

52. 小口径および曲線部に対応した 自動測量ロボット

“シールド・サーベイ・ロボット・システム”

東亜建設工業(株)：*井上 伸二・増田 稔
永木 君治

1. まえがき

シールド工法は日本で本格的に採用されてから30年以上経過している。その需要に関しても都市およびその周辺での上下水道や、電力、通信、地下鉄などの都市トンネルが急激に増大してきた。さらに新しいジオフロントとしての開発計画も検討され、大深度地下空間を利用した生活、都市、エネルギー上下水道、通信、鉄道、道路、パイプライン等の構想も計画され始めている。

これらを背景に現在、シールド施工においては、トンネルの品質向上、省力化、安全施工を目的として自動化が積極的に進められている。特に、測量は掘削の際に基本となる作業であるとともに、品質向上の基盤になるものであり、その自動化には大きな期待が寄せられている。測量の自動化は、大・中口径シールドではすでに数多く発表され実用されているが、それらのシステムをそのまま小口径シールドに適應するには、あまりにも作業空間が狭く計測装置の設置が困難であり、さらにカーブ部では視準距離が短くシステムの移設に手間がかかると言う問題があった。

これらの問題を一挙に解決するため開発したのが自動測量システム「シールド・サーベイ・ロボット・システム」である。本システムは、計測装置のコンパクト化を図るとともに、新たに開発した計測システムにより小口径での連続自動測量を実現した。

2. 小口径・曲線施工における測量

従来、小口径での自動測量は「ジャイロ方式」が多用されているがシールド機の横すべり(スライド)現象への対応が困難で人力による定期的な補正測量が必要となっている。

これに対し、安定して高い精度を確保するには「光学式」の採用が有効となるが、小口径の工事や曲線施工の多い工事では照射距離の限界と曲線部における照射空間の確保のため従来の既知点に設置する方法では盛替作業が頻繁となり、人力の作業を排除することは出来ない。

従来の「ジャイロ式」「光学式」は、測量員や施工管理者が最も苦勞する小口径の曲線部施工では、盛替作業や補正測量の頻度の多さから測量の自動のメリットは小さかった。

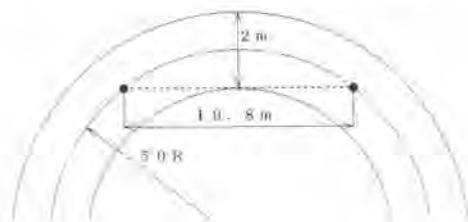


図-1 見通し距離

ここで、小口径(2000mm)・カーブ(50R)での照射距離(見通し距離)のモデル計算を行うと、19.8mとなる。シールド機の動力・制御を行う後続台車が40m近くになることを考慮すればシールド機より20m後方近傍の既知点に測量設備を設置することは空間の乏しい坑内では事実上困難となることが解る。

3. 自動測量システム開発の目標

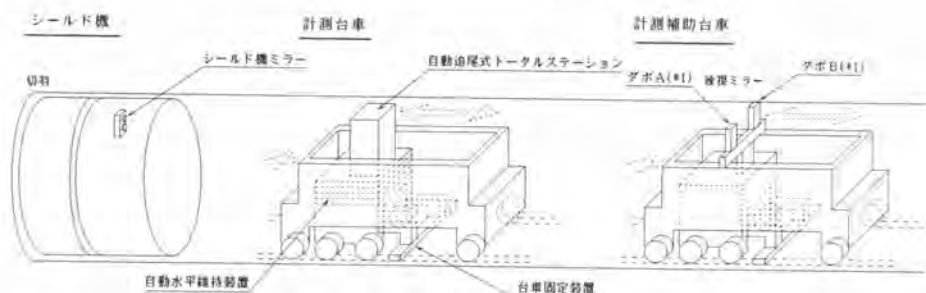
限られた狭い空間において、高精度なトンネルを能率良く安全に行う施工技術の確立を目指し、

- ①小口径（2000mm）に対応し、
- ②曲線部（50R）での連続使用可能で、
- ③人力作業を可能な限り排除する、

「自動測量システム」を実用化することを具体的目標として開発を進めた。

4. システムの概要

「シールド・サーバイ・ロボット・システム」は、シールド機の前進に伴い、自らが移動・固定を繰り返しながらシールド機に追従して、常に掘進中のシールド機の位置をリアルタイムに自動計測しながら路線管理を行うシステムである。図-2にシステムの概念図を示す。



