

4心円シールド工法におけるシールド機の 挙動計測結果について

SITE INVESTIGATION ON BEHAVIOR OF THE 4-CENTERED SHIELD MACHINE

粥川幸司¹⁾・大西亮²⁾・小西真治³⁾・新井泰³⁾・杉本光隆⁴⁾

Koji KAYUKAWA, Ryo ONISHI, Shinji KONISHI, Yasushi ARAI and Mitsutaka SUGIMOTO

For development of a theoretical model on shield behavior, not only the theoretical approach, but also the verification of the model by using actual shield behavior are necessary. The measurement system of the shield behavior with high accuracy has been developed. This system was previously applied in a round shield. And based on the obtained data, the shield behavior had been examined.

Then, the 4-centered shield behavior was measured by using this system. As a result, the followings were made clear: 1)the behavior of the 4-centered shield in the horizontal plane was similar to that of a round shield; 2)the shield behavior was influenced by the excavating area with the articulate mechanism and the copy cutter.

Key Words : 4-centered shield method, shield behavior, survey system, total station, site measurement

1. はじめに

近年、都市部での地下空間の利用が進み、鉄道、道路、電力洞道、上下水道といった新たな地下構造物の建設では、既存の地下構造物とこれまで以上に近接するといった厳しい条件下での施工が増えている。これらの建設においては、円形シールド工法が代表的であるが、近年では供用時に不要となる空間をできるだけ排除し建設コストを縮減するため、複円形や矩形といった非円形のシールド工法が増えつつある。本報で述べる4心円シールド工法も都営地下鉄12号線六本木駅で採用、施工された複円形シールド工法である(写真-1)¹⁾。

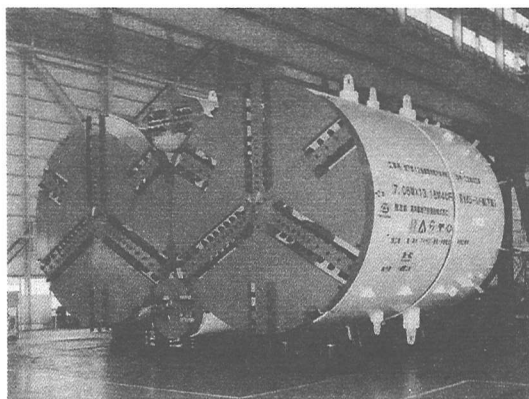


写真-1 4心円シールド機

ところで、筆者らはこれまでに掘進中のシールド機の挙動を理論的に表現する動力学モデルの開発に取り組むとともに、モデルの検証に用いるため、シールド機挙動計測システムの開発、および精度の良いシールド機挙動データの収集を行ってきている^{2) 3)}。そこで、今後増えると予想される非円形シールド工法において、その挙動データを収集すること、およびシールド機が掘進中にどのような挙動を示すかを検討することを目的として、実

-
- 1) 正会員 工学修士 ハザマ 技術・環境本部 技術研究所
 - 2) ハザマ 東京支店 六本木青山出張所
 - 3) 正会員 工学修士 財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
 - 4) 正会員 工学博士 長岡技術科学大学 環境・建設系

