

(Ⅲ-7)

シールドの自動方向制御システム

Shield automatic alignment control system

佐藤工業(株) 桐谷 祥治*

佐藤工業(株) ○大西 豊*

石川島播磨重工業(株) 田方 茂佳**

(株) トキメック 梅野 貢一***

By Yoshiharu KIRITANI, Yutaka ONISHI, Sigeyoshi TAGATA, Koichi UMENO

シールド工法では、機械化や自動化が早くから着手されてきた。最近では、さらにシールドの運転操作までを自動化する開発が進められている。その中で、シールド掘進の管理や制御を自動化する「自動方向制御システム」は、シールド施工の完全無人化へ向けて最も重要な技術であるとともに、熟練技術者の低減や施工の複雑化、高度化に対応する技術として、開発が急がれている。

本文で紹介する「自動方向制御システム」は、ジャイロコンパスと重力加速度計による自動計測、比例制御と統計処理を組み合わせた自動制御理論、および推進ジャッキの圧力制御方式などを主な特徴としており、実施工において高精度の掘進成果が得られている。本文では、開発経緯、システムの概要、実施工への適用結果などについて報告する。

(キーワード) シールド工法、自動方向制御、自動掘進

1. はじめに

シールド工法は、開発当初からプレキャスト部材であるセグメントを用いる合理的な工法であり、建設工事の中でも機械化、自動化が最も進められた工法といえる。さらに、自動化の最終目標である全自動化、無人化へ向けて開発が積極的に進められている。

ところで、全自動化を達成するためには、人間の行ってきた管理、判断、操作といった思考的処理を、ソフトウェアに組むことがもっとも重要かつ困難な課題とされている。

「自動方向制御システム」は、シールドの現在位置・姿勢をリアルタイムに検出し、シールドの方向を自動的にコントロールして設計計画線上に正確に掘進させるものであり、高品質のトンネルを安全にかつ確実に提供するものである。

2. 従来の推進管理

2-1 従来の推進管理の概要

従来の推進管理測量では、トンネル平面線形・水準・シールドの姿勢などを、トランシットやレベル、テープ、スタッフなどを用いて測定していた。ピッチング計とローリング計は早くから取り入れられ、連続的に計測可能となっていた。しかし、方位角と位置については、有効な計測手段がなく、この推進管理測量で高頻度に測定する必要があった。そのため、作業との関連を考慮して、単純化しかつ合理化しなければならず、しかも高精度を要求されるという二律背反する命題を担う困難な業務であった。従来の線形管理における推進管理測量は、作業の交代時、休憩時など1日に2～3回の頻度で行われていた。

2-2 掘進計画

従来では、推進管理測量結果と推進データを参考に掘進計画をたて、オペレーターに指示しなければならなかった。

* 土木本部技術部	TEL 03-661-4794
** 油機シールド事業部	TEL 052-611-3133
*** 新規事業推進室	TEL 03-733-1776

この掘進計画をたてるためには、シールドの計画線からの相対的な位置・姿勢の算出や、シールドの修正線形の設定、ジャッキパターンやジャッキ推力の検討など多くの計算や考察をしなければならず、適当な掘進計画をたてるためには、豊富な経験が必要とされてきた。

掘進計画をたてると、それを元に推進指示書を作成しオペレーターに指示しなければならない。

指示書にはさまざまな掘進指示事項を記入する。方向制御に関する主な項目には、目標のピッチング角や、ジャッキストローク量などがある。

2-3 推進操作

オペレーターは指示された目標の姿勢角やジャッキストローク量にしたがって押さなければならない。そのためには、適切なジャッキパターンを考慮して選択し、必要に応じて変更しなければならない。この操作は、ほとんどオペレーターの技量にかかっており、その技量は経験に依存するものとされている。

3. 開発経緯

3-1 測定の自動化

シールドの位置・姿勢を自動的に測定する方式として、レーザー方式等の光学処理による方式とジャイロコンパスや重力加速度計による姿勢計測

を行う方式がある。それぞれの方式のシールドの位置・姿勢計測への適性についてさまざまな角度から検討した。

まず、精度についてはそれぞれの機器、センサーの仕様から算出した理論的な精度において対比を行った。位置計測精度においてはレーザー方式などの光学的測定方式の方がよいが、シールドの掘進管理で非常に重要な要素となるシールドの姿勢角の計測においては、ジャイロ方式の方が高精度で安定した値を検出できる。

