

掘進中のシールド機に関する挙動計測システムの開発

DEVELOPMENT OF SURVEY SYSTEM ON SHIELD BEHAVIOR DURING EXCAVATION

杉本光隆¹⁾・小西真治²⁾・新井泰²⁾・粥川幸司³⁾

Mitsutaka SUGIMOTO, Shinji KONISHI, Yasushi ARAI and Koji KAYUKAWA

In the development of the theoretical model on shield behavior, not only the theoretical approach but also the verification of the model by using the actual shield behavior is necessary.

To grasp the shield behavior during excavation, the real time survey system on the shield behavior with high accuracy was developed by using two sets of total stations with automatic tracking function. Furthermore the newly developed survey system was applied at the site and the effectiveness of this survey system was discussed by the comparison of the obtained shield behavior with the shield behavior obtained by the conventional method.

Key words: shield-driving method, shield behavior, survey system, total station

1. はじめに

近年のシールド工法は、輻輳する地下構造物や重要構造物、あるいは複雑かつ軟弱な地層を相手にした難しい施工を余儀なくされる場合が非常に多く、それに伴い、シールド機の制御に対する要求精度はますます厳しさを増している。しかしながらその考え方は、「シールド機の実際の位置が計画位置よりある一定量以上ずれた場合は、シールド機を計画位置に戻すように経験的に制御する」ことを基本とした経験・実績主義に則ったものである。また、年々進む熟練工不足やコストダウン要求を考慮すると、掘進管理に関わる詳細なシールド機挙動の事前予測や省力化施工を実現するために、今後、自動車や航空機のシミュレータに導入されている動力学モデルをシールド機の制御にも取り入れていく必要があると考えられる。

一方、当該モデルでは、掘進に伴うシールド機と地盤との相互作用が理論的に表現できることが必須であり¹⁾、モデルの開発には実施工のシールド掘進に伴う各種計測データとの比較が必要である。そのため、筆者らはこれまで、実施工で多用されているジャイロによる挙動計測データを用いて当該モデルの検証を複数の現場データを用いて試みたが、モデルが必要とするパラメータ数(計測項目)ならびに計測精度の観点からいづれも不足していることが明らかとなっている^{2, 3)}。

そこで今回、従来の挙動計測項目に加えて、高精度でリアルタイムな計測を可能とする挙動計測システムが必要となり、当該モデルの確立の第一ステップとして、トータルステーションを2台用いたシールド機挙動計測システムを開発し、実現場に適用して所定の精度を確保できたのでそれらについて報告する。

正会員 工博 長岡技術科学大学 環境・建設系

正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部 構造物技術開発事業部

正会員 工修 ハザマ 土木本部 都市土木統括部

2. シールド機挙動計測システム概要

(1) システムの位置づけ

シールド機と地盤の相互作用を考慮に入れたシールド機挙動モデルの開発に際して、そのモデルは図-1に示すように、地盤物性値、マシン挙動、マシン制御力を関連づけるものとなる。また、表-1に示すように各々を未知数にとれば、それぞれ逆解析、シミュレータ、コントローラに関する問題となる。モデルの検証では、実際のシールド掘進においてシールド機を3成分ロードセルとみなし、シールドジャッキ力、切羽圧等のシールド機への作用力、およびシールド機位置、方位角のシールド機挙動を計測し、

- ・得られたデータに本モデルを適用して逆解析を行い、地盤反力係数などの地盤物性値を求め、既往の経験値と比較する。
 - ・逆解析より得られた地盤物性値を用いて、シールド機挙動予測、シールド機制御を行い、得られた計算値を実測値と比較する。
- ことが必要となる。

一方、本モデルを検証するために必要となるデータの種類の通りである。

- ①シールド機の掘進中の挙動
- ②シールド機への作用力
- ③掘進地盤の地盤条件

実際のシールド機の掘進においては、上記3項目が密接に関係しており、本モデルと比較するためには、実施工におけるいずれの情報も必要となる。

今回開発するトータルステーションを用いたシールド機挙動計測システムは、上記①のデータを収集するため、掘進中のシールド機の挙動、特にシールド機の方位角に関し、従来の計測システムと比較して、同等以上の計測性能および精度を確保することを目指すものである(図-2)。

