

3. ジャイロコンパスを用いたシールドの自動方向制御システム

佐藤工業(株)：桐谷 祥治・大西 豊
石川島播磨重工業(株)：田方 茂佳

1. はじめに

シールド工法が日本で本格的に採用されるようになってから、すでに30年以上が経過している。この間、都市およびその周辺での上下水道や、電力・通信ケーブル、地下鉄などの都市トンネルの需要が急激に増え、シールド工事が様々な条件の中で施工されるようになってきた。今では、シールド工法は機械化の最も進んだ工法の一つとなっている。機械化が進むことにより施工の複雑化も進み、品質の安定・向上、省力化、危険作業の回避等を主目的として自動化も積極的にとりいれられるようになった。とくに熟練作業員の不足あるいは作業員の高齢化に対処するために、非常に重要な課題ともなっている。そして、機械化、自動化の最終目標としてシールド工事の全自動化、無人化を位置づけることができ、これを達成するためには、トンネルを計画線に正確にかつ自動的に設置する技術の確立が不可欠となる。

2. 開発経緯

従来のシールドの推進管理は、一日に数回の光学測量結果とピッチング・ローリング計、ジャッキストローク差等から得られるシールドの位置・姿勢の情報をもとに、それに対応する適性なジャッキパターンを選定することによって行われている。この管理方法では、リアルタイムにシールドの位置・姿勢情報を得ることができないため、管理に時間的な遅れを伴うことは避け難いことであった。

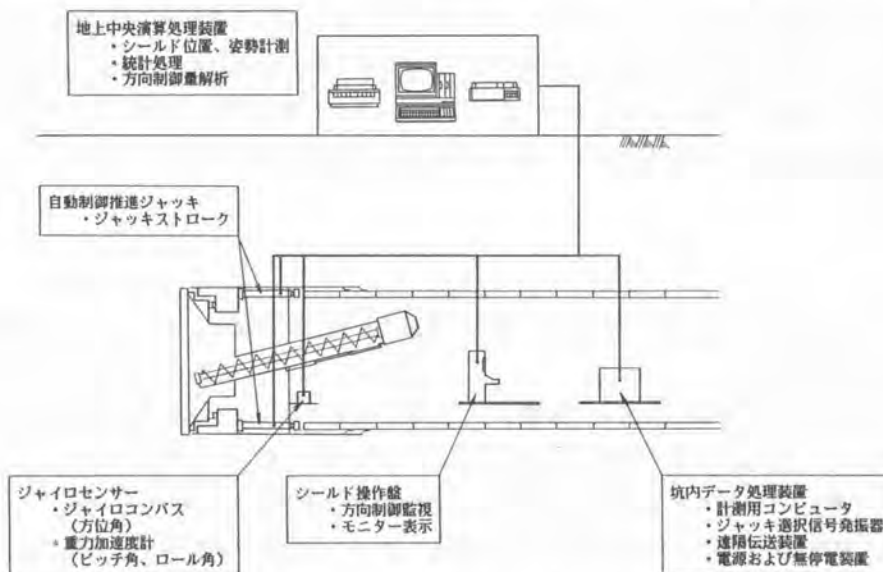


図-1 自動方向制御システム概要図

シールドの方向制御を自動化するためには、シールドの地盤中での位置・姿勢を精度よくリアルタイムに把握できることが前提条件となる。そこで、シールド工事の狭い坑内および急曲線からの制約を受けることなく自動計測ができ、とくに方向制御に非常に大きな影響をおよぼすシールドの姿勢を高精度で計測できるという特徴を有する「ジャイロコンパスによる自動位置・姿勢計測システム」を基本として「自動方向制御システム」（以下、本システム）の開発を行った。

3. 本システムの概要

図-1に本システムの概要図を示す。シールドに設置したジャイロコンパス・重力加速度計と、ジャッキストローク計、油圧計、土圧計などからのデータを坑内データ処理装置に集約し、地上中央制御室のパソコンへ伝送する。地上パソコンでは、送られてきたデータを演算処理し、シールドの位置・姿勢を算出するとともに、トンネル計画線からの離れを計算する。さらに、この計画線とのズレを修正するためのシールドの姿勢変化量を算出し、このシールドの姿勢変化を与えるためのジャッキパターンを選定し、シールド操作盤へ信号を送り返して方向制御を行うものである。また、選択したジャッキパターンによるシールドの実際の姿勢変化量を計測し、このデータをフィードバックすることにより、常に最適のジャッキパターンが選択されるようなシステムとなっている。