つぎに、自動計測を行うシールドの坑内環境への適応度について両者を比較した。レーザー方式はシールドに設置したターゲットに向かってレーザーを照射するための光線を通すスペースの確保が不可欠である。直線線形で、ある程度以上の口径であるならば容易であるが、小口径や曲線線形のシールドではその確保はたいへん困難となる。ジャイロ方式の場合は、後方空間のスペースの確保の必要はない。

維持管理の点についても検討を加えた。レーザー方式では光線発射装置の盛り替え作業を定期的に行う必要がある。盛り替え頻度は、直線シールドでは推進距離50mから100mごと、曲線線形では5mから20mに一回は行わなくてはならない。これとは別にレーザー光線の発射装置はシールド後方のセグメントに設置されていることからバッテリーロコスの走行による振動などの影響を受けて動く恐れがあるので、頻繁にチェックする必要が生ずる。ジャイロコンパスの場合は、装置の盛り替えの必要はないがチェック測量を定期的に行う必要がある。

以上の検討結果から、精度、維持管理、曲線施工や小口径などへの汎用性などを考慮した結果、ジャイロコンパス方式を採用することとした。

3-2 推進管理の自動化

従来の推進管理では、煩雑な計算を数多く行わなければならないだけでなく、掘進状況により数量的に確定しにくい場合が多く、担当技術者には豊富な経験者が望まれてきた。

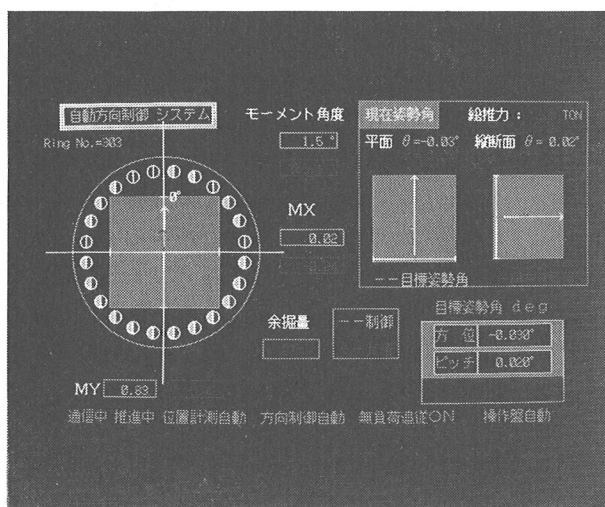


写真-1 自動制御モニター画面

こうしたことから、電算化による各種計算処理の迅速化、省力化だけでなく、掘進データの統計的解析処理により推進管理を自動化して、担当技術者の熟練度に左右されずに高精度の推進管理の行えることが要求されてきた。

シールドの方向を自動制御するためには、方向制御に関する管理は自動化しなければならない。

本システムでは、光学測量によるセグメントの出来型測定結果と自動計測によるシールドの位置計測結果を比較演算処理する方法を採用している。この方法では、シールドの方向と推進方向の関係や、組立後のセグメントの挙動などを的確に把握することができるので、セグメントの最終設置精度を高くすることができる。

3-3 方向制御の自動化

1) 自動化の目的

シールドの方向制御の自動化は、シールドの全自動化、無人化を達成する上で最も困難であるとされていた要素技術の一つである。本方向制御システムの開発は、シールドの全自動化に向けて大きく推進するものである。

方向制御はシールドのジャッキパターンの選択、推進圧力の調整といった感覚的に把握しにくい操作であり、熟練度が必要とされてきた。これらの複雑な処理をコンピューターで行うことにより、従来の人間による制御より合理的で、環境の変化に臨機応変に対応できる高精度の掘進ができる。

