

# シールド自動誘導システムに関する研究 (その2)

——シールド模型装置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 2)

——Verification of Measuring Accuracy Using Shield Propelling Model——

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 leading it with minimum variation in relation to the designed route.

The authors showed in the previous paper<sup>1)</sup> that the location and posture can be measured automatically by using a gyro, settlementer, and inclinometers. This paper describes the results of a verification experiment using a shield propelling model checked in comparison with transit and level.

As a result, it was made clear that this system can correctly measure the direction, rolling, pitching, and the elevation of the shield machine within the range of instrument accuracy. However, there is a tendency for errors to become cumulative with regard to plane location since calculations are handled for every ring, and in actual operation it would be necessary to perform check surveying a number of times to correct errors.

### 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。

前報<sup>1)</sup>では、ジャイロに圧力式沈下計と傾斜計とを組合せることにより、シールド機の現在位置と姿勢を自動計測できることを示した。この報告では模型装置によるシールドの推進実験を行ない、自動計測の測定精度をトランシットとレベルによる測量値と比較して検証した。実験の結果、シールド機の方位、ローリング、ピッチングおよび標高とも使用計器の精度内で正確に測定できることが明らかになった。ただ平面位置の計算はリングごとに処理されるため、推進に伴う誤差が累積しやすく注意が必要である。実際には計画路線の途中で何度かチェック測量を行ない、誤差を修正することになる。

## 1. まえがき

シールド工事は一般の構造物の施工と異なり、シールド機を地中で三次元的に移動させたあと、その後方でトンネルを構築しなければならないため、計画路線に対してシールド機が正しく掘進できているかどうかを、坑内測量により随時確認することが必要である。

ただし実際には作業サイクルなどの関係から、1日当たり2回程度の測量しか行なえないのが現実であり、その間の掘進によって偏差が生じやすく、施工精度を悪くする原因ともなっている。施工精度を高め、また坑内測量

の省力化をすすめるうえからも、自動計測によってシールド機の掘進状況を常時把握できるシステムを開発することが求められている。

前報<sup>1)</sup>では、ジャイロに圧力式沈下計と傾斜計とを組合せることにより、シールド機の現在位置と姿勢を自動計測できることを示した。ここでは上記の計器を用いてシステムを構成し、シールド模型による室内推進実験を行なった結果について述べる。

## 2. 自動計測システム

表一1に今回の自動計測で使用する計器および測定・

制御機器の一覧表を示す。表中には各計器の使用目的も併記した。

シールド機の現在位置と姿勢を決定するためには、推進距離とその方向、高さの変化、および軸回りの回転などに関する計測データが必要である。

このうちシールド機の平面内での方向は、搭載したジャイロで方位角を直接測定することによって求めることができる。レーザービームを使用する場合に比べてトンネル坑内に照射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。

シールド機の高さ（標高）は圧力式沈下計を用いて測定する。この計器は図-1に示すように、基準水槽の水面高さを基準として、沈下計までのレベル差を水圧の変化量で読み取る構造となっている。測定値は常に基準点からのレベル差で与えられるため誤差が累積しないという長所を備えている。ただし測定原理から、温度の変動による水の密度変化などの影響を受けるため注意が必要である。

図-2は圧力式沈下計を実験室内に静置して、気温が経時的に変化した場合の指示値の変化を調べたものである。沈下計の指示値は温度変化の影響を強く受け、この例では気温が9.4℃変動する間に、10.4mmの沈下量に相当する変化を生じている。ただしこれらの温度変化の影響は、特性が等しい別の沈下計を1台用意し、両者の指示値を差し引くことにより取り除くことができる。基準沈下計は坑内に設置して、シールド機に搭載した沈下計の温度補正を行なうために用いる。

