

# シールド自動誘導システムに関する研究（その3）

——現場実験による測定精度の検証——

山下幸夫 藤原紀夫

## Study on Automatic Guidance System for Shield Machine (Part 3)

——Verification of Measuring Accuracy by In-Situ Experiment——

Yukio Yamashita Toshio Fujiwara

### Abstract

It is the purpose of this study to develop a system for automatically measuring the location and posture of a shield machine and guiding it with minimum variation in relation to the designed route. This paper describes the results of a verification experiment at a construction site conducted for an automatic measuring system.

The In-Situ experiment was carried out at a straight section and a curve 150 m in radius. The results of automatic measurements were compared with surveys of the tunnel and investigated. As a conclusion, it was made clear that this system is capable of measuring horizontal declination of less than 30 mm and vertical of 15 mm, considered allowable ranges for practical purposes.

An automatic guidance system can be easily structured by adding a control function to the propulsion jack.

### 概要

この研究はシールド機の現在位置と姿勢を自動計測し、計画路線とのズレ量を最小にするよう誘導するシステムを開発することを目的としている。ここでは後方に視準空間を必要としない簡易な自動計測システムについて、現場実験を行ない測定精度を検証した結果について述べる。

実験は直線区間と曲率半径 150 m の曲線区間で実施した。自動計測の結果は坑内測量のそれと対比して考察を加えた。結論として、自動計測では水平偏差を 30 mm 以内で、また鉛直偏差については 15 mm 以内の精度で測定できることが明らかになった。実用上、許容できる範囲であると思われる。

この計測システムに推進ジャッキの制御機能を付加することにより、自動誘導システムを構築することが可能となる。

### 1. まえがき

シールド機の位置・姿勢を自動計測する方法には、①レーザービームを利用するもの、②ジャイロコンパスなどを用いるものがある。このうち①はトンネル坑内にレーザービーム照射装置を取付け、シールド機に固定した受光器で検出して、マシンの方向及び設計路線からのズレ量などを測定しようとするものである。いわば外部の基準点をベースにした位置認識手法の一つといえる。一方②はシールド機に直接搭載した慣性センサーなどを利用して位置認識を行なう。

ここで述べる自動計測システムはジャイロコンパスに圧力式沈下計と傾斜計を組合わせたものであり、上記②の手法に属している。トンネル坑内に視準空間が不要となるため、坑内での制約が多い小断面シールドや、曲率

半径の小さな路線では特に有効であると思われる。ただ反面、位置認識に関する絶対基準がなく、平面位置は1リングごとに積算して求めなければならないため、掘進に伴って累積誤差が生じ易いという欠点を有している。この点についてはチェック測量を併用することにより解決を図るものとする。

前報<sup>1),2)</sup>では計測システムの概要と、模型実験による測定精度の検証結果について述べた。ここでは実際のシールド工事を対象にして現場実験を行ない、坑内測量の結果と対比して測定精度を検証した結果について述べる。

### 2. 工事概要

この工事は掘削外径 2,772 mm、工区延長 1,216 m の上水道管路をシールド工法により施工するものである。当該地域には N 値 0 ～ 5 程度の軟弱な沖積層が広く分布

しており、シールドは道路直下の砂質シルト地盤内を土被り 8.9~14.9 m で通過する。図-1 にトンネル標準断面図を示す。

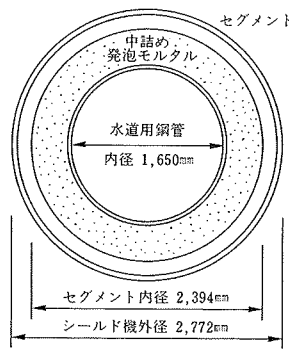
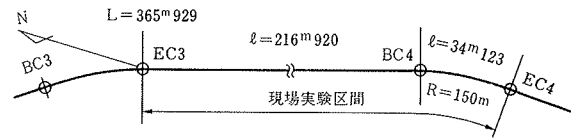


図-1 トンネル標準断面図

坑内測量は昼夜作業の交代時間を利用して1日2回実施されている。また上記以外にも昼休み時間内に追加測量が行なわれているが、これは掘進の良否を途中で

概略把握するために組立てたセグメントに対して実施するものではない。従って、ここで述べる自動計測との対比のうえでは、1日2回実施される測量結果がすべてということになる。