オペレーターは、他の切羽制御、裏込め注入制御などの操作にその神経を集中させることができる。

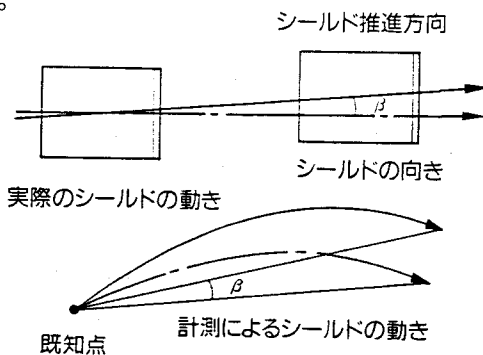


図-1 シールドの方向と進行方向の関係

2) システムの開発

方向制御の自動化を達成するために必要な主要要素技術について、ハード的なものとソフト的なものとに分けて示すと以下ようになる。

a. ハードウェアに関する技術

- ・シールド制御盤の自動化対応
- ・推進ジャッキ油圧系の自動化対応
- ・遠隔通信技術

b. ソフトウェアに関する技術

- ・位置・姿勢のリアルタイム計測
- ・シールドの将来推進方向の目標値の設定
- ・回転モーメントの設定
- ・ジャッキパターンおよび推進油圧の設定
- ・制御状況のフィードバック
- ・統計処理等による適応制御処理

以上の要素技術のほとんどが、新開発であった。

これらの開発では、「ジャイロコンパスによるシールドの自動位置・姿勢計測システム」により得られた豊富な掘進データを利用することができた。

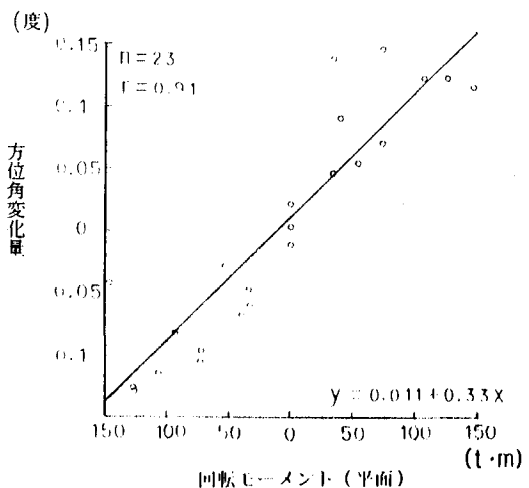


図-2 回転モーメントと方向変化量の相関

3) 制御方式の検討

シールドの目標の方向変化量に対する回転モーメントが設定できれば、シールドの方向を正確に制御することができる。図-2は、ある泥水式シールドにおいてジャイロコンパスと重力加速度計によるシールドの自動位置・姿勢計測システムによって得られたシールドの実掘進データから、シールドの推進10cmごとの方向変化量とその時の回転モーメントの相関を取ったものである。回転モーメントとシールドの方向変化にはかなり高い相関があることが認められる。このような、相関を基に次式に示す基本制御モデル式により自動制御を行う自動制御演算処理回路を構築した。

$$M_s = A \cdot Y_o + B + \alpha$$

$$\alpha = F(S_i, S_{i-1}, S_{i-2}, \dots)$$

A : 比例係数 (ゲイン)

B : オフセット量

M_s : 指令回転モーメント

Y_o : 目標方向変化量

α : 補償値

S_n : 制歪偏差

数値モデルによる制御は、そのモデルどおりにシールドが掘進するという前提による制御である。よって数値モデルの適性度により自動制御の良否が影響される。しかも、正確に設定したとしてもシールドの方向変化特性は、土質や計画線形により変化するので、数値モデルは絶えず検証して、必要に応じて設定変更しなければならない。このために、比例制御処理によって数値モデルの各係数を補償する機能を加え、シールドの推進中の制御偏差を修正する。長い区間の掘進によるシールドの方向変化特性の変化は、統計処理によって数値モデル自身を修正することにより対応する。