シールド機のローリング・ピッチングおよびシールド掘進中の推進距離はそれぞれ傾斜計とストローク計で測定する。また1リングの掘進開始および終了を判定するため、圧力計

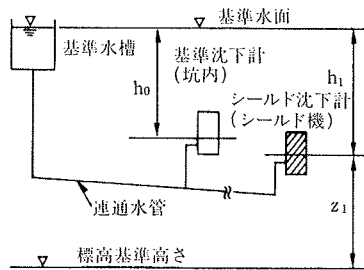


図-1 圧力式沈下計

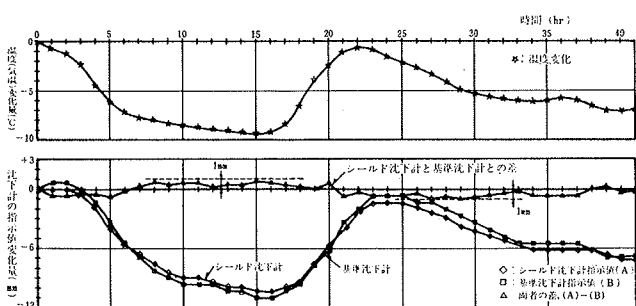


図-2 圧力式沈下計の温度による影響

使用機器	数量	使用目的(役割り)	
計器	ジャイロ	1台	シールド機の方位を測定
	圧力式沈下計	2台	シールド沈下計(1台);シールド機の高さの変化を測定 基準沈下計(1台);温度変化に伴う指示値の変動を補正
	傾斜計	2台	シールド機のローリングおよびピッチング(角度)を測定
	ストローク計	1台	シールド掘進中の推進距離を測定
測定(センサー)	圧力計	1台	推進ジャッキの油圧を測定し、掘進開始および掘進終了を判定
	ジャイロ・コントローラ	1台	ジャイロの起動・停止を制御すると同時に、方位角を測定 測定装置にデータを転送
	測定装置	1台	各種計器の指示値を常時測定し、演算装置にデータを伝送
制御機器	演算装置(パソコン)	1台	伝送された計測データを計算・処理し、画面出力および結果の保存などに係る作業を行なう

表-1 使用機器の一覧表

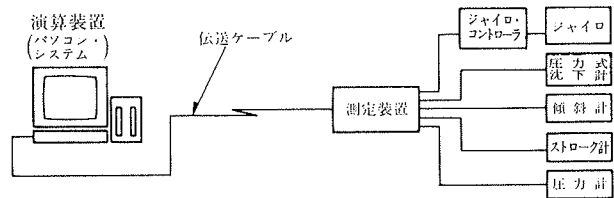


図-3 計測・処理システム

計器	型式	測定範囲	分解能	精度	
ジャイロ	SGC-2	表示359°59'	1分	±3分	
圧力式沈下計	シールド沈下計	HPV-500	±500mm	0.5mm	±2mm
	基準沈下計	同上	同上	同上	同上
傾斜計	ローリング用	FD-1,300V	±300分	0.2分	±3分
	ピッチング用	FD-1,100V	±100分	0.07分	±1分

表-2 各計器の測定精度

を設置して推進ジャッキの油圧を測定することにした。図-3に全体の計測・処理システムを示す。また表-2はジャイロ、圧力式沈下計および傾斜計の測定精度を一覧表として示したものである。

### 3. シールド機の位置・姿勢の計算方法

#### 3.1. 姿勢の計算

シールド機の姿勢は三次元空間の直交座標軸に対する回転角度で与えられる。いま右手系の座標をとり、掘進方向を図-4に示すようにy軸の正方向とすると、姿勢に関する諸元はそれぞれ次のようになる。

- (1) ローリング; y 軸を中心とした回転
- (2) ピッチング; x 軸を中心とした回転
- (3) ヨーイング; z 軸を中心とした回転

現在のシールド機の姿勢は、初期姿勢と計測結果をもとにして、それぞれ次式で求めることができる。

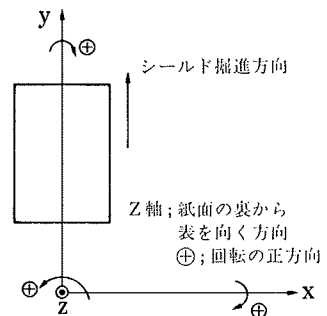


図-4 三次元直交座標(右手系)

$$R = R_{int} + (R_M - R_{M,int}) k_R \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$P = P_{int} + (P_M - P_{M,int}) k_P \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$Y = Y_{int} + (Y_M - Y_{M,int}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、R、P、Y；ロール角度，ピッチ角度，ヨー角度，添字の int は坑内測量した時点の初期値を，また添字Mは計測値を意味する。kは変換係数である。

