる方式

トランシットの視準方向を決めるために、光軸にレーザー光を通し、掘進機に設置したターゲットの方向を測定し、光波計により距離を測定する。

この方法は、従来の測量をそのまま利用しているために信頼性が高い。図-6 に測定モデルを示す。

各々の方式の特長と周辺機器の開発状況を総合的に判断して、レーザー光とトランシットの組み合わせによる自動測量装置を開発することとした。

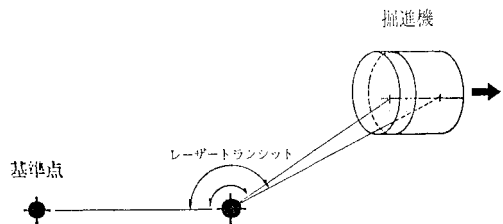


図-6 レーザー光とトランシットによる方法

(3) ジャッキ制御装置

掘進機の推進ジャッキの制御は、ストローク・推力・使用ジャッキ数を変化させることによって行うことができ、それぞれの制御方式には、次の特徴がある。

a) ジャッキ・ストロークを制御する方法

各々のジャッキのストロークを機械的に変化させて制御を行うが、地盤条件により必ずしも制御方向と掘進機方向とが一致しないばかりでなく、制御装置が複雑で大きくなるなどの問題点がある。

b) ジャッキ推力を制御する方式

掘進ジャッキ各々の推力を変化させて制御を行うが、利用圧力に限界があること、多数の油圧ユニットが必要などの問題点がある。

c) ジャッキ使用数を制御する方式

掘進機には多数のジャッキが設備されているが、その中の使用ジャッキの台数を変化させることにより方向を制御する。この方式は従来の運転方法であるが、使用ジャッキ台数の変化に対する方向変化量は、地質条件により変化し、高精度な相関性は把握されていない現状にある。

上述したような特徴が判明し、さらに位置測定データにより変化量が把握できること、実績があること、装置が簡単であることよりジャッキ使用数を変化させる制御装置の開発を行うこととした。