図-2 に路線平面図の一部を示す。実験はこのうち、(1)直線区間(EC3~BC4)及び(2)曲線区間(BC4~EC4, 曲率半径 150 m)の2箇所で行った。縦断線形はいずれも3‰の上り勾配である。



基準点	区間距離	累計距離	方位角
EC 3	—	365 <sup>m</sup> 929	163° 51' 04"
BC 4	216 <sup>m</sup> 920	582 <sup>m</sup> 849	163° 51' 04"
EC 4	34 <sup>m</sup> 123	616 <sup>m</sup> 973	176° 53' 07"

基準点	X 座標	Y 座標	Z 座標
EC 3	1081 <sup>m</sup> 089	645 <sup>m</sup> 662	1 <sup>m</sup> 098
BC 4	1141 <sup>m</sup> 422	437 <sup>m</sup> 301	1 <sup>m</sup> 749
EC 4	1143 <sup>m</sup> 272	403 <sup>m</sup> 301	1 <sup>m</sup> 851

図-2 路線平面図 (一部)

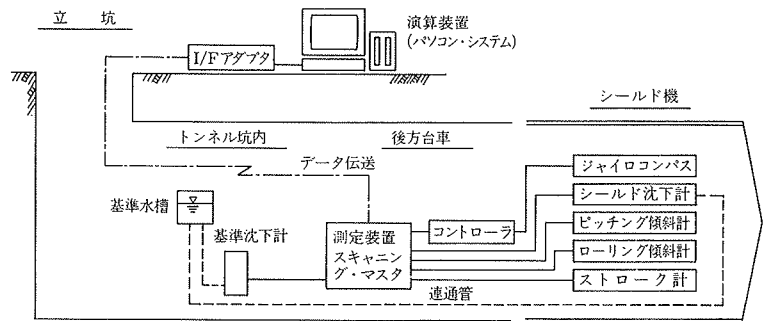


図-3 自動計測システム系統図

### 3. 自動計測システム

#### 3.1. 計測システムの構成

シールド機の現在位置と姿勢を決定するためには、掘進距離とその方向、高さの変化、及び軸回りの回転などに関する計測データが必要である。ここでは次の方法で測定を行なうことにする。

- (1) シールド機の方位：ジャイロコンパスで測定
- (2) 高さ（標高）の変化：圧力式沈下計で測定
- (3) ローリング、ピッチング：傾斜計で測定
- (4) 累計掘進距離：組立てたセグメントのリング数及び推進ジャッキのストローク長

図-3 に自動計測システムの配置図を示す。シールド機に搭載された各種計器の指示値は、後方台車上に設置した測定装置により自動計測され、通信回線を経て地上側の演算装置 (パソコン・システム) に伝送される。ここで即時に演算処理され、シールド機の現在位置、姿勢及び計画路線に対するズレ量 (偏差) が画面上に表示・出力される。計測の時間間隔は任意に設定可能であるが、ここでは約10秒とした。従って約10秒ごとに掘進中の新しいデータが測定され、結果が画面表示されることになる。

基準沈下計はシールド沈下計と組合わせて、坑内の温度変化に伴う指示値の変動を除去するために用いる<sup>2)</sup>。

#### 3.2. ジャイロコンパスの特性

計測項目のうち、ジャイロコンパスによる方位角の測定は、自動計測システムの中心となるものである。ここでは今までの基礎実験に用いたペンジュラス・ジャイロに替えて、船舶用に開発されたジャイロコンパスを使用することにした。

一般に、土木工事の計測は他の工業計測に比べて作業環境が悪くなることが多い。特にシールド工事では坑内の高温多湿な環境に加え、振動・衝撃などの影響を受けるため、これらの外乱に対する安定性と計測データの信頼性が要求される。ペンジュラス・ジャイロは吊り線によりジャイロモータの回転支持枠を保持するという構造上の特性から、測定精度は比較的良好いものの、外乱の影響を受けやすく振動・衝撃に弱いという欠点があった。その点、今回使用するジャイロコンパスは安定性と信頼性の面で優れている。ただ公称精度は±0.2度(12分、分解能は0.01度)と、ペンジュラス・ジャイロ(±3分)に比べて劣っている。