3.2. 現在位置の計算

3.2.1. 掘進の累計距離 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。当システムでは組立てたセグメントのリング数から累計距離を算出することとしている<sup>1)</sup>。この場合，現在の累計距離は次式となる。

$$L = L_{int} + n_{ST} l_{ST} + n_{IS} l_{IS} + (J_{(t)} - J_{(t=0)}) k_J \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、L；基準位置からの累計距離，n；標準(ST)，異形(IS)セグメントのリング数，l；平均セグメント幅，J；現在掘進リングのストローク計読み値

3.2.2. シールド機先端中心 (切羽) の標高 シールド機の標高は，機内に搭載した沈下計の標高とその設置位置を基準として計算する。いま図-5に示す位置に沈下計が設置されているものとする，ローリングとピッチングが同時に生じたときの三元回転式から，シールド機先端中心の標高は次式で与えられる。

$$Z_2 = Z_1 + b \sin P + (a \sin R - c \cos R) \cos P \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、Z<sub>2</sub>；シールド機先端中央の標高，Z<sub>1</sub>；シールド沈下計の標高である。Z<sub>1</sub>は沈下計の読み値と坑内測量を行なった時点の標高から，次のように求められる。

$$Z_1 = Z_{1,int} + (h_{1M} - h_{1M,int}) k_{1S} - (h_{0M} - h_{0M,int}) k_{0S} - W_{10} k_{1W} + (W_{10} + W_{1R}) (1 - \cos \theta) k_{1W} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\theta = \sin^{-1} \sqrt{\frac{\tan^2 R + \tan^2 P}{\tan^2 R + \tan^2 P + 1}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

(6)式の第1項は坑内測量による初期値，第2項は計測による高さの変化量，第3項～第5項は基準沈下計での温度補正，カウンターウェイトを使用する場合の重り補正および沈下計が傾斜した場合の補正<sup>1)</sup>である。

トンネルの設計基準高さが断面の中心と異なる場合は次式で基準高さを求めて設計値と比較すればよい。

$$Z_2' = Z_2 - H \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに、Z<sub>2</sub>'；設計基準高さに対比するための標高，H；トンネル断面中心から設計基準高さまでの離れ

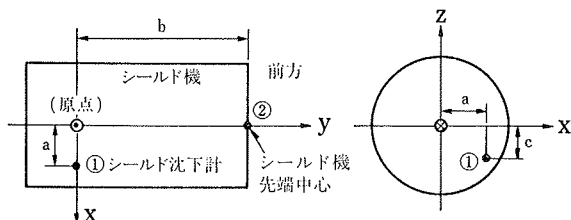


図-5 シールド沈下計の設置

3.2.3. 平面上の位置 シールド機の平面位置は，ジャイロによる方位角の測定結果と掘進距離を用いて計算する。

図-6はジャイロによる方位角の測定状況を示したものである。シールドは1リングの掘進中においても常に方位が変化するが，その軌跡を円形と仮定すると，掘進前後の方位とジャッキストロークを用いて，一つの方位ベクトルとして表わすことができる。

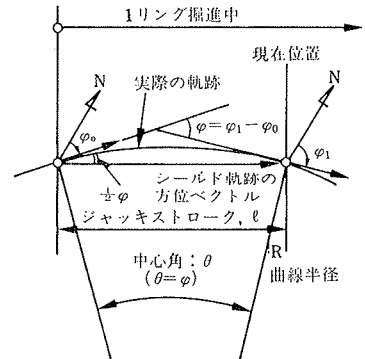


図-6 方向ベクトルの処置

$$\varphi_N = \varphi_0 + \frac{1}{2}(\varphi_1 - \varphi_0) = \frac{1}{2}(\varphi_0 + \varphi_1) \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$l_N = l \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここに、φ<sub>N</sub>；方位ベクトルの向き，φ<sub>0</sub>，φ<sub>1</sub>；掘進前後の方位角，l<sub>N</sub>；方位ベクトルの長さ，l；ストローク長