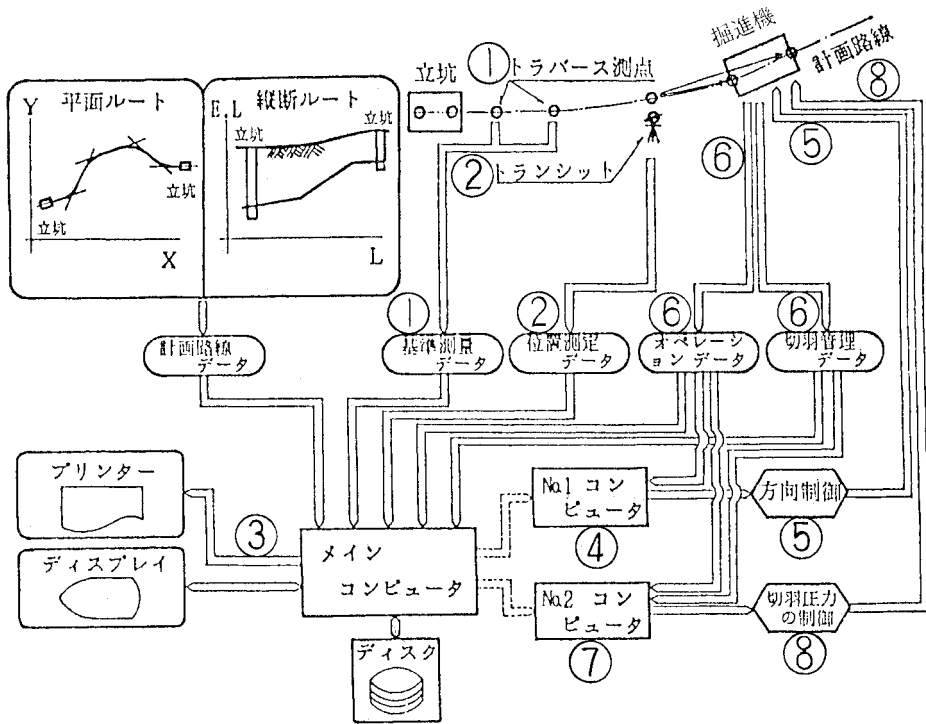


図-7 制御システムの概要図

4. 開発した自動制御システム

(1) シールド自動制御の概要

自動制御は、地下トンネル内の位置測定・掘進機データ・掘進データを受ける各種のセンサー類と、地上コントロールセンターで演算解析を行うメインコンピューター、掘進機の方角制御を行う方向制御コンピューター、掘進データの解析を行う掘進管理コンピューターと、センサーと各コンピューター間を結ぶ光ファイバーケーブルによるデータ通信システムにより構成される。図-7にシステム概要図を示す。

掘進機の制御は、方向制御と切羽安定制御に分けて次のように行う。

方向制御は、① 坑内のトラバース測点から、② 自動測量装置により掘進機位置を測定し、③ 地上のメインコンピューターで演算解析し、④ 方向制御コンピューターで、⑤ 掘進機のジャッキを制御して行う。

切羽安定制御は、⑥ 掘進機切羽に取り付けたセンサーにより切羽データを、また、掘進機のセンサーよりオペレーションデータを、⑦ 切羽管理コンピューターに入力し、演算解析し

た結果を技術者が判断して、⑧ 掘進機の土圧制御装置の設定値としてフィードバックすることにより行う。

(2) 位置自動測量装置

掘進機的位置測定は、坑内に設けた測点よりレーザーデジタルトランシットとレーザーターゲットより構成された位置測定装置により行い、姿勢は掘進機に取付た傾斜計、ストローク計により測定する。

a) 機器の構成

機器の構成は、掘進機に取り付けたレーザーターゲットおよび光波反射鏡、距離・水平角・鉛直角の測量を行う光波距離計装備のデジタルトランシット、トランシット

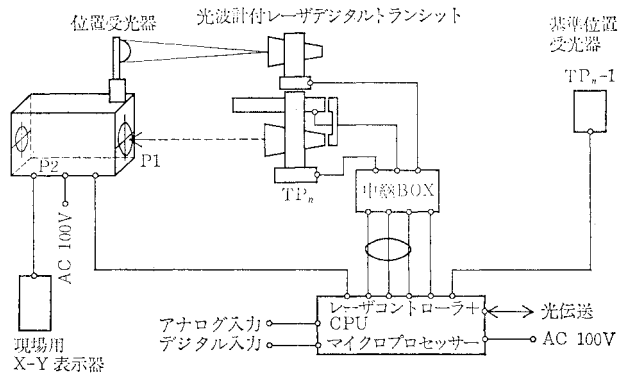


図-8 機器の構成

トの方向を定めるためのレーザー光発信器、測定の基準方向を定めるためのBS用レーザーターゲット、およびこれらの装置の制御を行うマイクロコンピュータを使用したコントローラーから成る。図-8に自動測量システム図、写真-2に自動トランシットを示す。

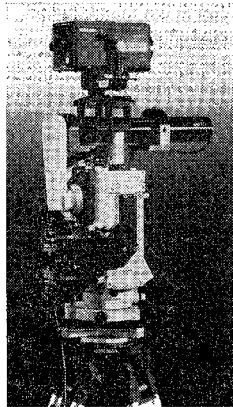


写真-2 レーザーデジタルトランシット

b) 装置の機能

測点に設置された測量装置は、移動する掘進機を常に捕捉するためのトランシット自動方向追従と、メインコンピュータから指令により掘進機の位置の測定を行なう機能を持っている。

トランシットの掘進機移動追従は、レーザー光をトランシット光軸から発信させ、レーザーターゲットの受光信号をマイクロプロセッサーで解析し、トランシットの移動方向を求め、パルスモーターに駆動信号を送ってレーザー光を常にターゲット中心に制御する。