なお、②シールド機への作用力(シールドジャッキ力、泥水圧またはチャンバ内土圧などの切羽圧力、カッタートルクおよびその回転方向、等)については、通常の掘進管理に用いられるデータを、また③地盤条件については、各シールド現場での土質調査資料より必要とするデータを収集することとする。

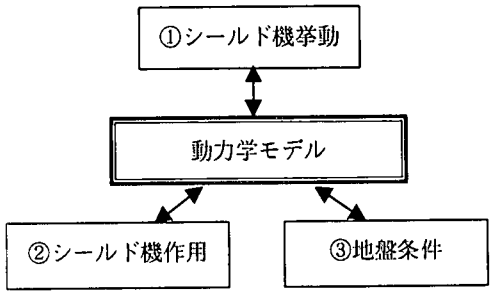


図-1 動力学モデルの位置づけ

表-1 解析の種類と未知数

解析の種類	地盤物性	シールド機挙動	シールド機制御力
逆解析	未知	既知	既知
シミュレータ	既知	未知	既知
コントローラ	既知	既知	未知

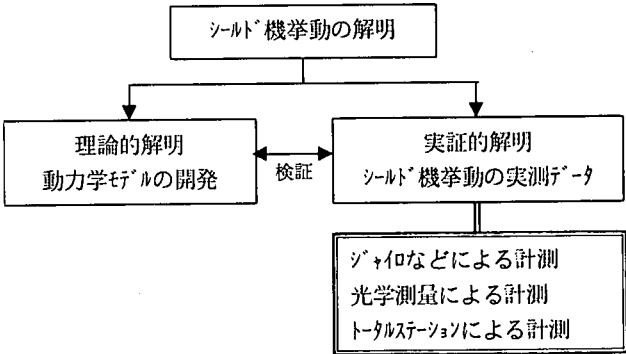


図-2 システムの位置づけ

(2) システムの要求性能

通常シールドの線形管理のために行われるシールド機の位置計測は、トランシットを用いた手動測量により行われる。そのため、測量は掘進の前後のみであり、掘進作業時の施工性を考慮して、掘進途中では行われないのが通常である。また測量結果は、各掘進リング毎の手作業による整理となる。

一方、掘進中のシールド機の挙動については、密閉式シールド工法が主流となった現在、シールド機の方角、位置を迅速に把握する方法として、ジャイロ、傾斜計、シールドジャッキストローク等を用いたシールド機位置計測が利用されている^{2,3)}。

しかしながら、これらの方法の内、特にシールド機の水平面内での方向はジャイロによる計測となるが、

シールド機の進行方向が必ずしもジャイロにより測定される方位角に一致せず、このためジャイロによる位置演算を繰り返していくと誤差が累積し、実際のシールド機の方角を正確に把握することができなくなる³⁾。また、ジャイロを用いたシールド機ヨーイング角に関する既往の計測データでは、他のデータと比較して精度が低く、動力学モデルの検証においてその精度の確保が課題となっていた⁴⁾。

このような状況のもと、本システムに対しては、

- ・掘進の開始前後のみならず、掘進中のシールド機挙動をできるだけリアルタイムに計測する。
- ・特に掘進中におけるシールド機の方角をできるだけ正確に把握する。
- ・シールド機挙動データは、シールド機が地盤から受けている作用力と密接な関係があると考えられ、これらの計測データを同期的に、しかも電子的に収集する。

が必要とされた。

(3) トータルステーションによるシールド機挙動の計測方法

前述の課題に対して、本システムでは、近年、シールド工事において利用されつつある自動追尾型トータルステーション（写真－１）２台を用いることとした。トータルステーションは、それ１台で鉛直角、水平角および距離を同時に測定することによって、目標となるプリズム位置を３次元座標にて計測することが可能な電子式測距測角儀であり⁵⁾、以下の特徴を有する。