図-4 は静止状態におけるジャイロコンパスの指示値の変化を調べたものである。起動後5時間程度(これを指度静定時間と呼ぶ)を経過すると、安定した指示値を示していることが分かる。指示値の変動はほぼ±0.1度の範囲にあるが、これは上記の公称精度の半分である。シールド掘進中はマシン自体の方向も変化するため、その精度を正確に把握することは困難であるが、今までの

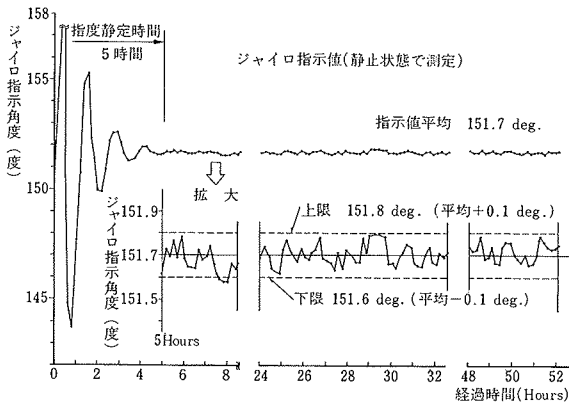


図-4 ジャイロ指示値の経時変化

経験では静止状態の場合と大差ない精度で測定できているものと思われる。なおジャイロコンパスは一度起動すると以後は連続運転されるため、指度静定時間の存在が自動計測に制約を及ぼすことはない。

3.3. 累計掘進距離

シールド機の位置を決定し計画路線とのズレ量を求めるためには、基準位置から測った路線の累計距離が必要である。当システムではセグメント幅を基準とし、組立てたリング数から累計距離を算出することになっている。この方法は次の理由から容認できるものと思われる。

①セグメントは工場生産により厳しい品質管理のもとで製造されており、長さを測る“ものさし”として利用できる。②シールドの軌跡は一般に計画路線に対して蛇行しており、厳密には両者の距離は異なる。ただしその差は比較的小さいと考えられる。

ただセグメントにも製造上の許容誤差があり、また止水シールドがセグメント継手間に存在するため、これらの要因が累計距離に影響を及ぼすことも考えられる、そのため実測により距離をチェックするなどの注意が必要である。シールド掘進中の距離はジャッキストローク計により測定する。

4. 計測データの処理

自動計測の結果をもとにシールド機の位置・姿勢を計算する方法については、前報<sup>2)</sup>に詳述している。ここでは現場に適用する場合の入出力について述べる。

図-5は自動計測のフローを示したものである。シールド工事の作業工程により、大別して次の3つの部分から構成されている。

(1) システムの初期化：工事起点または路線の途中でチェック測量が実施された場合、計測システムを初期化して、その時の坑内測量結果を入力する（位置・姿勢の初期値）。これと同時に各種計器の指示値が測定され、平均処理したあとと保存される（計測の初期値）。

(2) シールド掘進中の測定：初期値収録のあと、システムは自動計測に移行する。約10秒ごとにデータが更新され、シールド掘進中の位置・姿勢変化がコンピュータ画面に表示される。勿論これらの結果をもとに、オペレータに掘進指示を随時与えることもできる。

(3) 掘進終了後の測定：1リングの掘進が終了すると自動的にデータ収録状態になり、シールド停止中の計測が行なわれる。この計測は必要データ数に達するかまたは次の掘進開始まで継続され、平均処理したあとと最終的な位置、姿勢及び計画路線からのズレ量が決定される。計算結果を保存・印字出力したあと再び(2)の状態となり、以後(2)→(3)が繰返し実行されることになる。

図-6に画面出力の例を示す。この例では559リングを掘進中に、計画路線に対して水平偏差が-25 mm（進行方向左側へのズレ）、鉛直偏差が-9 mm（下側へのズレ）生じていることを示している。また現在の位置・姿勢がどのような状態にあるかについても、数値とイラストで表示されている。この情報から次の点が理解できる。