測定は、メインコンピュータからの測定信号を受けたマイクロプロセッサーが、トランシットおよび光波距離計に測量信号を送り、光波距離計によりターゲットまでの距離をトランシットにより水平角と鉛直角を測定し、データをマイクロプロセッサーに送り返す。マイクロプロセッサーは、掘進機に取り付けられたピッチング計、ローリング計および3本の掘進ジャッキストローク計からの信号

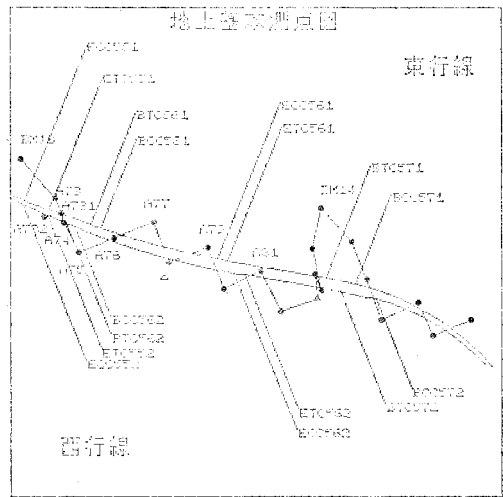


図-10 計画路線のCRT表示

表-1 位置演算結果アウトプット

基準点データ		断面データ		マシンデータ	
基準点No.	1	距離 m	65.558	ピッチング	+1
X座標	-33298.700	移動距離 m	1.875	ローリング	-7
Y座標	+6508.860	水平角 1	180 58 45	ストローク	NO. 11 988
方位角	189 15 39	高度角 1	90 24 45	ク	NO. 71 971
BM. E.L.	-5.824	水平角 2	180 58 25		NO. 131 988
掘進延長距離	267.133	高度角 2	90 25 10	mm	NO. 191 1005

	X座標	Y座標	ΔH	方位角	計画高	測定高	ΔV
切羽	-33367.300	-33361.000	-5	190 3 1	-10.840	-10.835	+5
テール	+6496.480	+6497.590	-9		-10.853	-10.837	+16