これらの処理によって本自動制御演算処理回路の汎用性は高くなるとともに、推進中に得られるデータによって制御偏差を縮小させる働きを有した適応制御が可能となる。

4) 推進油圧系の検討

自動方向制御で実際に制御される推進ジャッキ

の油圧系の制御応答速度、再現性、安全性に優れたものでなければならない。

推進ジャッキパターン制御の制御応答速度、安全性については、全ジャッキをセグメントに接触させる無負荷追従システムを採用することによって確保できる。本自動方向制御システムでは、無負荷追従ジャッキの圧力を制御する圧力制御方式を採用することにより、システムが選択する回転モーメントを無段階で設定することができる高精度の再現性を有している。

4. 自動方向制御システムの概要

4-1 機器構成

シールドに方位角、ピッチ角、ロール角を測定するジャイロコンパスおよび重力加速度計を内蔵したジャイロユニットを設置する。このユニットは、40cm四方の防温、防湿のコンテナで、シールドの任意の位置に固定する。シールドの後続台車には、このジャイロユニットやシールド操作盤からの推進圧力やジャッキストロークの信号を集約、ジャッキパターンや制御圧信号の操作盤への伝送

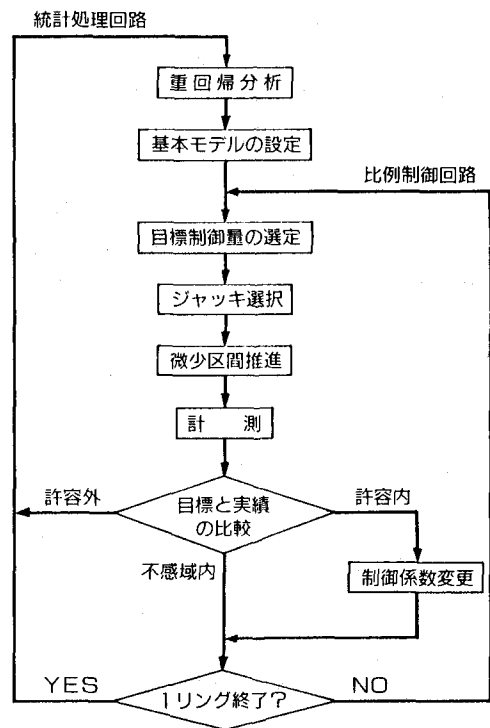


図-3 自動制御演算処理フロー

などの処理をする信号処理装置を設置する。地上の中央制御室では、坑内から送られてくる各種の計測信号を基に、自動制御演算処理を実行して適切なジャッキパターンと推進圧力を設定する中央演算処理装置－パソコンが設置されている。シールド本体は、圧力制御方式による推進油圧系を装備している。シールド操作盤は、坑内演算処理装置との通信処理や各種のインターロック機能を装備している。

4-2 本システムの主な機能

まず、計測項目として、シールドの姿勢角（方位角、ピッチ角、ロール角の三軸方向）を計測して

おり、そのほかにジャッキストロークや推進圧力、ジャッキパターンなどの自動制御演算処理に必要なデータを計測している。

演算処理機能では、シールドの現在位置、姿勢を計画線からの偏差として算出したり、今後シールドが計画線上を正確に推進するための目標の方向の設定を行なう。これらの位置、姿勢データをもとにシールドのジャッキパターン、推進圧力の設定をおこなう演算処理回路や、制御状況による数値モデルの補償を行なう機能がある。

以上の処理により最終的にジャッキパターン、推進油圧が自動設定される。

表－1 シールド運転管理の省力化

自動性 0：手動 1：半自動 2：自動

	測量、姿勢制御ともに手動	測量は自動、姿勢制御は手動	測量、姿勢制御ともに自動	
			自動性	自動性
推進開始	1. 初期パターンを考える。 2. 使用ジャッキの選択スイッチを使用本数分、押す。 3. パターンの確認 4. 推進押ボタンを押す。	同 左	0 1. 自動ボタンを押す。 2. 推進押しボタンを押す。	1
推進中 姿勢制御 状況管理	1. ジャッキストローク計やピッチング計による方向のみの間接的な管理しかできない。	1. モニター画面による管理	1 1. 各種の自動警報装置設置	2
推進中 パターンの 変更	1. 使用ジャッキの変更分だけ、選択スイッチを押す。 2. パターンの確認	同 左	0 1. 自動変更設定	2
推進終了	1. ジャッキストローク計の監視 2. 停止の判断	同 左	0 1. 停止指示の自動警報装置設置	2