(*]ダボ点：ここではトータルステーション位置算出時の基準となる点を言う

図-2 「シールド・サーバイ・ロボット・システム」の概念図

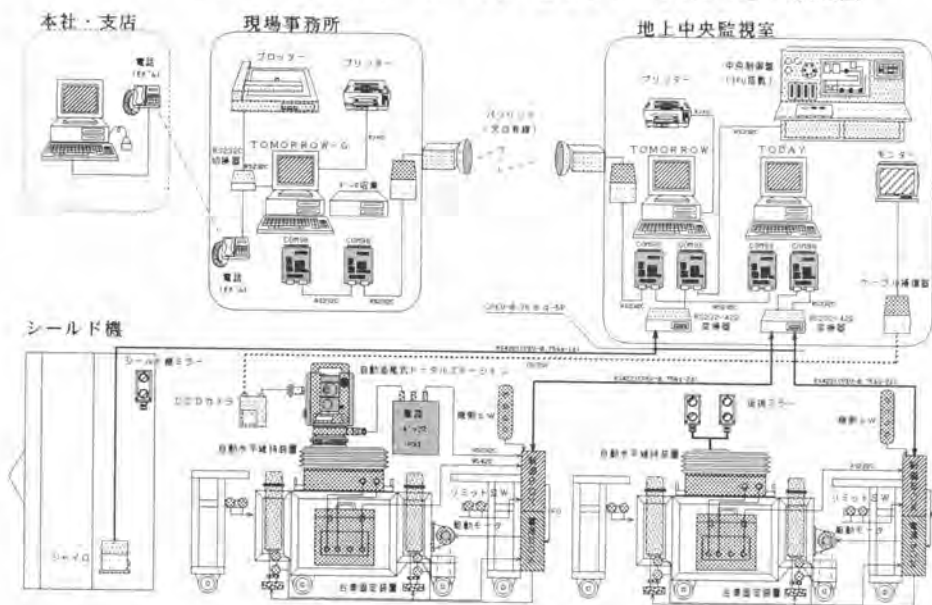


図-3 システム構成図

4-1. システム構成

システムは、自動追尾式トータルステーション及び後視ミラーを搭載した2台の台車からなる「計測部」、これらの装置を自動制御する「制御システム部（TODAY）」、及び位置情報を演算処理し表示する「路線管理システム部（TOMORROW）」で構成される。また、必要に応じて離れた場所に情報を通信しながら位置情報を表示する「路線管理システム部（TOMORROW-G）」を装備することが出来る。図-3にシステム構成図を示す。

これにより、設計路線及び最適な誘導路線（変位・変角が生じた場合に無理なく設計路線にすりつけるために自動設定された新しい路線）との位置関係を常に把握しながら正確な路線管理を行うことが出来る。

4-2. 計測部の動作原理

シールド機後方（15～20m）に自動追尾式トータルステーションを搭載した計測台車と更にその後方にダボ点用ミラーを設置したミラー台車が後続台車の一部となりレール上を動く。

各台車は2重構造となっており、シールド機掘進中は外側の台車のみが移動しレールに固定された内側台車上のトータルステーションでシールド機の反射ミラーを追尾し位置を連続計測することが可能となる。また、掘進待機時に内側の台車を交互に移動・固定することにより計測・ミラー台車のお互いの座標を求めることが出来る。