をデジタル変換し、測量データと合せてメインコンピュータに送信する。

(3) 位置の演算と方向制御量の解析

a) 計画路線データの入力

計画路線は、地上測量により現地確認を行った路線データをキーボードからメインコンピュータに平面線形と縦断線形に分けて入力し、フロッピディスクに記憶させる。

図-9に計画路線入力モデルを、図-10に入力した計画路線のCRT表示例を示す。

b) 位置の演算

立坑の基準測点より掘進機位置自動測量装置間の測量データ(トラバース測量, レベル測量)は、メインコンピュータのキーボードより入力する。

位置自動測量装置からの測定データは、光ファイバケーブル通信システムにより伝送され、メインコンピュータに直接自動的に入力される。

これらのデータから掘進機現在位置のフェースとテールの座標値(X, Y, Z)と掘進機軸の方位角(N₀)が

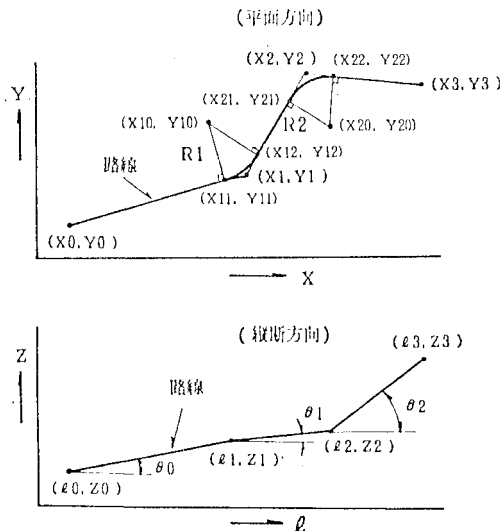


図-9 計画路線の入力モデル

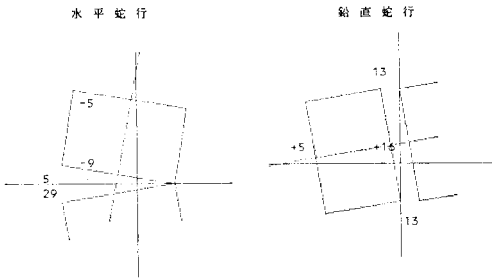


図-11 掘進機位置のずれ表示

演算される。表-1 に、測定データと演算結果の例を示す。

c) 位置のずれ量の解析

a), b) の演算データから、掘進機位置のずれ量を計画路線からの平面位置ずれ、縦断位置ずれ、方向のずれとして解析する。図-11 に解析結果の例を示す。

d) 方向制御量の解析

① 平面方向の制御量解析：掘進機水平方向制御量は、測定された掘進機の現在位置よりリングシールド掘進機が前進した位置で、計画路線上に掘進機が到達すべき1リング当りの方向変化量を解析して求められる。図-12 に解析モデルを示す。

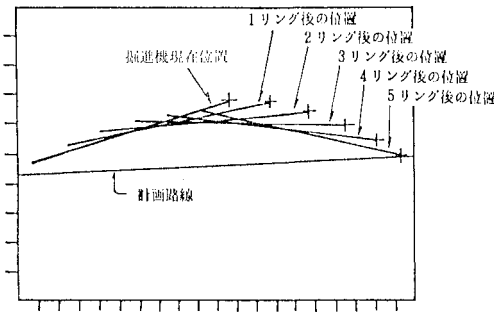


図-12 推進方向の解析モデル

② 縦断方向制御量の解析：縦断方向における掘進機の前進方向は、必ずしも掘進機軸方向と一致しない。この原因は、土圧、水圧が深さにより変化すること、地層変化および掘進機やセグメントに作用する浮力の変化などと考えられる。縦断方向制御量解析で

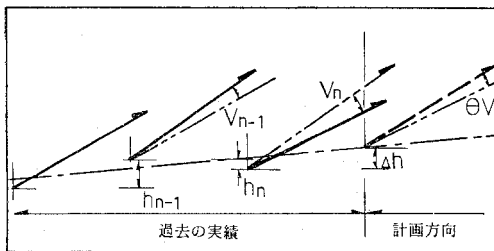


図-13 縦断方向の解析モデル

は、これらの影響による変化量を過去 10 リングの位置測定データを統計解析して求める。図-13 に解析モデルを示す。

掘進機縦断方向制御量は、測定された掘進機現在位置より5リング前進した位置で、計画路線上に掘進機が到達すべき1リング当りの方向変化量を統計解析したデータにより求める。

③ 掘進機方向制御量の方向制御コンピューターへの指令：メインコンピューターで解析された方向制御量は、掘進機現在位置を基準に次の1リング掘進目標方向をシールドマシン軸の水平方向変化角度 (θ_v)、鉛直方向変化角度 (θ_h) として、方向制御コンピューターに伝送される。

(4) 方向制御

a) 方向制御のアルゴリズム

3か所の推進ジャッキのストロークを測定することにより、組立られたセグメント面を基準として掘進機の現在方向を求め、メインコンピューターから指示された方向制御量 (θ_h, θ_v) により目標方向を演算し、掘進機の現在方向と目標方向を対比解析し、方向修正に必要な推進ジャッキを選択し、掘進機の推進方向を制御する。図-14 に掘進機方向制御モデルを示す。

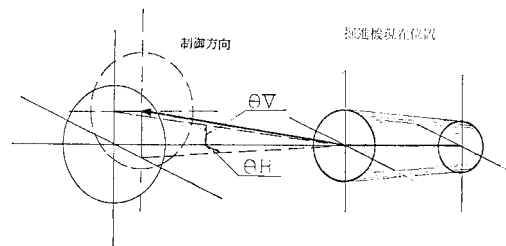


図-14 方向制御モデル

b) 方向制御システムの機能と構成

方向制御システムは、セグメント組立面から掘進機方向測定のための推進ジャッキストロークセンサー、推進ジャッキ ON・OFF のためのソレノイドバルブ、コンピューターからの ON・OFF 信号をソレノイドバルブに伝えるリレー、掘進機方向と、推進ジャッキ選択のための演算解析コンピューター、センサーからの入力信号、リレーへの出力信号、およびメインコンピューターとの信号伝送のための通信システムからなる。これらの機能構成によりセグメント組立面を基準として、掘進機方向を常に測定し、推進ジャッキを選択して、掘進機を目標方向に制御することができる。図-15 に方向制御フローを示す。