4. 本システムの機能

本システムは、①シールドの位置・姿勢の高精度リアルタイム計測、②シールドの推進線形の分析処理、③ジャッキパターンの選定処理の3つの機能を基本としている。

4-1. シールドの位置・姿勢の高精度リアルタイム計測

シールドの位置・姿勢は、シールド機にジャイロコンパス・重力加速度計を搭載して、シールドの姿勢を測定し、これを推進ストロークとからシールドの位置を計測するものである。このため、シールド工事に特有の狭い坑内、および急曲線からの制約を受けることなくリアルタイムに計測することが可能である。しかし、測定原理上、ある点からの相対位置しか求められず、誤差を発生することがある。すなわち、ジャイロコンパスによるシールドの位置の算出方法には、微少区間の進行においてはシールドの向きと進行方向が一致しているという前提がある。ところが、実際には一致しない場合もあるため、図-2のような計測誤差が発生する。本システムは、統計処理により、この誤差を検出して自動的に補正する機能があり、高精度の位置・姿勢計測ができる。

4-2. シールドの推進線形の分析処理

現在位置・姿勢から、今後シールドが進むべき最適な位置・姿勢を設定する。これによりシールドに与えるべき最適な方向変化量-目標方向変化量を決定する。目標方向変化量から、それに必要な制御量（操作量）をもとめなければならない。制御量とは、直接的にはジャッキパターンとジャッキ推力であるが、本システムでは、シールド回転モーメントを制御量とする。ここで必要なことは、シールドに与えた回転モーメントと実際に発

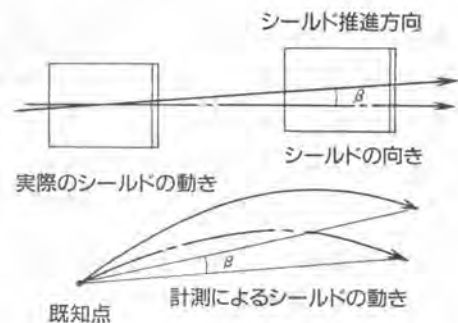


図-2 ジャイロコンパスによる計測誤差

生したシールドの方向変化量との関係を正確に把握しなければならない。また、シールドは応答速度が遅いため、方向制御の精度をよくするためには、シールドの将来位置を高い確立で予測することも必要である。

回転モーメントとシールドの姿勢変化量の間には、非常に高い相関があることは、ジャイロコンパスによる計測により確認されている。図-4がその結果の一部である。

進行予測については、今後の微小区間の推進において発生する方向変化量を、これまでのシールドに与えた回転モーメントとそれによって発生した方向変化量から予測する自己回帰型モデルの重回帰式により算出する。このモデルでは、シールド回転モーメントを含めて解析しているのでこれまで述べてきた複雑な挙動も含めて進行予測ができる。

これら、統計処理の結果を利用することにより、シールドに与えるべき適性な制御量としての回転モーメントが算出される。

4-3. ジャッキパターンの選定処理

回転モーメントから、実際の制御量であるジャッキパターンとジャッキ推力を求める。

大口径シールド等では、ジャッキ本数が20本以上となり、ジャッキパターンは数100万通り以上となる。また、同一の回転モーメントに対しても、数多くのジャッキパターンが存在する。これは、シールド径が大きくなるほど、すなわちジャッキ本数が増えるほど多くなる。そのため、単に回転モーメントが適性になるだけでなく、シールド前面の土圧とのバランスや掘削土砂の流体輸送への掘削速度の影響な