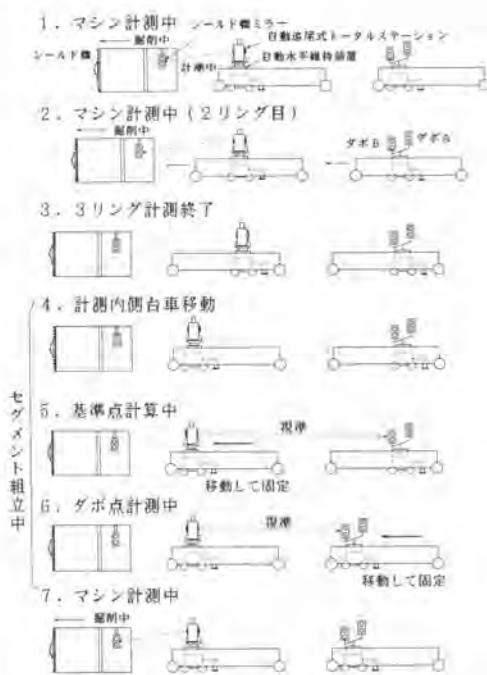


図-4 運転原理図

システムは、この作業を繰り返しながら随時前進していく「尺取り虫方式」と言え、下記の様な具体的動作を行う。

- ①シールド機掘進中、内側台車はレール上に固定されトータルステーションによりシールド機の位置を計測する。
- ②シールド機が掘進するにしたがい外側台車が追従していき内側台車はレール上に固定されたまま計測を続ける。
- ③設定リング分（外側台車に対して内側台車の移動可能距離とセグメント長によって決まる）移動後計測を中断する。
- ④計測内側台車が前方に移動する。
- ⑤ダボA、B、シールド機の各ミラーを順次視準しトータルステーション設置座標の計算を行う。
- ⑥ミラー内側台車を前方に移動させダボA、ダボBの設置座標をトータルステーションにより算出する。
- ⑦再びシールド機のミラーを視準し位置計測する。

5. システムの特徴

【シールド・サーベイ・ロボット・システム】

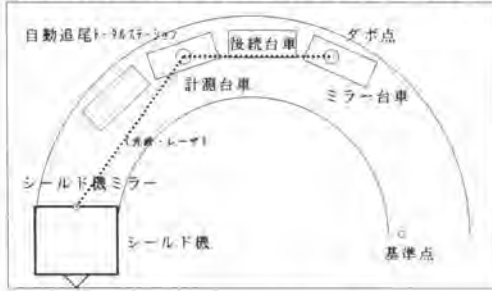


図-5 システム特徴

本システムは、①装置全体を後続台車内の「計測台車に搭載」、②台車は2重構造による「尺取り虫方式」、③測距・測角を「近距離（10～20m）計測」、④移動・計測が「全自動（無人）化」等の特徴としている。

本システムの採用によって、①小口径での使用が容易、②曲線部での連続計測が可能、③近距離計測により位置精度の向上、④光波及びミラーの盛り替えが不要、⑤人力による確認測量の削減等が期待出来る。

6. 確認実験・現場実験の実施



図-6 実験の実施

「シールド・サーベイ・ロボット・システム」は、精密機器を搭載して自動走行すること等から、開発初期より様々な問題点が予見された。このため、確認実験を重ねながら問題点の抽出と解決策を検討した。

繰り返し作業（尺取り虫方法）であることに起因する基準点位置の累積誤差の発生は重要な問題であり、高水準の基準点算出方法（収束計算）を採用した。

坑内においては環境条件が厳しいことから、温度、湿度、特に精密機器に大きく影響を与える振動の問題、通常の使用条件から外れる近距離計測におけるトータルステーションの精度確認など機器の単体試験や実際の環境下での現場実験を行った。

7. 実機による現場実験の実施

確認実験の結果を基に実機の設計・製作を行い、陸上実験及び現場実験を行なった。

7-1 陸上実験

東亜建設工業（株）の機材センター構内に40mのレールを布設し、実機の動作確認後、精度試験を実施した。写真-1に実験状況を示す。

実験方法はシールド機位置に相当するミラーを固定点とし、「尺取り虫移動と収束計算」毎にその変位を記録した。

【結果】

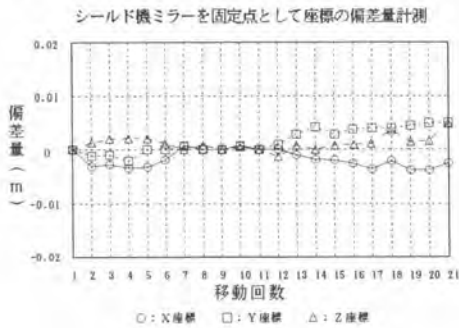


図-7 陸上実験結果

陸上実験の結果、

- ①当初、自動追尾や台車移動の不具合が発生、通信タイミング等を調整することにより動作はスムーズに行われる様になった。
- ②精度試験に関しては、21回の移動（距離に換算して21回×3RING×0.7m=44.1m）に対して「±10mm」となり管理目標内での測量が出来た。図-7に実験結果偏差量グラフを示す。

