

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——

山下幸夫 藤原紀夫

Study on Automatic Guidance System for Shield Machine (Part 1)

——Examination on Measurements of Location and Posture
Using Gyro and Other Devices——

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 devised a method of automatic measurement using a gyro, settlemeter, and inclinometer, and the characteristics of these instruments were examined.

The results obtained were as follows: (1) The gyro had a precision of 1.5 minutes in measurement of direction, but it was strongly influenced by horizontal impact. (2) The settlemeter responded very well even when the water tube was long. (3) In a case that the shield machine was tilted due to pitching or rolling, the settlemeter was influenced but not the inclinometer. A formula for corrections of tilting is proposed in this paper.

概 要

この研究はシールド機の位置・姿勢を自動計測し、計画路線とのズレ量を最少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。ここではジャイロに圧力式沈下計と傾斜計を組み合わせることを考え、使用計器の特性を実験により調べた。

その結果、以下の点が明らかになった。(1) ジャイロによる真北値の測定精度は±1.5分である。ただし水平方向の衝撃の影響を強く受ける。(2) 沈下計は連通管が長くなった場合でも十分な精度で応答する。(3) ローリングおよびピッチングによりシールド機が傾いた場合、沈下計は指示値が変化するが、傾斜計ではこのような問題は生じない。本文中では沈下計の傾斜補正式についても提案した。

1. まえがき

シールド工事は近年ますます技術集約が進み、自動掘進化へと移行する傾向にある。ただし坑内測量については、依然としてトランシットとレベルなどを用いた手動測定に頼っているのが現状であり、要求が強いにもかかわらず工事全体の自動化を遅らせている原因ともなっている。

この研究は、坑内測量のうち主として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少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。

トランシットなどによる坑内測量に替えて、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ジャイロを用いるものなどがある。このうち①はトンネル坑内に測角儀と光波測距儀の機能をもつ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、マシンの方向および設計中心線からのズレ量などを測定しようとするものである。原理的にはトランシットによるトラバース測量と同一のものと考えられる。一方②はジャイロのもつ方位角の検出機能を利用して、シールド機の向いている方位を直接測定するものである。

ここではジャイロに圧力式沈下計と傾斜計とを組合わ

せて自動計測することを考える。

2. 自動計測の基本的な考え方

シールド機の現在位置と姿勢を決定するためには、表一に示す四つの計測データが必要である。表中には計測手段も併記した。以下に各項目について検討を加えておく。

(1) 基準位置からの累計距離 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。ここではセグメントの長さを基準として、組立てたリング数から累計距離を算出することにする。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。

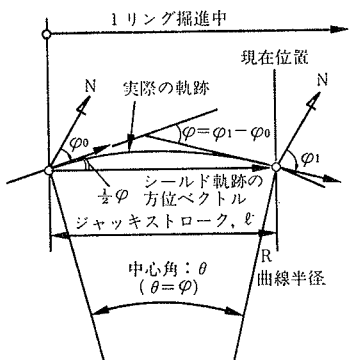
②シールドの軌跡は一般に計画路線に対して蛇行しており、厳密には両者の累計距離は異なる。ただしその差は比較的小さいと考えられる。

ただセグメントにも製造上の許容誤差があること、また止水シールドがリング継手間に存在するため、ボルト締付けの程度によっては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。

(2) シールド機の方位 ジャイロは慣性モーメントの大きなモータを高速回転させたもので、回転体の慣性とプレセッション作用を利用して、方位角を測定することができる。したがってシールド機に搭載することによりその方向(ヨー角度)を知ることができる。

図一はジャイロによる方位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れば、掘進前後の方位とジャッキストロークを用いて、ひとつの方位ベクトルとして表わすことができる。この場合、方位ベクトルの向き φ_N および長さ L は、図中の記号を用いて次式により与えられる。