①水平偏差が左側に生じているにもかかわらず、シールド機自体も左に向いている。今後の掘進によって偏差が更に増大することが予想される。②鉛直偏差は下側に生じているが、シールド機は上向いており縮小する傾向にある。従って上下方向の制御はそのままにして、右方向

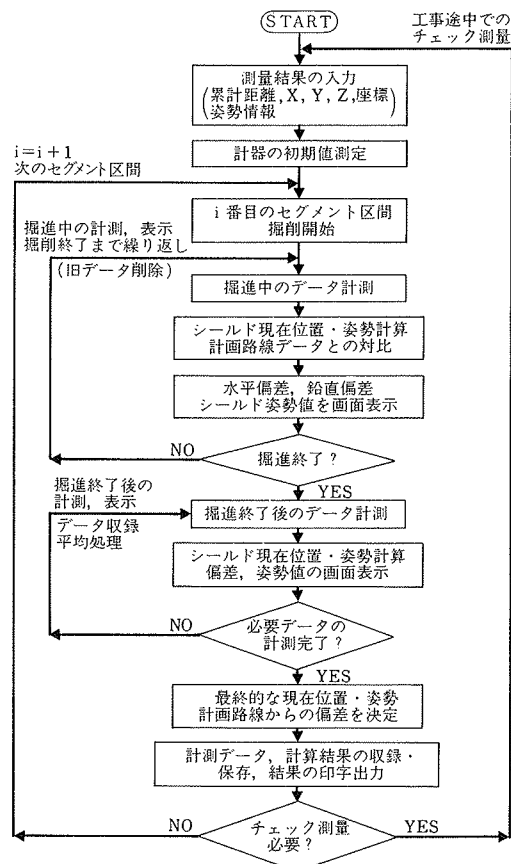


図-5 自動計測フローチャート

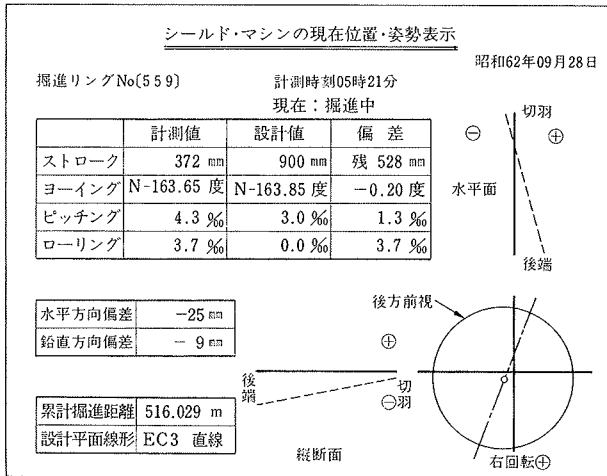


図-6 位置・姿勢の画面出力例

に掘進できるような処置を早期に採らなければならないことが分かる。

### 5. 現場実験の方法

現場実験の目的は、自動計測によってどの程度の精度でシールド機的位置・姿勢が測定できるのかを把握することにある。そのため、ここでは現場の施工管理とは全く独立に計測だけを行ない、坑内測量の結果を対比することにした。前章に述べたように、自動計測の結果をもとにシールド機を誘導することは行っていない。

実験は原則として1日に1回システムの初期化を行ない、その後実施される2回の計測結果と対比した。

### 6. 実験結果と考察

#### 6.1. シールド機の位置認識

シールド機は掘進によってその位置が刻々と変化する。図-7は掘進中の平面位置がどのように変化するかについて、測定結果の一例を示したものである。この例では掘進はシールド機が8mm左側に変位した状態から開始された。その後の掘進によってズレ量は更に増大しているが、現場では10リング後の最初の測量によって初めて気付くことになる。この時点で計画路線からのズレ量は27mmになっている。その後の修正指示で増大傾向は収まる方向にあるが、最終的に29mmのズレ量が生じている。

自動計測は測量値に対して9~11mmの誤差があるものの、掘進開始直後からこのような変位の傾向を良く表わしていることが分かる。早い段階で変位の傾向を把握することができるため、計画路線からのズレ量を結果的に少なくするよう制御することが可能となる。これが自動計測の特長であり、大きなメリットのひとつである。