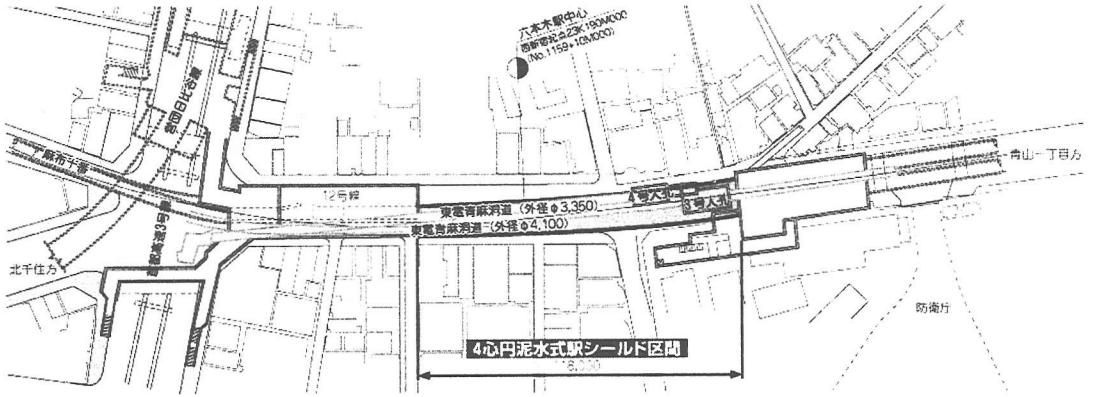


図-1 六本木駅工区平面図

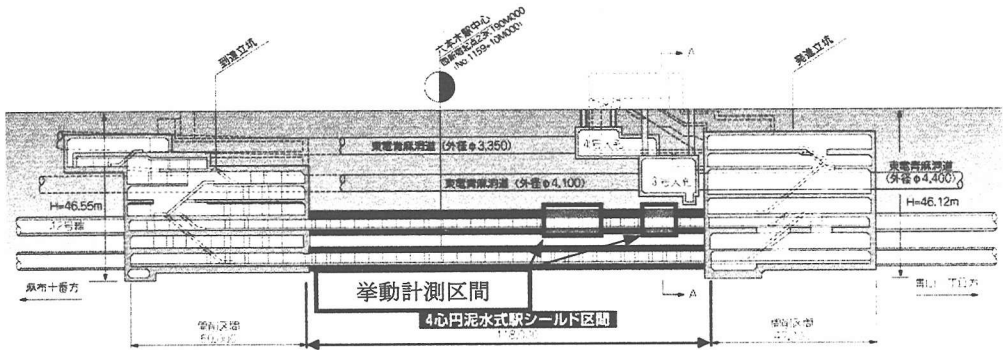


図-2 六本木駅工区縦断面図

際の工事でシールド機の挙動を計測した。本報ではその結果について述べる。

2. 六本木駅シールド工事の概要

六本木駅の施工箇所は、外苑東通りと六本木通りが交差する六本木交差点から外苑東通りに沿って、防衛庁正門前に至る工事延長 215m 間で、駅両端部を開削工法、中央部を上下二段の4心円シールド工法により施工するものである。図-1～3に平面図、縦断面図、トンネル断面図および地質状況図を示す。4心円シールドの線形条件は、延長 118m×上下二段、最小曲線半径 502m (右カーブ)、縦断勾配 2‰ (下り) である。なお、後述するシールド機挙動計測は上段シールドの3号マンホール下 10～19リング、および一般区間の31～46リングで実施している。

地質状況は図-3に示したとおりで、上部より表土(Ts)、関東ローム層(Lm, Lc)、東京砂層(To-s)、東京粘性土層(To-c)、東京礫層(To-g)、上総層泥岩(Kam)、上総層砂質土層(Kas)である。シールド施工位置では、上段シールドが東京礫層と東京砂層、下段シールドが上総層泥岩と上総層砂質土であり、これらの層はN値 50 以上で非常に締まっている。地下水位は G.L.-16m 程度であり、間隙水圧は