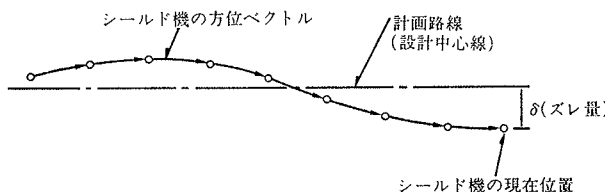


φ_0 : 掘進開始直前のシールド機方位
 φ_1 : 掘進途中(現在位置)でのシールド機方位

図一 方位ベクトルの処理

計測データ	計測手段
① 基準位置(通常は立坑)からの累計距離	セグメントの累計組立てリング数およびジャッキストローク計
② シールド機の方位	ジャイロ
③ シールド機の高さ(標高)	圧力式沈下計
④ ローリングおよびピッチング	傾斜計または圧力式沈下計

表一 自動計測のための計測項目



図二 シールドの軌跡

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

$$L = l \dots\dots\dots(2)$$

図二はシールド機の軌跡を概念的に示したものである。掘進当初からの方位ベクトルを累積することにより、水平面での現在位置が求められる。

(3) シールド機の高さ 縦断方向に変化する計画路線の高さ(標高)に対して、シールドの現在位置を対比させるため、沈下計によりその高さを測定する。

沈下計には圧力計によって水圧を測定する圧力式と、連通管の水位を測定する水盛式とがある。ただし水盛式の場合はシールド機の標高が立坑よりも低くなるような条件では使用できず、また一般に精度も悪い。ここでは制約の少ない圧力式の沈下計を使用する。

(4) ローリングおよびピッチング シールド機のロール角度とピッチ角度は傾斜計によって測定することができる。また縦断方向および横断方向に配置した3台以上の沈下計の読み値から、それぞれ計算によって求めることも可能である。

3. ジャイロの特性についての基礎実験

3.1. 実験の目的

ジャイロをシールド工法に適用する場合、①精度があまりよくないこと、②衝撃および振動に弱いこと、③シールド機が横すべりした場合、ジャイロでは対処できないこと、④一定期間使用後はオーバーホールが必要であること、⑤一般に高価であること、などの問題点がある。そのため、ここでは特に上記①、②の問題を中心として、基礎的な実験によってジャイロの特性を把握することにした。

3.2. 使用ジャイロ

実験に用いるジャイロはペンジュラスジャイロ (吊りジャイロ) と呼ばれるもので、吊り線によりジャイロモータの回転支持枠を保持する構造となっている。したがって

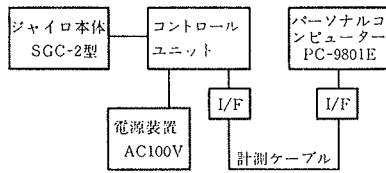


図-3 計測システム

最小読取り角度	1分
測定精度	±3分
起動時間	1分
プレセッション速度	2分10秒(半周期)
ジャイロモーター回転	8,000rpm

表-2 ジャイロ仕様

衝撃および振動に対しては最も弱いジャイロであると言える。図-3に計測システムを、また表-2にペンジュラスジャイロの仕様を示す。

3.3. 衝撃がない場合の特性実験

ジャイロ本体を机上に設置したあと、パソコン・システムに結び、0.2秒ごとにプレセッション角度を測定した。

図-4に測定例を示す。ジャイロは子午線を境にして左右にプレセッションするため、測定された角度データは真北値を中心とした正弦波を描くことになる。ただし実際には軸受けの摩擦などに伴うドリフトのため、時間の経過とともに減衰する傾向を示す。図中には振幅のピーク値も記入した。

真北方向Nは、隣接する3点のピーク値uを用いて次式で求めることができる。

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{u_{i-1} + u_i}{2} + \frac{u_i + u_{i+1}}{2} \right) = \frac{1}{4} (u_{i-1} + 2u_i + u_{i+1}) \dots\dots\dots(3)$$

