

26. 小断面シールドにおける完全無人誘導システムの開発

(株)青木建設：*野沢 有・佐藤 房雄
西野 憲明

1. まえがき

シールド工事は、建設工事の中でも極めて自動化技術が進んだ分野の一つであり、これまでシールド機の位置姿勢計測、方向制御、掘進管理をはじめ、セグメント搬送・組立等無人化施工を目指した種々の技術開発が行われている。この中で自動測量技術についてもゼネコンやメーカー各社の開発ターゲットであり、開発例も数多く紹介されている。しかしながら、その多くが大断面・緩曲線に対応するものが主体であり、小断面・急曲線に精度よく対応できるシステムはまだ開発されていない。

本文は、この問題を解決することを目的に開発した小断面・急曲線に対応した新しい自動測量システムと自動誘導システムで構成される「シールド機完全無人誘導システム」（ジャイロランナー）について報告するものである。

2. ジャイロランナーの概要

ジャイロランナーは、自動測量システムと自動誘導システムの二つのシステムから構成される。自動測量システムは、シールド機の位置と姿勢を自動的に計測するシステムであり、自動誘導システムは自動測量システムによって得られたシールド機の位置と姿勢より計画路線とのずれを計算し、シールド機をどのような方向に誘導するかを決定し、シールドジャッキをコントロールするシステムである。各システムの計測制御動作は、シールド機の掘進状況データをもとに全て自動で行われる。新たな方法による自動測量システムは、シールド機外径2m以上、最小曲率半径30m以上への導入を対象に開発したものである。位置姿勢を計測するシステムは、シールド機の横滑りや掘進施工直後のセグメントの変位等の影響を受けることなく測量でき、しかも、定期的に行われていた光学測量による確認が1週間～1ヶ月の間不要となる。それぞれの

表-1 ジャイロランナーの主な仕様

自動測量システム	
①. 後方位置計測部	
● 自動追尾式トータルステーション	
測角精度	： ± 1 0 秒
測距精度	： ± 2 mm
● 自動レベル装置	
水平調整精度	： ± 1 0 秒以内
● 基準点用プリズム	
二連式追尾測距専用プリズム	
②. ジャイロ走行計測部	
● 角度分解能	： 0. 0 0 1 度
● 距離分解能	： 0. 4 mm
● サンプルング周期	： 5 0 m s e c
③. シールド機位置姿勢計測部	
● 画像計測用カメラ	： 5 インチCCDカメラ
● カメラ画素数	： 30 256 × 244
● 計測用ターゲット	： 高輝度LED集合ランプ
自動誘導システム	
● 方向制御パターン分割数	： 16°-1°×4x7
● 補助手段	： 掘進データによる経験学習機能
● 制御本数	： 全ジャッキ
● 制御項目	： 本数、総推力

システムは、各種計測装置と自動計測・演算処理・自動制御の機能を持ったソフトウェア及びパソコンなどで構築されている。（表-1および図-1を参照）

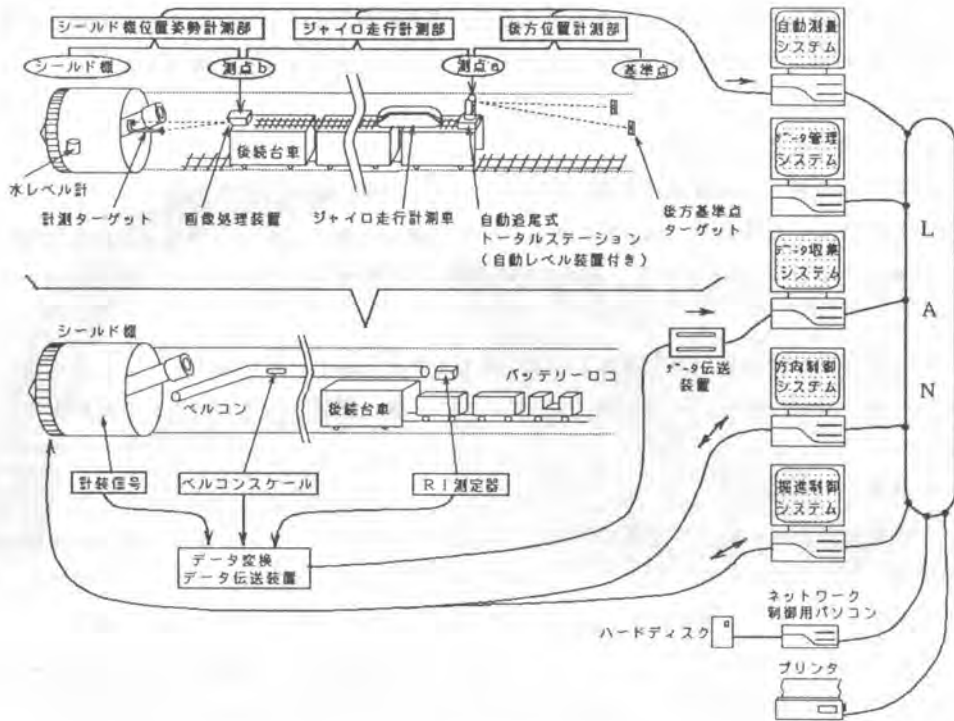


図-1 「ジャイロランナー」システム構成図

(1) 自動測量システム

新しい自動測量システムは、自動追尾式トータルステーション、ジャイロ走行部、画像処理装置等を組み合わせて、毎回後方の既知基準点からシールド機の位置と姿勢を計測するもので、①後方位置計測部、②ジャイロ走行計測部、③シールド機位置姿勢計測部の3つの計測部からなる。