#### 6.2. 水平偏差の測定誤差

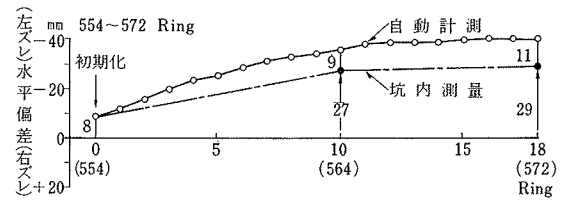


図-7 自動計測の測定例

表-1に自動計測値と測量値との対比を示す。現場では日進20リング前後の掘進が行なわれているが、ここでは中間の測量時点を含めて、片番(半日の作業工程)当たりの区間変化量を示した。

8~13リング掘進する間に、自動計測は測量値にたいして5~20mm程度の誤差が生じており、最大で28mmである。この傾向は直線区間、曲線区間とも同様である。また一日を通して測定した結果も、18~22リングの掘進に対して最大29mmと、掘進距離が約2倍になっているにもかかわらず、最大誤差はほとんど変わっていない。

この計測システムでは、平面位置の計算はジャイロコンパスの指示値の変化をもとに行なっている。そのため1リングごとに積算しなければならず、掘進に伴って累積誤差が生じることが懸念されていた。掘進距離が約2倍になっても偏差が増えないのは、測定誤差が余り累積しないことを意味している。表-1から明らかなように、測定誤差は必ずしも一定方向に偏って生じるのではなく、⊕⊖の相方に生じるためと考えられる。

図-8は、一日ごとに区切って実施した実験を、途中での初期化を行わず連続して測定したと仮定した場合の平面位置の経時変化を示したものである。ここでは連続した515~603リングの値で求めた。88リング(79.2m)の掘進に対して最大誤差は30mmである。先述した10リング及び20リング相当の掘進と同程度である。

#### 6.3. 鉛直偏差の測定誤差

シールド機の高さの変化は圧力式沈下計を用いて、基

セグメント番号 (Ring No.)	掘進リ ンク数 (Ring)	水 平 偏 差 (mm)			備 考 継続測定で の最終偏差
		坑内測量 開始→終了(変化量①)	自動計測 開始→終了(変化量②)	差 ②-①	
1) 515~524	9	+48→+32(-16)	①48→+16(-32)	-16	mm, Ring -11(19)
	10	+32→-3(-35)	+16→-14(-30)	+5	
2) 534~544	10	-3→+5(+8)	②3→-3(0)	-8	0(20)
	10	+5→-8(-13)	-3→-8(-5)	+8	
3) 554~564	10	-8→-27(-19)	③8→-36(-28)	-9	-11(18)
	8	-27→-29(-2)	-36→-40(-4)	-2	
4) 572~581	9	-29→-37(-8)	④29→-45(-16)	-8	同左
	10	-37→-30(+7)	⑤37→-2(+35)	+28	
5) 581~594	9	-30→-37(-7)	-2→-8(-6)	+1	+29(22)
	10	-37→-37(0)	-8→-8(0)	0	
6) 603~613	-	-	-	-	-
7) 613~621	8	-45→-5(+40)	⑥45→5(+50)	+10	同左
8) 621~631	10	-5→-35(-30)	⑦5→-47(-42)	-12	+13(20)
	10	-35→-29(+6)	-47→-16(+31)	+25	
9) 641~651	10	-29→-24(+5)	⑧29→-6(+23)	+18	同左

1)~8); 直線区間, 9); 曲線区間 ⊕⊖; 測量値をもとにシステム計算値を初期化した  
(+)は進行方向右側, (-)は左側へのズレを示す。

表-1 自動計測と坑内測量との対比 (水平偏差)