7-2 現場実験

陸上実験終了後、セグメント外径2000mm泥水式シールドの現場【東京電力株式会社発注、五香駅付近管路工事】において試験を実施した。ここでは、実現場での動作、位置精度及び曲率半径75R（一部30R 区間があるが未自動測量）区間での自動測量の実用性について確認した。写真-1～4に現場運用状況を及び画面表示例を示す。



写真-1 運用中の計測台車



写真-2 運用中のミラー台車

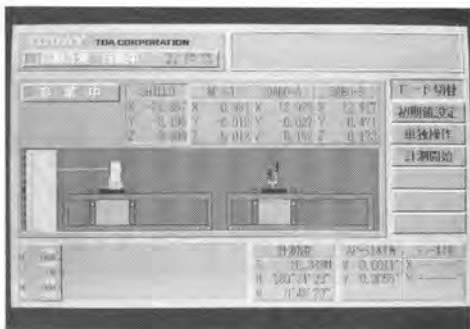


写真-3 TODAY画面例

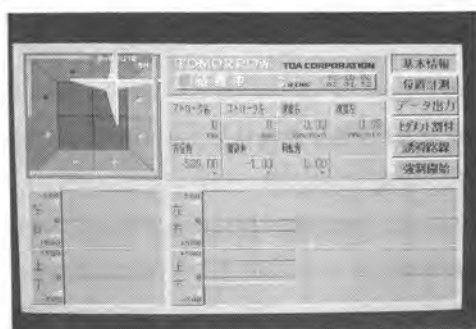


写真-4 TOMORROW画面例

【結果】

実験は、通常の作業（掘進、セグメント搬入・組立等の通常サイクル）や通常の設備（枕木、レール等）で行なった。「尺取り虫方式」動作については下記の初期不良が発生したが、一部の改善・改良を行うことにより正常な動作が可能となることを確認した。これにより、掘進作業や掘進設備を変更することなしシステムを運用することが可能となった。

初期不良とその対処として、

- ①固定装置がレール止めに接触し移動不良。→固定装置の位置変更で対処。
- ②車輪が空回りし移動不良。→4輪駆動に変更または重量配分変更で処理。
- ③裏込め関係設備及び作業員に光波が時折遮断され、セグメント組立中での移動が不完全。
→作業員に対する指示と警報装置で処理。

等があった。

他の測量機の計測値（シールド機ミラー）を真値とした場合の偏差の偏差量計測

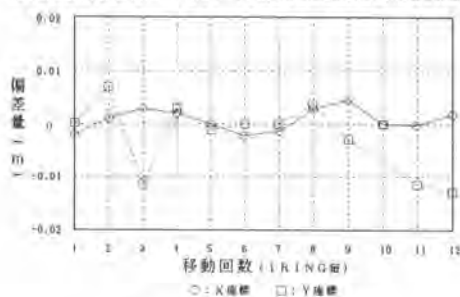


図-8 現場実験の結果

精度においては、実用上の管理目標を確保する見通しがついた。図-8に実験結果偏差量グラフを示す。

陸上試験との差の原因は、

- ①固定点の比較でなく、別の測量機での測量値を真値として取り扱っている点、
- ②バッテリーロコや人の移動の有無、
- ③シールド機や後続台車からの振動の有無、
- ④レールと枕木の固定方法の違い
などから起因しているものと考えられる。

8. あとがき

現在、中・大口径シールドにおいては、自動測量システムが実用化されている。しかし、小口径シールドにおいては、測量機器を設置する空間の確保が困難で自動化が一步遅れているのが現状である。

今回開発した「シールド・サーベイ・ロボット・システム」は、「小口径シールド」及び「カーブ」での運用を可能としたものである。今後、現場での使用実績を重ねて、システムの完成を目指していきたい。

最後に、本システム開発を進める過程でご協力をいただいた神奈川県内広域水道企業団殿ならびに東京電力（株）殿にお礼申し上げます。

<参考文献>

- (1) 鈴木 章：シールドトンネルの新技术（将来展望）、トンネルと地下、（株）土木工学社、1992
- (2) 今倉和彦：自動測量システムとその施工事例、シールド自動測量・制御システムとその導入／施工事例、（株）技研情報センター、1991
- (3) 高江真文：自動測量システムと施工事例、シールド自動測量・制御システムとその導入／施工事例（株）技研情報センター、1991