表－2 線形管理の省力化

自動性 0：手動 1：半自動 2：自動

	測量、姿勢制御ともに手動	測量は自動、姿勢制御は手動	測量、姿勢制御ともに自動	
			自動性	自動性
光 学 測 量	1. セグメント出来型測定 推進 3～5m	1. セグメント出来型測定 推進 20～50m毎	1 1. セグメント出来型測定 推進 20～50m毎	1
使用セグメント 計画	1. 計算（テーバー位置等） 2. 指示書作成	1. セグメント試用計画支援プログラム	1 同 左	1
推進方向指示	1. 計算（目標姿勢/ジャッキストローク差等） 2. 指示書作成	1. モニター画面に自動表示	1 自動姿勢制御により不要	2
長距離区間の 推進特性の 把握	1. 巻き紙に記入 2. 目視で判断	1. 統計処理演算プログラムで 計算	2 同 左	2

4-3 本自動方向制御システムによる効果

本自動方向制御システムを使用することにより、オペレーターは方向制御に関する操作からは解放される。本自動方向制御システムを使用したときと、位置・姿勢の自動計測のみを使用したときと、従来の手動推進のときを省力化の点で比較した。表-1はオペレーターの操作、表-2は推進管理のそれぞれの作業性の軽減度を表している。この表に示されるように、本自動方向制御システムにより省力化の効果が、確認されている。

掘進精度においては、シールドの方向を目標の方向に高精度に維持することができ、ほとんど蛇行が防止できる。従来の人間による推進と比較して、シールドの方向を急激に変化させたり、無理

な回転モーメントをシールドに与えることがないため、掘進管理全般においても良好な効果が得られる。

推進ジャッキは圧力制御方式の採用により、推進中は、すべてのジャッキがセグメントに当たっているため、セグメントに大きな偏圧がかかることが防止される。しかも、人やものなどが挟まれることの無い安全な自動制御装置である。

5. 適用事例

本自動方向制御システムは、これまでの多くのシールド工事に採用されており良好な結果が得られている。ここでは、その中の一部について結果を紹介する。

表-3 適用事例-1

工事件名	京葉都心線隅田川トンネル工事
企業者	日本鉄道建設公団殿
工事場所	自 中央区新川2丁目 至 江東区越中島2丁目
工法	泥水式シールド
仕上り内径	φ6,100mm
シールド外径	φ7,250mm
シールド工事延長	778m×2

5-1 適用事例-1

適用事例-1では、京葉都心線の単線併設鉄道トンネルの新設工事に本自動方向制御システムを適用した。隅田川の河口付近を横断するトンネルの構築で、掘進ルート上には河川のほかに堤防、高層マンションなどの重要構造物があり、それらの下を土被り9~26mで通過した。平面線形、縦断線形ともに緩和曲線が含まれている。高層マンションをアンダーパニングした受け替え杭が接近していることや、2台のシールドが両側から発進して途中ですれちがうという前例のない厳しい施工条件であった。