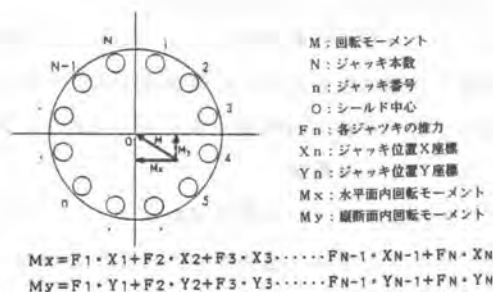


図-3 回転モーメントの算定方法

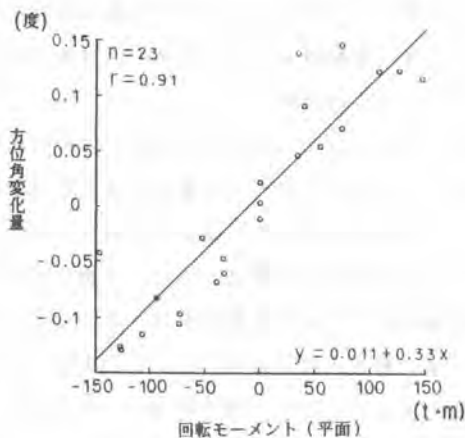


図-4 回転モーメントと方向変化量の相関



図-5 方向制御ブロック図

ども考慮して適性なジャッキパターンを選定する

5. 自動方向制御フロー

本システムの自動方向制御の処理は、計測処理（入力）、演算処理、制御処理（出力）の3つに分けられる。本システムのそれぞれの処理の項目は、図-5の方向制御処理ブロック図に示す。

システム全体の処理については、図-6のフローチャートに示す。フローは、統計処理回路と比例制御回路の2つの基本的なフローに分けられる。統計処理回路は、過去数リング分の統計処理を1リングの掘削終了ごとに逐次実施し、比例制御回路は、推進中に連続的に実施するものである。

統計処理回路は、シールドの推進線形の分析処理やジャッキパターン選定処理などの統計的処理を行い、シールドの進行特性や環境の変化などを把握して基本的な関係式を求めめるために行う。比例制御回路は、統計処理で求めた関係式を基本に制御を行う回路である。ただし、制御偏差が大きいときは、推進中であっても統計処理回路にシフトしてシールドの進行特性などの見直しを図る。比例制御回路では、オペレーターの操作にかなり近い方法を採用している。

6. あとがき

本システムは、現在掘進中の鉄道工事の泥水式シールドにおいて採用されており、良好な結果が得られているので、今後機会があれば報告したい。

シールド工事の自動化を達成するためには、シールド工事を構成する各主要作業についての自動化技術を統合し、一連のシステムに構築する必要がある。本文では、シールド工事の自動化の中核をなす技術である自動方向制御システムについて紹介してきた。このほか、セグメントの自動組み立てロボット、場所打ちライニング工法である「SECL工法」等、シールドの自動化に関連する技術の開発にも精力的に取り組んでおり、多くの成果が得られている。

<参考文献>

- 山本 稔 : 「シールド工法をめぐる最近の動向」
 講習会、最近のシールド工法の開発と施工の実際、1987.7
- 桐谷・大西・田方 : 「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」
 土木学会土木施工研究委員会、最新の施工技術、3、1987.5

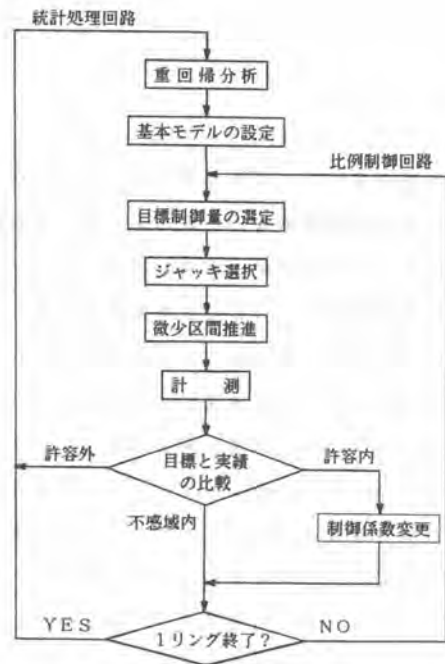


図-6 自動方向制御フロー