次に，平面内に直交したX～Y座標を考える。図-7はシールド機の位置と平面座標との関係を示したものである。掘進開始直前の位置を(X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>)とすると，

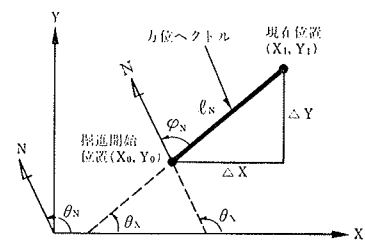


図-7 シールド機の平面位置

現在位置の座標 (X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>) は，図-6の方位ベクトルを用いて次式で表示することができる。

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= X_0 + \Delta X = X_0 + l_N \cos \theta_N \\ Y_1 &= Y_0 + \Delta Y = Y_0 + l_N \sin \theta_N \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\theta_N = \theta_0 - \varphi_N \quad \dots\dots\dots(12)$$

上記の計算を工事起点または路線途中で坑内測量を行なった地点から，順次繰返して実施することにより，シールド機の平面上での現在位置が求められる。X～Y平面上でのシールド機先端の現在位置は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_{int} + \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta X_i) + \Delta X_n \\ Y &= Y_{int} + \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta Y_i) + \Delta Y_n \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(13)$$

上式で，第2項は掘進が完了したセグメント区間に対応するもの，また第3項はn番目のリング掘進中の座標変化量を意味している。

3.3. 設計路線に対するズレ量の計算

シールド機の現在位置が設計路線に対してどの程度ズ

れているかを知るためには、まず現在位置に対応した設計路線上の位置を決定しなければならない。これは(4)式の累計距離Lから求めることができる。

設計位置の座標値が (Xdes, Ydes, Zdes) の場合、鉛直方向の偏差および水平方向の偏差は、(8)式および(13)式を用いて計算することができ、それぞれ次のようになる。

①鉛直方向偏差 (垂直方向のズレ量)

$$\Delta Z = Z_2' - Z_{des} \quad \dots\dots(14)$$

②水平方向偏差 (平面上のズレ量)

$$\delta = \sqrt{(X - X_{des})^2 + (Y - Y_{des})^2} \quad \dots\dots(15)$$

4. シールド模型による室内推進実験

4.1. 推進実験装置

自動計測システムの稼動状況を把握し、併せて計測の精度を検証することを目的として、シールド模型による室内推進実験を行なった。

図一8に推進実験装置の概要を示す。シールド模型は直径1,004 mm、長さ1,200 mmの半筒状で、その内部に自動計測のための計器を搭載する。路線はガイドレールで作製した。推進延長は6 mで、そのうち1.2 mは直線区間、4.8 mはR=10 mの曲線区間である。レール面にはシールドの前端と後端の2面で接触し、中胴部については非接触となる構造とした。

4.2. 実験方法

1回当りの推進距離を300 mmとして、この間に得られた自動計測の結果を各リングの推進完了ごとに実施したトランシットとレベルによる測量結果と比較して、現在位置および姿勢に関する測定精度を調べた。

表一3に計測項目と計測手段の一覧表を示す。

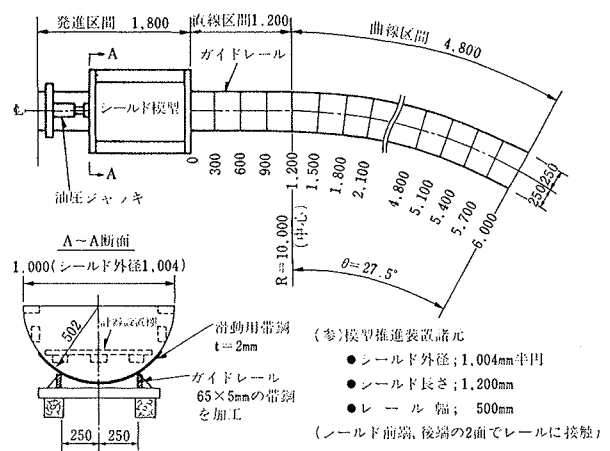
シールド機の平面位置は、本来なら計画路線の設計値と比較するべきであるが、ここでは路線製作上の誤差があることを考慮して、直接、測量によって平面位置を求め自動計測の結果と比較することにした。