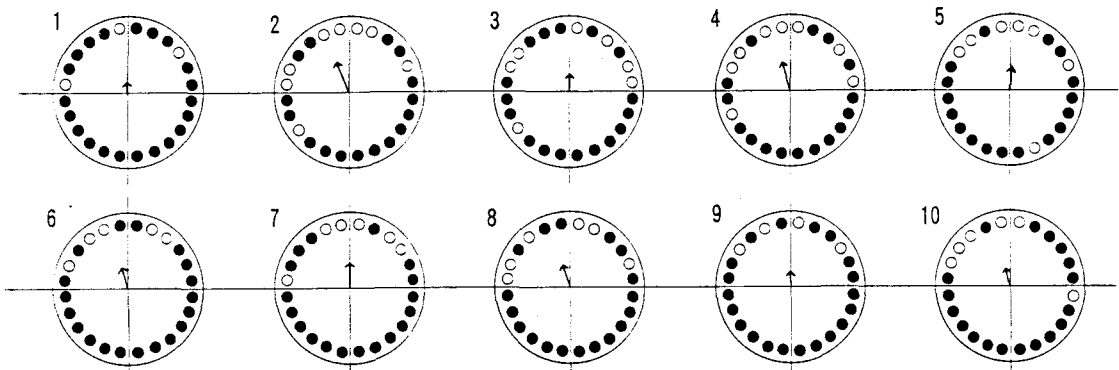


図-4 10cm毎のジャッキパターンの変化

本工事では、自動方向制御システムを 700m 以上にわたって連続して使用した。自動掘進では、シールドの姿勢を設計方向に対して常に ± 0.02 度以内に維持されたため、非常にめらかな掘進線形が得られた。セグメントの設置精度は、設計線から20mm以内におさめることができた。本工事での自動推進による10cm毎のジャッキパターンの変化状況を、図-4に示す。この図より明らかなように、高頻度でかつ見かけ上は複雑にジャッキパターンが変化している。そして、図の各ジャッキパターンの中央に表示した回転モーメントも変化している。シールドの現在位置、姿勢等の掘進状況によって刻々と変更される所要回転モーメントを発生する適切なジャッキパターン、ジャッキ推力を、コンピューター制御により瞬時に設定することにより初めてこのような高頻度の制御が可能となった。

表-4 適用事例-2

工事件名	公共下水道小雑賀幹線工事（その7）
企業者	和歌山市下水道部下水道建設課
工事場所	自 和歌山市手平1・2丁目 至 和歌山市吹屋町4・5丁目
工法	気泡式シールド （中折れ式）
仕上り内径	$\phi 2,000\text{mm}$
シールド外径	$\phi 2,880\text{mm}$
シールド工事延長	600m

5-2. 適用事例-2

適用事例-2では、中折れ式の気泡シールドに適用した結果について示す。本工事は、和歌山市が進める公共下水道の幹線管渠築造工事である。シールド掘進位置の土質は、N値 5~20の砂質土が主体で、地下水が豊富に滞水している。土被りは 3~3.5mと小さく、また既設埋設物が接近して多く設置されている。平面線形に3カ所の R-150mのS字曲線があり、ここでは中折れを使用した。

なお、本工事のような土被りが小さく、崩壊性の高い砂質地盤の施工に適した気泡式シールド工法には、切羽安定制御システムが導入されているが、現状では土質条件等に適合した制御状態を維持しなければならない。わずかの切羽制御の誤差が直ちに地表への影響につながることとなり、細心の切羽安定管理が要求された。自動方向制御システムの採用により、線形管理への負担を軽減し、切羽管理に集中できる。

本工事においては、初期掘進区間を含む全延長を連続して自動方向制御により掘進を終了した。セグメントの設置精度は、R-150mの区間を含めて、最大20mm以内におさめることができた。図-5は、R-150mのS字カーブ区間で中折れ装置を使用している右カーブの自動制御状況である。推進にともない連続して変化する設計方向に対して、シールドの姿勢を直線区間と同様に ± 0.02 度以内に保つよう制御できていることが示されている。