表-3はこのようにして求めた真北値を示したものである。計算値は2°13' ~ 2°16' の範囲にあり、平均値に対して±1.5分程度の誤差となっている。これ

測定ピーク値	真北値N(3点法)
MIN = -42°4'	+2°14.75' → +2°15'
MAX = +46°26'	+2°15.50' → +2°16'
MIN = -41°48'	+2°15.00' → +2°15'
MAX = +46°7'	+2°14.25' → +2°14'
MIN = -41°30'	+2°14.00' → +2°14'
MAX = +45°47'	+2°13.50' → +2°14'
MIN = -41°12'	+2°13.00' → +2°13'
MAX = +45°30'	+2°13.25' → +2°13'
MIN = -40°54'	+2°13.50' → +2°14'
MAX = +45°16'	+2°14.50' → +2°15'
MIN = -40°36'	+2°15.50' → +2°16'
MAX = +44°57'	+2°15.25' → +2°15'
平均	+2°14.5'

表-3 真北値の測定精度

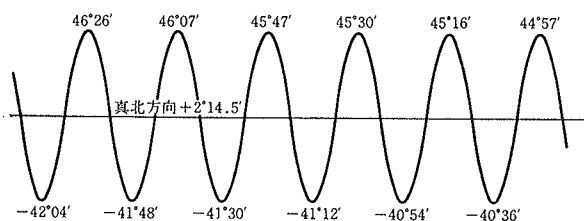


図-4 ジャイロのプレセッション

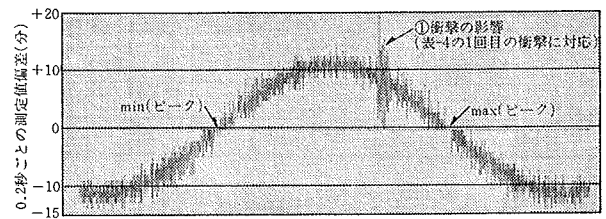


図-5 プレセッションの増分変化量

は公称の測定精度±3分よりも小さい。

3.4. 衝撃が加わった場合の特性実験

表-4は安定状態にあるジャイロに、水平方向の衝撃を加えた場合の真北値の

測定ピーク値	真北値N	備考
MIN = -39°47'	+3°27.75'	安定
MAX = +46°36'	+3°28.00'	
MIN = -39°33'	+3°28.00'	①衝撃
MAX = +46°21'	+3°27.75'	
MIN = -39°19'	+3°27.50'	変動
MAX = +45°16'	+3°14.75'	
MIN = -38°13'	+3°15.00'	回復
MAX = +45°0'	+3°27.50'	
MIN = -38°0'	+3°26.75'	回復
MAX = +44°44'	+3°26.00'	
MIN = -37°43'	+3°26.25'	②衝撃
MAX = +43°28'	+3°11.50'	
MIN = -36°23'	+3°12.50'	変動
MAX = +43°11'	+3°28.25'	

表-4 衝撃の影響

変動状況を調べたものである。衝撃はジャイロを設置している机を手で強く突いて与えた。

測定結果より、ジャイロが衝撃の影響を強く受けていることが分かる。1回目の例では衝撃により真北値の計算結果が13分程度もずれている。ただしプレセッションは、ピーク値に達して反転する時点で一旦停止状態になるため、衝撃の影響がそれ以降に及ぶことはない。真北値は3データ目には正常な値に回復している。2データ目の値が変動しているのは、(3)式により衝撃の影響を受けたピーク値を用いて計算しているためである。

図-5は測定されたプレセッション角度の増分変化量を示したものである。プレセッションのピークを表わす最大値と最小値の位置では0となり、両者の間で加速度が最大となるため、この図ではピークを示すことになる。図中に①と表示したのが第1回目に衝撃を加えた位置で、この図からも、比較的早く衝撃のエネルギーが吸収されていることが分かる。