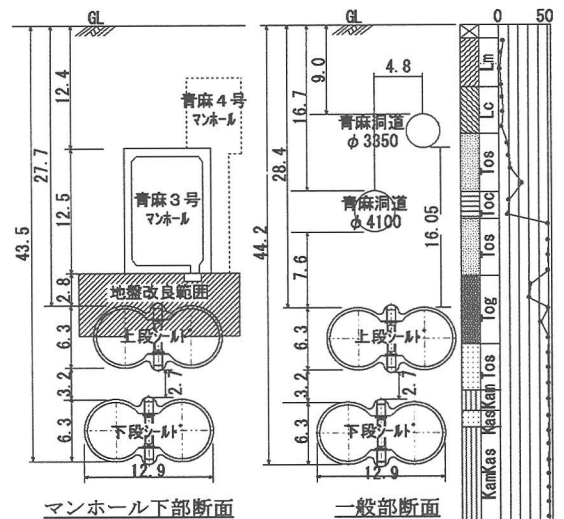


図-3 トンネル断面図および地質状況図

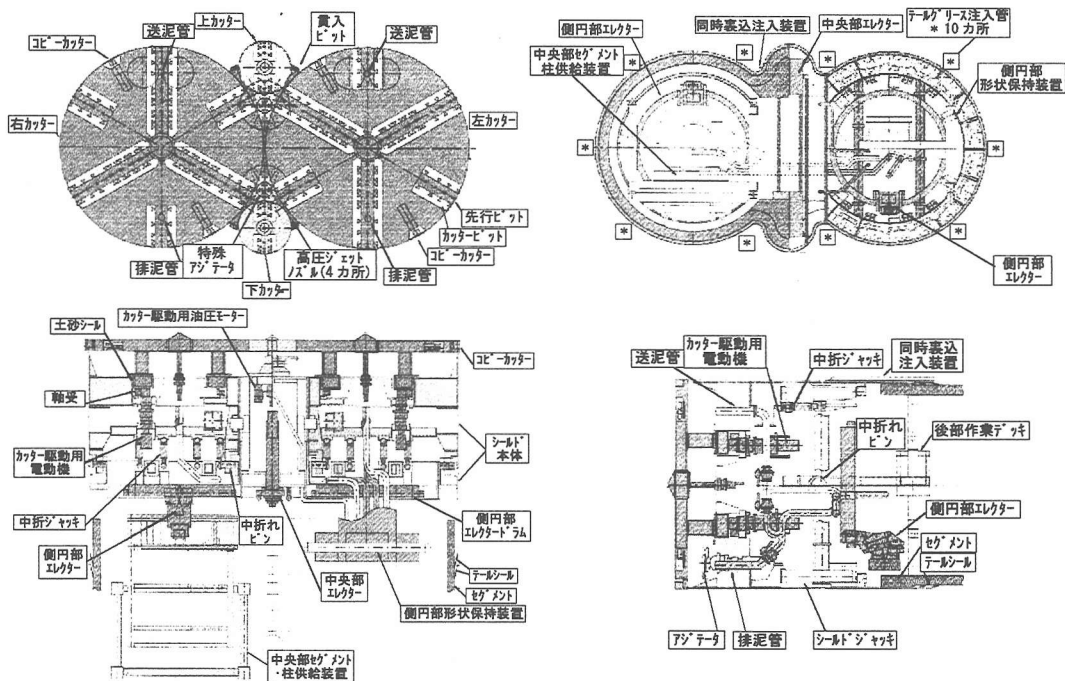


図-4 4心円シールド機全体組立図

下段シールドセンターで 0.25MPa、透水係数は $1.31 \times 10^{-3} \text{m/sec}$ と大きく、また均等係数は 1.9 と非常に小さい値となっている。

3. 4心円シールド機

六本木駅シールド工事で用いたシールド機は、同一平面内に配置された左右の回転カッター（φ6.56m）、上下の回転カッター（φ1.72m）、合計4つのカッターを有する、高さ7.06m、幅13.18mの4心円泥水式シールド機である。また、同一チャンバー方式とすることにより、切羽の安定や流体の制御を管理しやすい構造となっている。図-4にシールド機全体組立図、表-1にシールド機仕様を示す。

本シールド機では、トンネル断面が水平方向（左右方向）に長い為、シールド機のローリングの発生が懸念された。また、掘進距離も109mと短く、シールド機の姿勢制御を容易に行えることが必要であった。そこで本シールド機では、左右両側円部のシールド胴体に上下の中折れ機構（中折れ角度最大±1°）を装備した。この中折れ機構とコピーカッターでの余掘りを併用することによって、シールド機のローリングとピッチングを容易に修正できることが本シールド機の特徴である。なお、中折れは上下方向のみであり、水平方向には中折れしない。このため、平面的には単胴型のシールド機と同様であると考えられる。

表-1 4心円シールド機仕様

シールド機基本要目		
最大幅×最大高×機長	13180×7060×8100mm	
カッター外径	左右6560mm, 上下1720mm	
シールドジャッキ	2500kN×1500ST×35MPa×28本	
	1500kN×1500ST×35MPa×6本	
装備総推力	79000kN	
単位面積当たり推力	1.04MPa	
カッターディスク要目		
左右側円部	形式	全断面掘削正逆回転方式
	トルク	常用3210kN・m
	回転数	0.8r. p. m.
中央上下	電動機	30kW×4P×9台×2
	形式	全断面掘削正逆回転方式
	トルク	常用83kN・m, 最高103kN・m
	回転数	0~3r. p. m.
	油圧モーター	SX504×2台×2
ローリング制御機構要目		
H&Vシールド*(クロスアキチュレート)機構		
中折れジャッキ	1250kN×150ST×30MPa×16本	
中折れ角度	上下±1度	

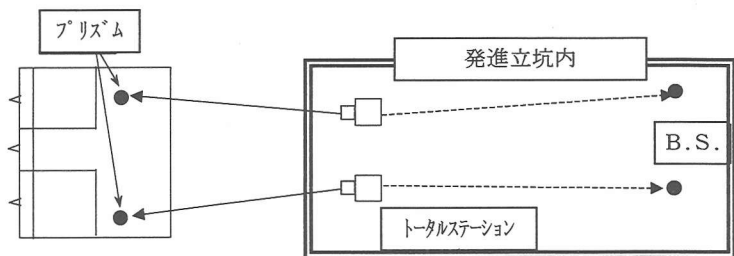


図-5 シールド機の挙動計測の概要

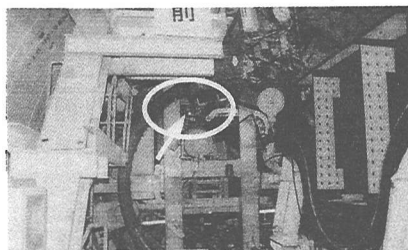


写真-2 左プリズム(支柱に設置)