4.3. 実験結果と考察

4.3.1. シールド機の姿勢 図一9(a)にシールド機の方位の測定結果を示す。ここでは各リングごとに方位角の変化量を求め、自動計測による測定値を測量結果との差で表わした。両者の差は最大で3分程度になっているが、これは実験に用いたジャイロの測定精度(±3分)から判断しても妥当な値である。

次に実際のシールド工事で行なわれている坑内測量について考えてみる。シールド機の方向は一般には図一10に示すように、①トランシットの視準線に対する縦距を測定する方法、②セグメント端部からジャッキまでの距離を測定する方法によって求められる。

①の方法はマシン後方が比較的広く使える場合に適用



図一8 シールド模型推進装置

計測項目	計測手段	
	自動計測	手動計測
シールド機の方位	ジャイロ	トランシットによる方位測定
ローリング	傾斜計	レベルによる2点間の高さの差
ピッチング	傾斜計	同上
シールド機の高さ	圧力式沈下計	レベルによる高さ測定
シールド機の平面位置	(計算による)	トランシット, スチールテープ
推進距離	ストローク計	スチールテープ

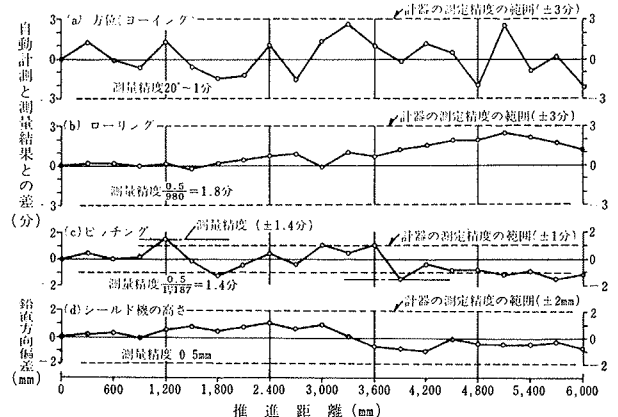
表一3 計測項目と計測手段

される。ただしこの場合でも各種の制約のため、測点間距離lは1~2 m程度しかとれないことが多い。このときシールド機の方位の測定精度は次のようになる。

$$\frac{4d}{l} = \frac{1}{1,000 \sim 2,000} = 1.7 \sim 3.4(\text{分}) \dots\dots(16)$$

ここに、4d; 縦距測定のためのスケールの読取り精度  
方位の測定精度はスケールの読取り精度と測点間距離に支配され、結果的には2~3分程度になる。②の方法ではさらに精度が悪くなるものと思われる。したがってジャイロでも、実際の坑内測量と同程度かまたはそれ以上の精度でシールド機の方位を測定できていることが分かる。

図一9(b)~(c)はローリングおよびピッチングの測定結



図一9 姿勢および高さの測定精度

果である。いずれも傾斜計の測定精度またはレベル測量の精度の範囲内で測定できている。

4.3.2. 鉛直方向偏差

図-9(d)にシールド機先端の鉛直方向偏差を示す。レベル測量との差は最大で1.1mmであり、圧力式沈下計の測定精度内で、シールド機の鉛直ズレ量を測定できている。

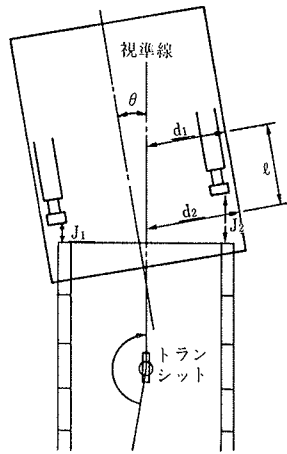


図-10 坑内測量

なお実験に使用した沈下計は精度が2mmとなっているが、これは使用上の便宜を考慮して測定レンジを広くとっているためである。レンジの狭い計器を用いることにすれば、さらに高精度の測定を行なうことも可能である。