写真-3 に掘進機外径 2.13 m の工場における方向制

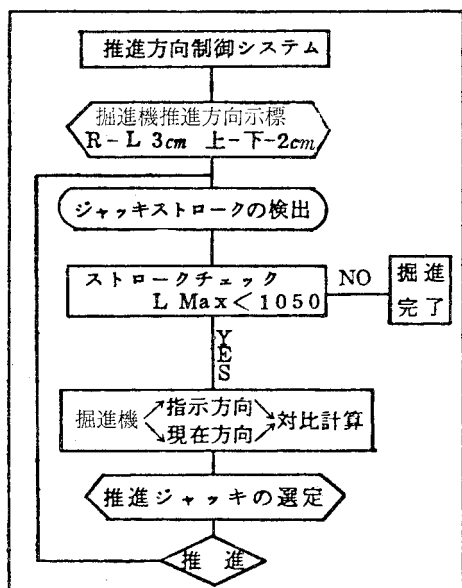


図-15 方向制御フロー

御テスト状況を、写真-4 に外径 7.45 m でのジャッキ選択の CRT 表示例を示す。

(5) 切羽安定制御

a) 掘進中の切羽安定制御

切羽安定の制御システムとしては、泥水シールド制御システム、土圧系シールド制御システムが多くのメーカーによりすでに実用化されている。自動制御ではこれらの既存の切羽安定制御システムを一次制御に利用し、掘進中のデータをセンサーにより集め、コンピュータでリアルタイムに解析整理し、一次制御の管理設定値にフィードバックすることにより掘進管理を行う。

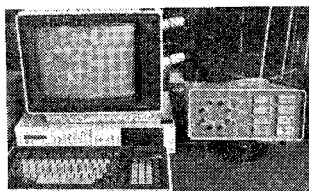
b) 切羽安定制御と方向制御

切羽安定制御は、切羽チャンバー内の圧力を一定に保つために、掘進スピードを制御項目としている。方向制御は掘進スピードには無関係に、推進ジャッキ使用本数を変化させることにより生ずる掘進機の回転モーメントにより行うので、切羽安定制御に干渉することなく併行して行うことができる。

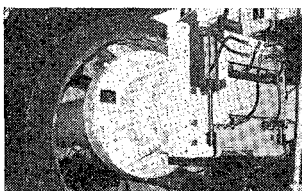
c) 土圧系シールドの切羽安定管理

土圧系シールドでは、設定された切羽圧力を保持するために、スクリーコンベア等のスピードを変化させることにより切羽の安定制御が行われている。これらの切羽安定制御のための管理設定値は、オペレーターが計器から読み取ったデータを技術者が判断して設定されているのが現状である。

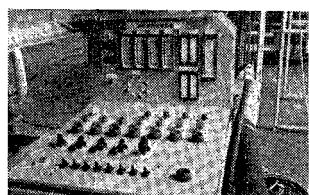
ここでは、掘進中の切羽安定に関するデータを光通信システムにより中央制御室に集め、重要管理項目のデータは、掘進と併行して同時にコンピュータの CRT 上に標示し掘進状況をリアルタイムに把握することができる。掘進中に収集されたデータは、1リングごとに整理して管理図が作成され、管理設定値を決め、シールド掘進機の一次制御にフ