- ・掘進中のシールド機は所定の掘進速度で常時動いていることから、シールド機に設置したプリズムを自動で追尾、視準することが可能。
- ・本システムでは、シールドジャッキ力、切羽圧力等のシールド機への作用力と同期的に計測することが重要であるため、計測時間が短いこと。
- ・電子的に処理された計測データが外部機器(例えばパソコンなど)に出力可能であること。

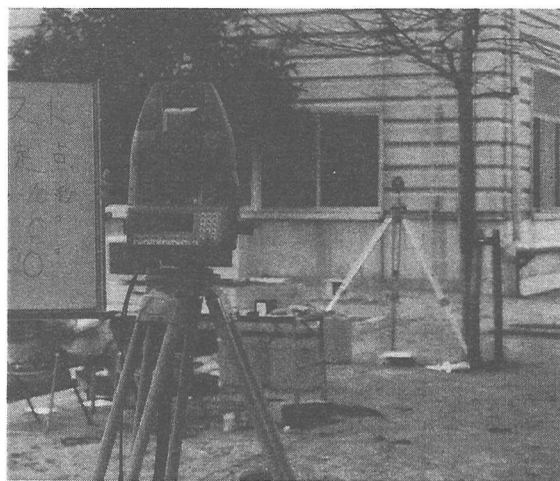
一方、トータルステーションを用いた計測の方法については、次の３種類の方法が考えられた。

- ①トータルステーション１点＋ジャイロ＋傾斜計
(ピッチング、ヨーイング)
- ②トータルステーション２点＋傾斜計(同上)
- ③トータルステーション３点

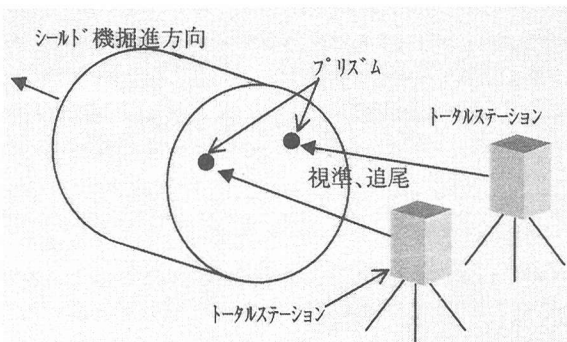
これらの方法の内、①に対してはジャイロを用いるため、精度が確保されにくいこととなる。また、③に対してはシールド機内の３点の位置を計測することにより、その位置だけでなくローリング、ヨーイング、ピッチング角も一意的に決定される。しかし、実際のトンネル坑内において３点を計測することは、スペースの観点から非常に困難であると思われる。

これに対して、図－３に示す②の計測方法では、シールド機に設置するプリズムをできるだけ水平方向に離し、その位置を計測することによりシールド機の方角を容易に演算することが可能となる。また、ピッチング、ローリングに対しては、シールド機に搭載された２軸式傾斜計により精度の良いデータが得られる。

以上のことから、本システムでは、トータルステー



写真－１ トータルステーション



図－３ ２点視準による計測

ション2台を用いることとした。

3. 現場計画

(1) 計測の概要

本システムの適用性を検証するために、実際のシールド現場において実証試験を行った。シールド工事の概要は、以下の通りである。

シールド形式 : 機械掘り中折れ式シールド

シールド機外径 : $\phi 7,200\text{mm}$

セグメント外径 : $\phi 7,100\text{mm}$

掘進対象地盤 : 軟岩 (砂岩、泥岩、シルト岩等)

写真-2～4に、トータルステーションおよびプリズムの設置状況を示す。機材の設置においては、セグメント組立作業、裏込め注入作業等により、トータルステーションの視準が遮断される場合があるものの、特に掘進中において、できるだけ視準を遮断されないことが必要である。そこで今回はトンネル上方の空間を利用し、これらを設置した。