なお鉛直方向に対しても同様の実験を行なったが、衝撃の影響はほとんど認められなかった。

3.5. 回転に対する追従性実験

シールドは掘進に伴って常にその方位が変化する。そこで回転に対するジャイロの追従性の精度を調べた。

図-6に実験装置の概要を示す。回転テーブル上に鉛直軸を一致させてトランシットとジャイロを設置し、テーブルを回転させた場合の両者の読み値を比較した。

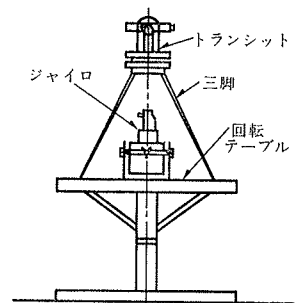


図-6 回転テーブル

回転角度	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
トランシット読み値	0°00'	10°00'	20°00'	30°00'	40°00'	50°00'	60°00'
ジャイロ読み値	0°00'	10°00'	20°00'	30°01'	40°00'	50°00'	59°59'
差	0'	0'	0'	+1'	0'	0'	-1'

表-5 回転に対する追従性

表-5 に実験結果を示す。ジャイロによる回転角度の測定は非常に安定しており、トランシットによる測定結果と比較しても、その差は±1分である。これはジャイロの最小読み取り角度に等しい。

4. 圧力式沈下計の特性についての基礎実験

4.1. 実験の目的

シールド工事では施工延長が1,000m程度にもなる。そのため圧力式沈下計でシールド機の高さを計測する場合には、途中での盛替えを1回考えとしても最大500mの距離を連通して測定を行わなければならない。

そこで、①長距離連通管で結んだ場合の沈下計の応答特性、②連通管が振動した場合の計測結果への影響、③ローリングなどにより沈下計が傾斜した場合の影響などを調べることを目的として以下の実験を行なった。

4.2. 長距離連通管による応答実験

長さが500m、400mおよび300mの連通管の両端にそれぞれ沈下計を接続して、レベル変動に伴う応答特性を調べた。図-7に実験装置の概要を示す。レベル変動を与える沈下計はシールド機に搭載することを想定したもので、実験では高さ30mmと50mmの台上に急激に上げ下げして、その後の指示値の変化を測定した。

図-8は連通管の長さ500m、レベル変動30mmの場合の実験結果である。沈下計の指示値は瞬間的には応答せず、隆起側および降下側とも、正常値に収束するまでに35秒の時間を要している。この収束時間は、受圧板の変形に要する微量な水の移動が原因となって生じているものと思われる。

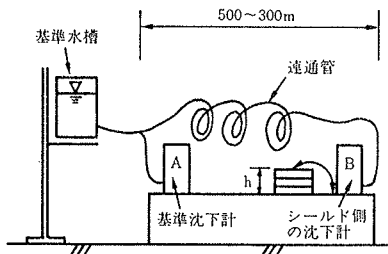


図-7 沈下計の応答実験

ただし実際のシールド工事では、このような急激なレベル変動は生じない。1リングの掘進中にシールド機に生じるレベル

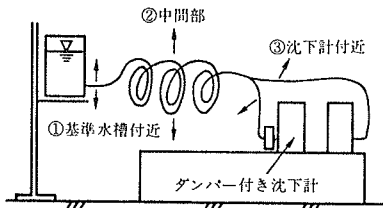


図-10 振動の影響測定

変動はわずかであり、しかも30分程度の時間をかけて徐々に変化する。そのため現実には収束時間の影響は無視できるものと思われる。

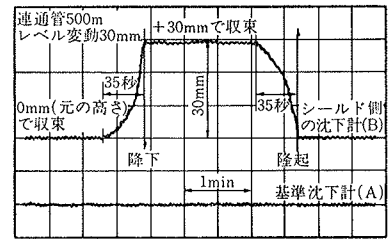


図-8 500m連通管の応答特性

図-9は連通管の長さとして、レベル変動の収束時間との関係を示したものである。両者はほぼ比例関係にあることが分かる。単位長さ当たりの収束時間に換算すると、レベル変動量30mmの場合0.07