4. シールド機挙動計測の概要

掘進中のシールド機の挙動を理論的に表現する動力学モデルの開発において、モデルの検証に用いるための精度の良いシールド機挙動データを収集する必要がある。筆者らは平成9年度において掘進、停止中(セグメント組立中を含む)のシールド機の挙動を計測するシステムを開発し²⁾、平成10年度に複線断面クラス(φ10m程度)の鉄道トンネル2現場で実際にシールド機の挙動を計測し、分析を行った³⁾。そして今回、4心円シールドにおいてシールド機の挙動計測を行ったものである。

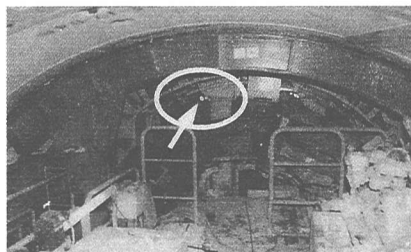


写真-3 右プリズム(リングガターに設置)

システムは、自動追尾型のトータルステーションとターゲットとなるプリズムを2組用いるもので、プリズムをシールド機に設置し、外部からプリズムの位置、すなわちシールド機の動きをリアルタイムに測量するものである。特にここでは、シールド機のヨーイング角の計測精度を確保するため、プリズムをシールド機の左右方向にできるだけ離して設置している。図-5、写真-2、3にそれらの状況を示す。また、システムではシールド機の測量と同時に、推力や掘進速度、あるいはシールド機に搭載された傾斜計によるピッチング角、ローリング角等もデータとして取り込んでいる。

実際の計測は、図-2に併記したように、上段シールド(掘進開始は平成11年4月、到達は同年7月)の3号マンホール下部11~19リングと、一般区間である31~46リングで行った。また、計測の頻度については、掘進中30秒毎、停止中5分毎に一回の割合で行った。

5. シールド機の挙動計測結果

(1)シールド機のローリング発生状況¹⁾

4心円シールドでは、覆工の組立時に断面中央に建てられる柱の鉛直精度の確保、およびシールド機とセグメントのクリアランスの確保が重要であり、これにともなうシールド機のローリング発生に十分注意を払う必要があった。図-6に上段シールドのローリング発生状況を示す。実施工においては、およそ10リング掘進頃より

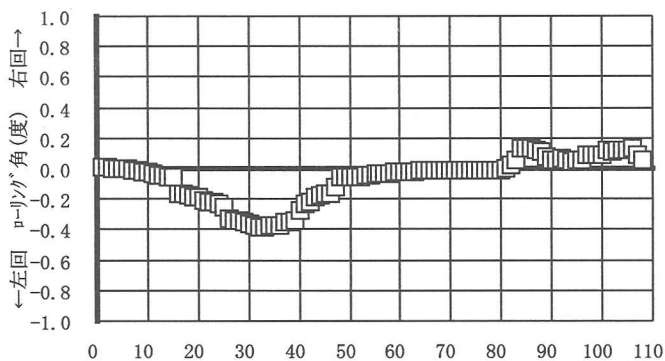


図-6 上段シールドのローリング発生状況

ローリングが発生し始めた。これに対して、ローリング角が0.2度を超えた段階でジャッキパターンやカッター回転方向の変更を試みたが改善の効果がなく、0.3度を超えた段階(30~42リング)で前述した左右胴体の中折れを使用した(左 0.05度上向き、右 0.23度下向き)。また、27~30リング掘進時において左胴の上部で50mmの余

掘りを行った。その結果、シールド機のローリングは元に戻る方向に変化し始め、およそ 50 リングでほぼ 0 度となった。このような状況において、以降のシールド機挙動計測結果の整理では、中折れを使用してローリングの修正を行った 30~46 リングについて述べることにする。

(2) シールド機の方角角

図-7に、30~46 リングの挙動計測結果より得られたシールド機の方角角と計画線を比較して示す。なお、横軸は掘進距離で示している。この区間では、半径 502m の右カーブで、計画線の方角角は 30 リングで 133.022 度、46 リングで 134.592 度である。

シールド機の平面的な方向は、概ね計画線に沿っており順調な掘進であった。なお、施工においては掘進地盤が比較的硬質であることから、シールド機右側（カーブ内側）で約 100mm の余掘りを行っており、その効果が表れたものと考えられる。