① 後方位置計測部

従来の光学式の問題点であった曲線施工におけるレーザートランシットの盛り替えやセグメント移動による測量精度への影響をなくすため、自動追尾式トータルステーションを後続台車の最後尾に設置した。この自動追尾式トータルステーションが、後方のセグメントに固定した基準点（反射プリズム）を自動追尾して距離と角度を計測し、後続台車上の測量機械自身の位置（測点a）を逆算して求める。

②ジャイロ走行計測部

特に見通し空間を確保しにくい後続台車区間の計測を行うため、ジャイロセンサーを搭載した計測車を自動走行させる。ジャイロ走行計測車は、シールド後続台車上の軌条に沿って（測点 a ～測点 b）走行させ、方位角と距離の変化量を連続検出し走行軌跡を計測する。これにより最後尾台車から先頭台車までの相対位置を求める。方向角を検出するジャイロセンサーの選定にあたっては、船舶用ジャイロと航空機用ストラップダウン方式のジャイロを検討した。

③シールド機位置姿勢計測部

先頭台車に設置した画像処理装置を用いて、シールド機に取り付けた計測ターゲット（LED光源）の位置を計測し、先頭台車（測点 b）からシールド機の位置と姿勢を計測する。画像処理による位置計測は、2台のCCDカメラで2個のLEDターゲットを画像として捉え相対位置を計測する。

①～③の計測部を組み合わせる事によって、後方基準点に基づいた位置（ x 、 y ）と姿勢（ヨーイング方向角）を求める。また、レベル高（ z ）はシールド機に設置した水レベル計で計測する。

（2）自動誘導システム

シールド機を計画線に沿って誘導するためには、適切な使用ジャッキの選定と推進制御が重要である。従来、この作業は熟練したオペレータの判断により行われていたが、本システムでは、掘進データを基にした経験学習機能によりシールド機固有の方向特性（シールド機のくせ）や地山状況の変化等に対応した最適なジャッキパターンの選定を行う事により、計画線に沿って高精度に自動誘導する。シールド機の掘進には、土質の変化または土被りの変化による土圧の変化及びシールド機の形状等による影響から、シールド機の曲がり易さも変化する。本学習機能では、シールド掘進中に得られる種々のデータをもとに、これらの間接的要因をデータベースとして蓄積する。このデータベースは、過去の掘進区間のデータを統計処理によって検証を行い、最適値に自動変更される。ジャッキパターンの発生原理は、計画線とのズレ量から決定された回転モーメントを基に過去のデータベースと照合し補正する方式である。この方式によって、シールド機の方向特性（シールド機のくせ）を考慮した最適な推進ジャッキの選択ができる。

3. システムの特徴

- ・小断面・急曲線に高精度に対応できる。
- ・シールド機の横滑りに影響されない位置・姿勢計測ができる。
- ・累積誤差を生じないので高精度な測量ができる。
- ・毎リング基準点に基づく自動測量を行うので人力測量の回数が減り、大幅な測量管理工数の削減ができる。（直線区間では、シールド断面にかかわらず1ヶ月以上の無人測量を可能とする。）
- ・学習機能によりシールド機の諸特性や地山の状態に応じた最適なジャッキパターンを決定でき、熟練オペレータと同じ判断で誘導が可能である。

4. フィールド総合計測実験及び現場導入

(1) フィールド総合計測実験

本システムの現場導入に先立ち自動測量精度を実証するため、小断面・急曲線シールドを想定した実験設備を設け、計測実験を行った。実験の結果、後方基準点に対するシールド機先端位置の測量精度は、目標精度（1/5,000:対測量距離）を確保する良好な結果が得られた。（写真-1参照）

写真-1 フィールド総合計測実験状況

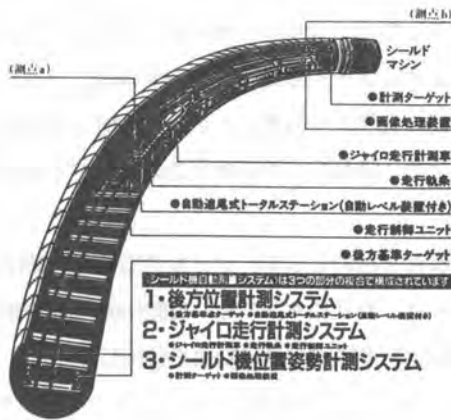


図-2 自動測量システム計測概要図

シールド機外形	: φ2,000mm
路線線形	: 30m R
後続台車区間長さ	: 約2.8m
後方基準点～シールド機の距離	: 約100m

(2) 現場導入

引続き、当システムを東京都多摩地区の現場に導入し、現場での実証試験を行っている。現在、目標精度（1/5,000:対測量距離）を確保し、良好な結果を得ている。

5. あとがき

シールド工事の完全自動化を達成するためには、掘進管理、位置姿勢管理、方向制御、セグメント組立、坑内搬送など数々の自動化技術の開発が必要である。今回紹介したジャイロランナーは、位置姿勢管理と方向制御の自動化を達成したものである。また、当社において掘進管理は土圧シールドエキスパートシステムやR I 測定器を用いた体積シールド工法として既に実用化している。今後は、坑内搬送、セグメント組立の自動化等を図り、シールド工事の完全自動化を目指して、これらの自動化技術の開発を進めていきたい。