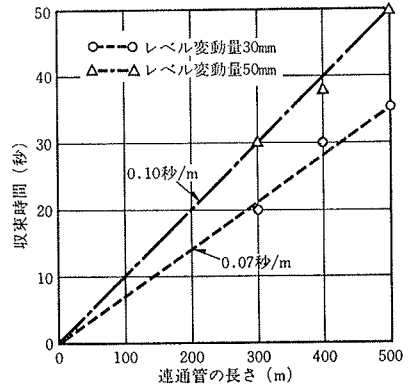


図-9 レベル変動の収束時間

秒/m、50mmの場合0.10秒/mとなる。レベル変動量が大きくなるほど収束時間が長くなるが、これは先述した受圧板の変形がより大きくなるためである。

4.3. 連通管の振動実験

連通管に振動による加速度が加わった場合、沈下計にどのような影響があるかを調べた。図-10に実験概要を示す。連通管の長さは500mとして、先端に2台の沈下計を取付けた。このうち1台は衝撃防止用のダンパー付き沈下計である。振動は図に示すように①基準水槽付近、②中間部、③沈下計付近の3箇所を、それぞれ手で揺り動かすことによって与えた。振幅の大きさは10cmとし、1秒間に1回の割合とした。

図-11に沈下計付近に振動を加えた場合の測定例を示す。加振位置がセンサーに近い場合、振動の影響を強く受けて沈下計の指示値が大きく変動している。ダンパーの無い沈下計では、最大振幅はレベル変動量に換算して13mmに相当する。ただしダンパー付き沈下計では減衰効果が高く、4mm程度の振幅におさまっている。

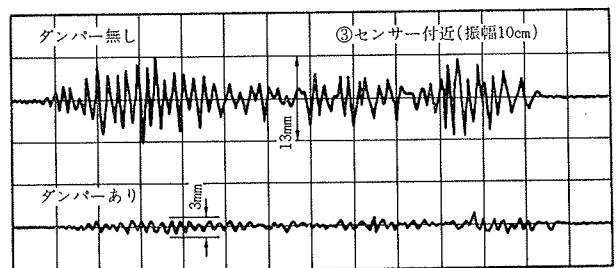


図-11 連通管の振動の影響

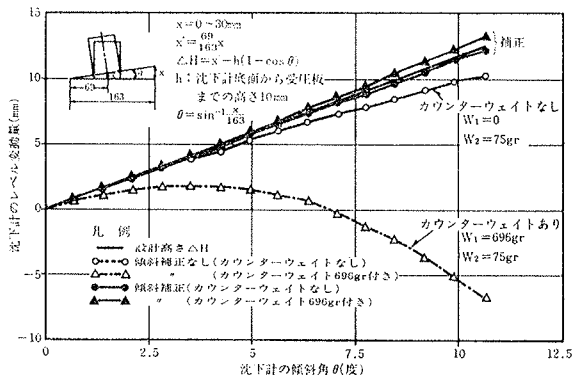


図-12 沈下計に対する傾斜の影響

以上の実験結果より、シールド機に設置する沈下計にはダンパーを付けることが望ましいことが分かる。ただ強い振動を受けた場合には、ダンパーでもその影響を完全に取り除くことができないため、測定に際しては注意が必要である。

なお基準タンク付近および中間部に振動を加えた場合には、沈下計への影響はほとんど認められなかった。

4.4. 傾斜した場合の特性実験

シールド機に設置した沈下計はローリングおよびピッチングが生じた場合、鉛直軸に対して傾斜することになる。ここでは沈下計の傾斜の影響を調べた。

図-12に実験結果を示す。沈下計は測定範囲を超えた場合、カウンターウェイトを載荷することにより水圧と釣り合わせて、引き続き測定できる構造となっている。実験はカウンターウェイトがある場合と無い場合の2種類について行なったが、沈下計の傾斜が大きくなるにしたがって、両者とも設計高さから離れて行く傾向にある。特にカウンターウェイトがある場合にその傾向が著しい。