計測は、トータルステーション、プリズムの各位置を測量にて3次元的に把握した後、掘進リング170～178の掘進距離9mの区間(直線、上り5%)において、連続で行った。計測の時間間隔は、掘進中で15秒/1回、停止中で5分/1回で行った。

(2) 計測結果

本システムの開発目的の一つに、シールド機の方位角について従来のジャイロによる計測値よりも精度良く求めることがある。そこで、代表的な掘進リングにおけるシールド機方位角の計測結果を図-4に示した。ここでは、各リング掘進終了後に行われるトランシットを用いた光学測量を正值として考え、本システムによる計測値、およびジャイロによる計測値との比較を行った。データの処理に際して、ジャイロはシールド機前胴に、プリズムは後胴に設置されているため、本システムによる後胴の方位角計測値と、別途計測しているシールド機の水平方向の中折れ角を用いて、前胴の方位角を算出している(ただし、中折れ角は計測中ほぼ0度であった)。なお、トンネル基線方位角(280.16度)、および各リング掘進終了時点での光学測量によるシールド機方位角(数値)を図中に併記した。また、方位角はグローバル座標系のX軸正方向(真北)を0度とし、Y軸正方向(東方向)に+で表示した。

計測の結果、各掘進リングとも、ジャイロによる方位角は280.20～280.45度、本システムによる方位角は280.20～280.30度、掘進終了時点に行う測量の結果から算出された方位角は280.11～280.20度の範囲に収ま