本工事での自動方向制御システムの適用により、小口径、中折れシールドでも高精度の自動制御ができることが確認された。

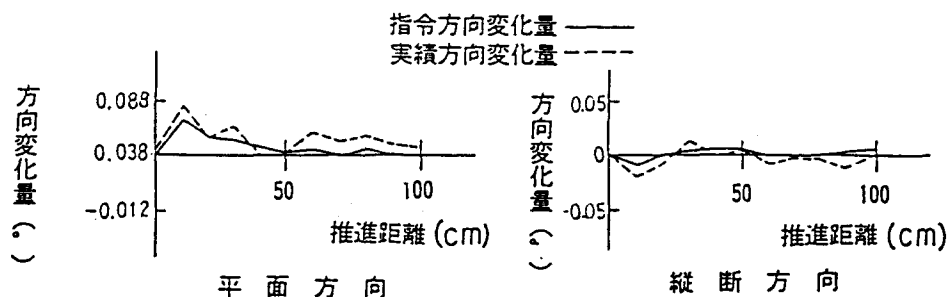


図-5 自動方向制御状況

5-3 適用事例-3

適用事例-3は、高水圧下での泥土圧式シールドにおける適用例である。本工事は、東京都内の下水道幹線管渠の築造工事である。地下水圧は、 $2.3\text{kg}/\text{cm}^2 \sim 2.5\text{kg}/\text{cm}^2$ と非常に高く、土質は粗粒砂を主体としており、泥土圧シールドにとって、非常に施工条件の厳しいものであった。そのため、本工事においても、適用事例-2と同様に、オペレーターの線形管理への負担を軽減してやり、切羽安定管理に専念できるように自動方向制御システムが搭載された。

表-5 適用事例-3

工事件名	愛宕幹線その2工事
企業者	東京都下水道局殿
工事場所	自 港区西新橋3丁目 至 港区新橋6丁目
工法	泥土圧式シールド (中折れ式)
仕上り内径	$\phi 3,500\text{mm}$
シールド外径	$\phi 4,430\text{mm}$
シールド工事延長	310m

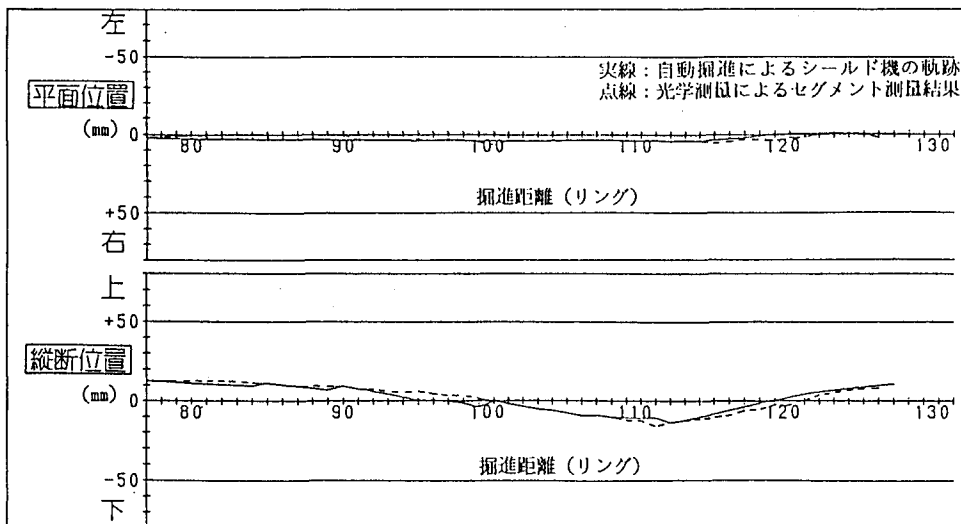


図-6 測定結果管理図

本工事においても全区間、自動方向制御システムによる自動掘進を行った。実際の切羽の安定管理は、想像していた以上に厳しいものとなったが、本自動方向制御システムで採用している推進ジャッキの圧力制御方式は、常にオペレーターが切羽安定管理のために設定した推進圧力、推進速度に影響を与えずにジャッキパターン、ジャッキ圧力を設定できることが切羽安定管理にも寄与されることが実績より認められた。

図-6に、自動掘進結果を示す。本システムを採用した現場では、すべて、このような良好な線形管理結果が得られている。

6. おわりに

シールド工事の全自動化(無人化)へ向けて、切羽安定管理の自動化、ロボットによるセグメン

トの自動組立等、各種の技術開発は盛んである。

本文で紹介した自動方向制御システムは、すでに実用レベルに達したものと判断している。

本システムの技術が、シールドやTBMだけでなく、さまざまな機械施工の自動化に役立つものであれば幸いである。

本システムの開発、現場への適用にあたり、ご指導・ご協力を頂いた関係各位に対し、深く感謝いたします。

<参考文献>

- 1) 田口、東：「隅田川河底を対抗シールドで掘進・京葉線隅田川トンネル」
トンネルと地下・8 1989年8月
- 2) 桐谷 祥治：「ジャイロコンパスによるシールドの自動位置・姿勢管理システム」
土木学会 最新の施工技術・3 1989年8月