4.3.3. 水平方向偏差 推進中の方位角変化量およびストローク長が与えられると、(9)~(13)式よりシールド機先端の平面位置を求めることができる。ただし実験では模型装置を使用しているため、図-11に示すように測点の各位置で軌跡が異なることになる。そのため次式によりモデル実験の補正をしなければならない。

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_f &= \Delta X_c + \frac{L}{2} (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_0) \\ \Delta Y_f &= \Delta Y_c + \frac{L}{2} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(17)$$

$$l' = l \times \sqrt{1 - \left(\frac{L}{l} \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{2}\right)^2} \dots\dots\dots(18)$$

ここに、 $\Delta X_f$ ,  $\Delta Y_f$ ; シールド先端の増分座標,  $\Delta X_c$ ,  $\Delta Y_c$ ; シールド中央の増分座標,  $L$ ; 機長,  $l$ ; ストローク長,  $l'$ ; 中心点の移動量である。

図-12は自動計測の結果から求められた座標値と、測量によって求めた座標値との差を示したものである。ここではシールド機先端と中央部の相方を記載した。

直線区間では誤差は小さく、1mm以内に収まっている。ただ曲線区間に入ると誤差が累積し大きなズレ量を

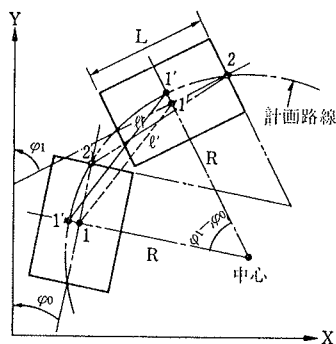


図-11 模型実験の状況

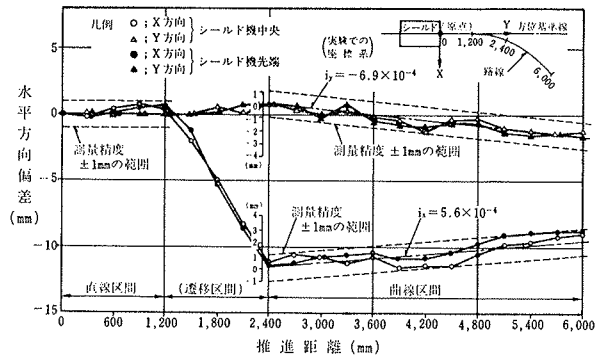


図-12 平面位置の測定精度

生じていることが分かる。なお図中に“遷移区間”と表示したのは、シールド機先端が円周路線にあるにもかかわらず、後端がまだ直線区間にある場合を意味している。この区間ではシールド機の挙動が(9)式に従わないため、計算のうえで見掛け上、誤差が生じているものである。従って本来の誤差とは異なるものであり、この部分は除外して検討すべきである。

遷移区間の終端を基準にすると、その後の累積誤差は路線延長3.6mに対して2.0~2.5mm程度である。勾配に換算して $5.6 \sim 6.9 \times 10^{-4}$ であり、実際のシールド工事に十分適用できる精度であると思われる。

5. むすび

室内推進実験を行ない自動計測の測定精度を検証した結果、シールド機の方位、ローリング、ピッチングおよび標高とも使用計器の精度内で正確に測定できることが明らかになった。ただ自動計測によって平面位置を求める場合は、各リングごとにシールド機の移動量を計算して足し合わせていかなければならないため、推進に伴う誤差が累積しやすく注意が必要である。この点がジャイロを直接シールド機に搭載し、方位測定を行なう場合の欠点となっている。

ただし上記の問題点については、施工途中で何度かチェック測量を行なうことにより解決する。シールド工事ではセグメントを対象とした坑内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。

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(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