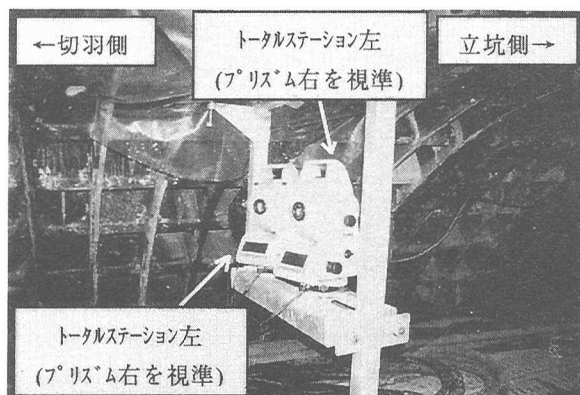


写真-2 トータルステーション設置状況

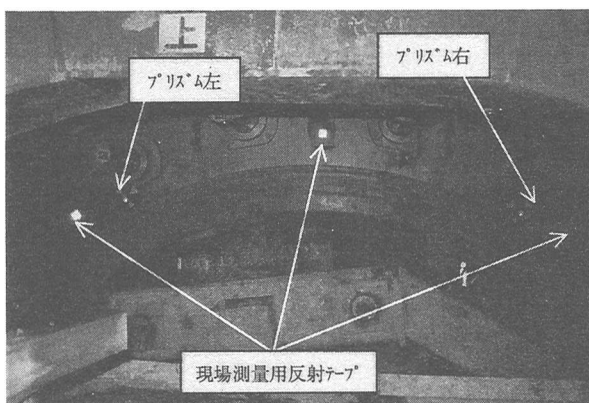


写真-3 プリズム設置状況

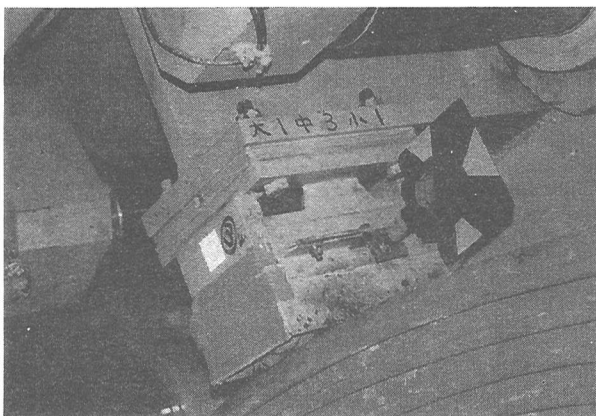
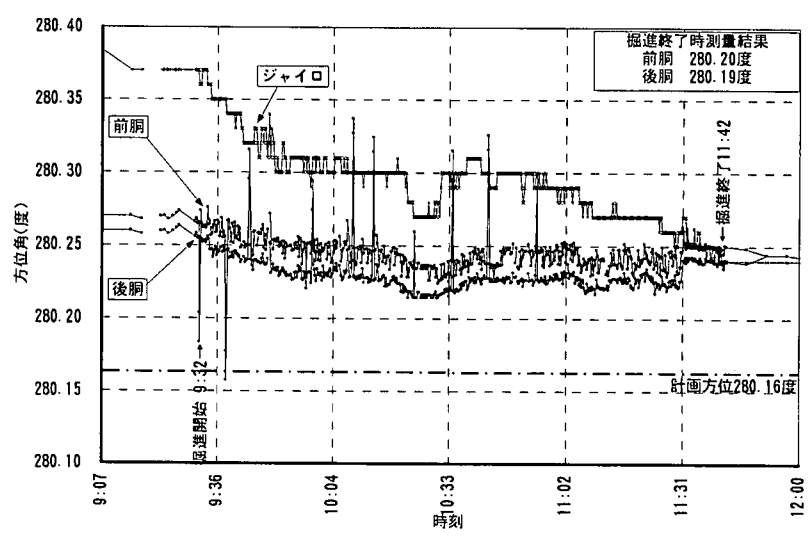


写真-4 エレクターローラー支床に設置したプリズム

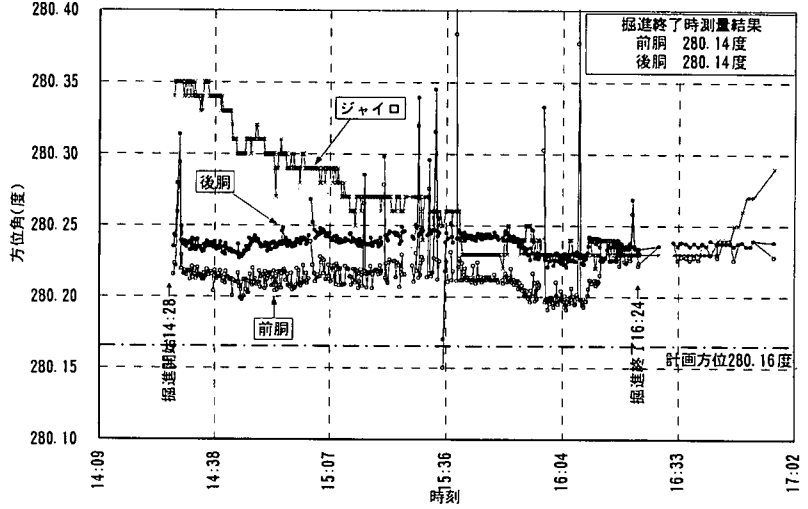
っている。これによると、本システムによって得られる方位角と掘進終了時点に行われる測量の結果から計算される方位角は概ね等しく、本システムによって得られる方位角は、ジャイロによる方位角よりも、高い精度を有していると考えられる。

次に、シールド機の方位角の変化に対する影響が最も大きいシールドジャッキのストローク計測結果から、当該現象を表現し各計測結果との比較を試みた（表－２）。

170Ring における掘進開始時から終了時に至るジャイロによる方位角の変化は、280.37度→280.24度と0.13度減少している。一方、本システムによる前胴方位角の変化は280.27度→280.24度と0.03度減少している。この時の左右のジャッキストローク差は2mm（右勝ち）である。ここで左右のシールドジャッキ間距離を6420mmとして、これらの値から方位角の変化量を推定すると、0.02度の減少と