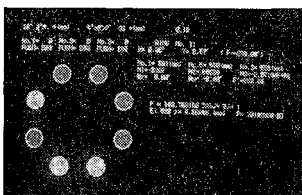
(a) ジャッキ制御のモニター表示



(b) ジャッキの動作状況



(c) 制御されている操作盤



(d) ジャッキパターンの CRT 表示例

写真-3 方向制御テスト

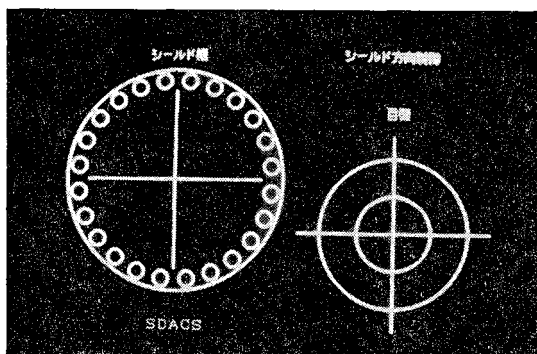


写真-4 ジャッキ選択の CRT 表示

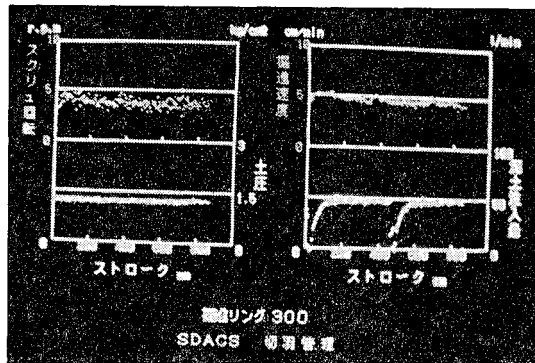


写真-5 掘進データの CRT 表示

ィードバックする。

写真-5 は、掘進データの CRT 表示例である。

6. 成 果

本システムは開発経過からも理解されるように、個々の制御機構をそれぞれ数個のシールドトンネル施工に際して改善を反復しながら、漸次大型のシステムに組み上げる方式を採用した。したがって、個々の制御機構の持つ特性に差があり、全体としてのシステム構成に際して新しい問題も発生した。しかし、その間に本システムを運用するための技術者の育成が可能となり、実施時には比較的スムーズな現場への移行ができたのは予期しなかった収穫であった。

また、本来の目的である掘進精度については熟練度の低いオペレーターによっても従来の許容値のほぼ 1/2～1/3 程度に収められ、掘進速度の向上も図られた事例もある。さらに、切羽の安定管理データから、崩壊予知に有効と思われる機能を保有していることも推定されるなど、他の応用面のあることが期待される。

あとがき

シールド工事における方向制御、切羽の安定管理を、技術者やオペレーターによる個人差なく量的に行えるように前述した制御システムを開発してきた。開発にあたりシステムの部分ごとに開発・実施・改良の段階を繰り返して現在の形のシステムとしたが、ハードの面、ソフトの面において今後も改良・開発をしていく必要を痛感している。これらの残された問題点として、

- ① 自動測量装置の小口径シールドトンネル施工への適用に向けての小型化。
- ② 切羽安定制御において、種々の地盤のデータを収集し、管理設定値の定量的解析手法の開発。
- ③ ② における管理設定値の掘進機、泥水プラントへのフィードバックシステムの開発。

等がある。今後これらの問題点の解決を目指しさらに努力していきたい。

(1984.8.1・受付)

PC技術を中心に
新しい環境づくり、国土開発に
大きく貢献しています。



ピー・エス・コンクリート株式会社

取締役会長 上村 正二

取締役社長 近藤 希賢

本 社 〒100 東京都千代田区丸の内三丁目 4 番 1 号(新国際ビル) ☎(03)(216)1981(代)
 東京支店 〒102 東京都千代田区九段北四丁目1番3号(日本ビル九段別館) ☎(03)(262)6101(代)
 大阪支店 〒530 大阪市北区西天満二丁目 6 番 8 号(堂島ビル) ☎(06)(363)2221(代)
 福岡支店 〒810 福岡市博多区中洲 5 丁目 6 番 20 号(明治生命館) ☎(092)(291)2244(代)
 仙台支店 〒980 仙台市一番町二丁目 1 番 1 号(振興相互銀行ビル) ☎(0222)(23)8121(代)