準水面からの絶対変化量で測定される。従って平面位置の計算と異なり、掘進に伴って測定誤差が累積されることはない。

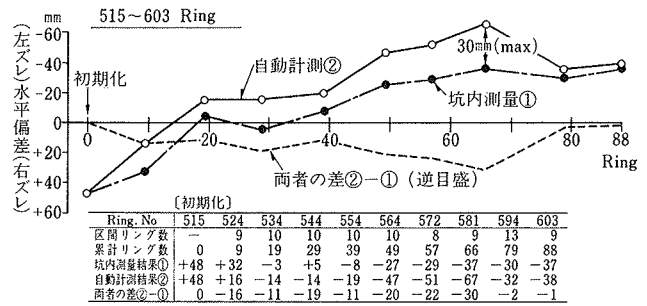
表一2に測量値と対比した場合の鉛直偏差を示す。測量値に対して2~15mmの誤差が生じていることが分かる。現場に適用した場合、誤差が大きくなる原因は、沈下計と基準水槽を結ぶ連通管に振動が加わるためと考えられる。連通管はシールドテール部では後方台車けん引用のワイヤーロープに固定されているが、掘進終了後の保存データ測定中は、丁度セグメント組立て時期と重なるため、作業員がワイヤーに触れることが多く連通管を振動させやすい。連通管の振動により沈下計の指示値が変動することは前報<sup>1)</sup>で報告している。

### 7. むすび

ここではジャイロコンパスに圧力式沈下計と傾斜計を組合わせた自動計測システムを用いて、現場実験を行ない、坑内測量の結果と対比して測定精度を検証した結果について述べてきた。その結果、水平偏差については30mm以内で、また鉛直偏差は15mm以内の精度で測定できることが明らかになった。必ずしも満足できる精度ではないが、実用上は許容できる範囲であると思われる。

今回の実験では、一応1日ごとに自動計測値を初期化し、その後の掘進による変化量を測定する方法を採った。ただ図一8に示したように、長距離掘進の場合でも測定精度はそれ程変わらないことが認められた。チェック測量の間隔を長くすることができれば、当システムの便利さを更に高めることが可能となる。ただシールド工事ではセグメントを対象とした測量が必ず実施されるため、この時期を利用してシールド機の位置・姿勢測量を追加して行なうことは、それ程の制約になるものではないと考えている。

ジャイロコンパスは当システムの中心を担う重要な計器である。今回の実験で使用したものは振動・衝撃などの外乱に強く、安定性と信頼性に優れているが、その反面、精度が悪いという欠点がある。平面位置の測定精度を高めるためにも、高精度のジャイロコンパスを使用することが望まれる。測定精度の確保、外乱に対する安定性、小型軽量化及び価格などの面から、ジャイロコンパスの選定にはなお多くの問題が残されているのが現状で



図一8 長距離掘進の場合の測定誤差

ある。

自動計測において、高い精度で位置確認できる技術を開発することは極めて重要である。ただし、これと並んでもう一つ重要な点がある。早期に変位の生じる傾向を把握し、対策を講ずることである。

ここで提案した自動計測システムは、掘進中

のシールド機の位置・姿勢変化を常時モニターできることが一つの特長となっている。図一6, 7で示したように、このシステムを単独で使用して掘進管理に役立てることは、計画路線からのズレ量と蛇行を少なくするうえで有効な管理手法となり得る。ある程度大きな断面のシールド工事では、演算装置そのものを運転席に設置して、オペレータが画面を見ながら掘進操作することも可能となる。またシールド掘進ジャッキと連動させることにより、本来の自動誘導システムを構築することもできる。

今後はこのシステムの完成を目指し、更に研究を続けて行きたいと考えている。

セグメント番号 (Ring No.)	掘進リング数 (Ring)	鉛直偏差 坑内測量との差
1) 515~524 継続~534	9 19	+ 5mm - 2
2) 534~544 継続~554	10 20	+ 4 + 3
3) 554~564 継続~572	10 18	+ 4 - 11
4) 572~581	9	+ 9
5) 581~594 継続~603	13 22	- 15 - 5
7) 613~621	8	- 8
8) 621~631 継続~641	10 20	+ 13 + 7
9) 641~651	10	+ 6

(+)は上副(-)は下副へのズレを示す。

表一2 自動計測と坑内測量結果との差

### 参考文献

- 1) 山下, 藤原: シールド自動誘導システムに関する研究(その1) —ジャイロなどを用いた位置・姿勢測量の検討—, 大林組技術研究所報, No. 32, (1986), pp. 67~71
- 2) 山下, 藤原: 同題(その2) —シールド模型装置による測定精度の検証—, No. 34, (1987), pp. 37~41