(a) 170 Ring



(b) 171 Ring

図－４ シールド機の方位角計測結果

表－２ シールド機前胴方位角の計測結果

リングNo.		170	171	172	173	174	175	176	177	178
トータルステーション	掘進開始時	280.27	280.22	280.22	280.24	280.25	280.25	280.24	280.20	280.24
	掘進終了時	280.24	280.23	280.26	280.25	280.26	280.25	280.22	280.25	280.23
	方位角増分	-0.03	0.01	0.04	0.01	0.01	0.00	-0.02	0.05	-0.01
ジャイロコンパス	掘進開始時	280.37	280.34	280.40	280.34	280.34	280.47	280.48	280.29	280.34
	掘進終了時	280.24	280.23	280.44	280.15	280.31	280.35	280.38	280.27	280.27
	方位角増分	-0.13	-0.11	0.04	-0.19	-0.03	-0.12	-0.10	-0.02	-0.07
シールドジャッキ ストローク	右*1	1005	1005	1002	1002	1004	1003	1001	1002	1006
	左*1	1003	1005	1005	1003	1006	1005	1000	1006	1005
	ストローク差*1	-2	0	3	1	2	2	-1	4	-1
	方位角増分	-0.02	0.00	0.03	0.01	0.02	0.02	-0.01	0.04	-0.01

単位：度 ただし、*1 ジャッキストロークの単位はmm、左右は立坑側から切羽側を見る。
方位角増分の±は、基線方向に対してシールド機が右向きの場合＋、左向きの場合－で表す。

なり、本システムによる計測結果が実現象を的確に表現していることが確認できる。同様に 171Ring において、ジャイロでは 280.34 度→280.23 度と 0.11 度の減少を示しているが、本システムでは、280.22 度→280.23 度とほとんど変化していない。またシールドジャッキストローク差からも方位角の変化はほとんどなく、本システムの計測結果（ほとんど変化のない現象）を概ね表現していると考えられた。

4. おわりに

ここでは、シールド機と地盤の相互作用を考慮した動力学モデルの検証を行うため、シールド機の挙動をさらに精度良く求める方法として、トータルステーションを用いたシールド機挙動計測システムを開発した。また、その適用性を検証するために、実際に掘進中のシールド機挙動を計測し、従来から行われている測量等による計測結果と比較、検討を行った。

その結果、本システムを用いた場合、従来のジャイロ等によるシールド機挙動よりも、手動による測量結果に近い値となり、十分精度良く計測できること、さらに計測そのものを自動でリアルタイムに実施可能であることが判明した。これらのことから、トータルステーションを用いた本システムが、シールド機の地盤中での挙動を十分精度よく計測でき、なおかつ、実用性が高いものと判断された。

今後は、本システムを用いて、他のシールド現場におけるシールド機挙動の計測を数多く実施し、シールド機挙動に関する動力学モデル検証のための基礎データを蓄積することが必要である。

なお、本研究は、平成 9 年度運輸分野における基礎的研究推進制度「大都市部地下インフラストラクチャ整備のための動力学に基づくシールド機挙動の理論的・実証的解明」において行ったものである。

参考文献

- 1) 杉本：講座「地盤工学における逆解析」第 12 章シールドトンネル、土と基礎、Vol44、No.4、1996.4
- 2) 園田：シールド工事自動化技術の現状と将来展望、ロボット化のすすむシールド工法、日本プロジェクトリサーチ、1992.4
- 3) 「シールドトンネルの掘進管理」連載講座小委員会：シールドトンネルの掘進管理(4)掘進管理(1)測量・方向制御、トンネルと地下、土木工学社、第 28 巻 9 号、1997.9
- 4) 森内、杉本、岩田、粥川：シールド機実測データのヨーイング角とピッチング角に関する検討、第 53 回年次学術講演会講演概要集第 6 部門、土木学会、1998.10
- 5) 「新・トンネル測量」連載講座小委員会：新・トンネル測量 最終回 トンネル測量機器と測量管理システム、トンネルと地下、土木工学社、第 28 巻 1 号、1997.1