このような現象は、本来なら圧力計の受圧板に垂直に載荷されるはずのカウンターウェイトと、これを受けるための鉄芯などの荷重が、傾斜による分力に相当する分だけ作用しなくなることが原因となっている。そのため次式により傾斜補正を行なうことが必要である。

$$h = h' \times k_1 + (W_1 + W_2) (1 - \cos \theta) k_2 \dots\dots\dots(4)$$

ここに、h: 補正後の高さ, h': 計測データ(メモリ) k₁: 計測データの変換係数, k₂: 重りの変換係数, W₁: カウンターウェイト重量, W₂: 鉄芯などの重量, θ: 沈下計の傾き, である。

図中には補正後のレベル変動量も記入しているが、(4)式により、よく傾斜補正ができていることが分かる。

5. 傾斜計の特性についての基礎実験

沈下計の場合と同様に、傾斜計もまたシールド機のローリングとピッチングの影響を受ける。そこで測定方向に対して直角の方向に傾斜計が傾いた場合でも、正しい

傾斜角 計測角α	直角方向の傾き(deg)									
	0'		1'		2'		4'		6'	
	測定値	差	測定値	差	測定値	差	測定値	差	測定値	差
-100.0	-99.6	-0.4	-99.2	-0.8	-99.2	-0.8	-99.4	-0.6	-99.4	-0.6
-80.0	-79.8	-0.2	-79.6	-0.4	-79.6	-0.4	-79.8	-0.2	-79.8	-0.2
-60.0	-60.1	0.1	-60.1	0.1	-59.9	-0.1	-59.9	-0.1	-60.1	0.1
-40.0	-40.2	0.2	-40.1	0.1	-40.0	0	-40.2	0.2	-40.2	0.2
-20.0	-20.1	0.1	-20.1	0.1	-20.1	0.1	-20.1	0.1	-20.3	0.3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.0	20.1	0.1	20.1	0.1	20.1	0.1	20.1	0.1	19.9	-0.1
40.0	40.2	0.2	40.0	0	40.0	0	40.0	0	40.0	0
60.0	60.1	0.1	60.1	0.1	60.3	0.3	60.3	0.3	60.1	0.1
80.0	80.0	0	80.0	0	80.2	0.2	80.2	0.2	80.0	0
100.0	100.2	0.2	100.1	0.1	100.1	0.1	100.3	0.3	100.1	0.1

表-6 傾斜計に対する直角方向傾斜の影響

測定ができるかどうかを調べた。

傾斜計は測定範囲±100分の高精度なものを使用し、調整ネジで固定台を所定角度まで傾斜させたあと指示値の測定を行なった。

表-6に実験結果を示す。設計角度と測定値との差は非常に小さく、最大でも0.8分である。この角度を勾配に換算すると1/4000程度になるが、従来のレベル測定の精度と比べても、充分な精度で傾斜角が測定されているものと思われる。したがって傾斜計については、直角方向への傾きの影響は実用上ないものと判断される。

6. むすび

ここではシールド機の自動誘導システムを開発するための第1段階として、自動計測に対する基本的な考え方で、ジャイロをはじめとする各種計器の基礎特性について、実験を通して検討を加えてきた。これらの結果をまとめると以下ようになる。

- (1) ジャイロは衝撃がない場合には非常に安定しており、真北値の測定精度も±1.5分であった。ただし衝撃には弱く、特に水平方向の衝撃が加わった場合、一時的に大きな誤差を生じる。
- (2) 圧力式沈下計は500mの連通でも充分な精度で応答することが確認できた。ただし連通管の振動により計測データが変動することも考えられるため、適用に際しては注意が必要である。計器自体が傾いた場合には、(4)式を用いてその影響を補正することができる。
- (3) 傾斜計は測定成分と直角方向に傾いた場合でも、実用上、その影響を受けないものと判断できる。

今回提案したシールド機の姿勢を自動計測するシステムでは、ジャイロがその中心的役割を担うことになる。ただ現状ではジャイロの分解能、測定精度とも満足すべきものではない。今後は統計的手法なども含めて計測データを処理し、ジャイロを安定した状態で使用できるよう検討を加えて行きたいと考えている。