次に、掘進および停止中のシールド機方角角に関する代表的な計測結果として、ロー

リング変化の大きい 40~42 リングに関し、シールド機方角角の変化を図-8 に示す。なお、横軸は時刻で表記している。当該リング掘進時のシールド総推力は、約 3.0×10^4 kN 前後と概ね安定していた。シールド機方角角の変化は、掘進 1 リング(1m)毎で約 0.1 度増加する(R=502m 右カーブ)のものであるが、特に掘進開始時に大きく変化していた。また、停止中（セグメント組立中）においてもあまり元に戻らない傾向にあったが、これらは、シールド進行方向の右側をコピーカッターで余掘り(100mm)したことに加え、地盤が比較的硬質で自立する傾向にあり地盤反力が小さかったためと考えられる。また、この傾向は硬質地盤中の円形シールドの場合でも同様であり³⁾、4 心円シールド機でも平面的な挙動は円形シールドの場合と同様であると考えられた。

(3) シールド機のローリング角

次に、本システムによるローリング角算出結果と傾斜計によるローリング角を図-9 に示す。本システムと傾斜計では値の大きさに差があるが、これはトータルステーションや傾斜計の設置に関する静定誤差と考えられる。しかしながら、ローリング角の経時変化

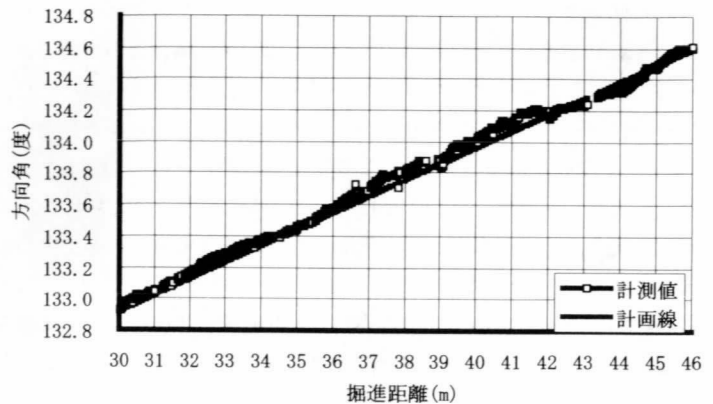


図-7 シールド機の方角角

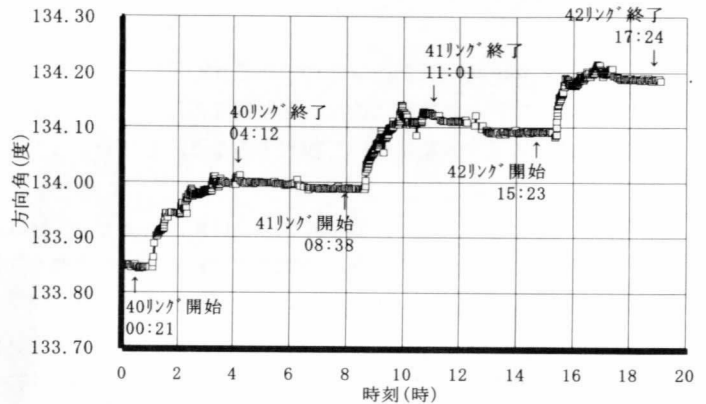


図-8 40~42 リングのシールド機方角角の変化

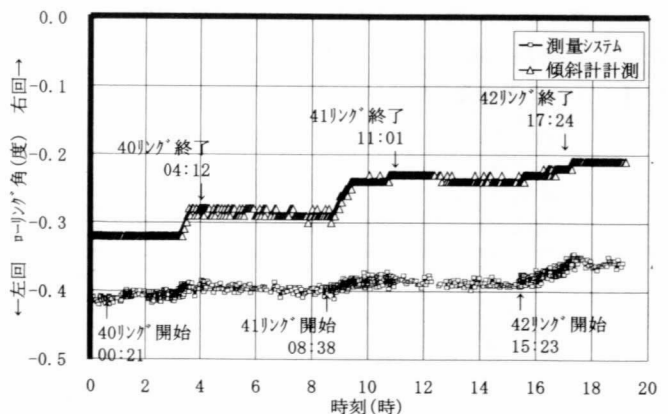


図-9 40~42 リングのシールド機ローリング角の変化

としては同様な傾向を示しており、また、本システムの方がシールド機のローリングに関する微妙な動きを捉えているものと思われる。このことから、本システムによって得られたシールド機の挙動データは、今回の目的の一つである動力学モデルの検証用のデータとして信頼性が高いものと考えられる。

一方、ローリングの発生状況と、シールドジャッキによる鉛直モーメントや水平モーメントとの比較を別途試みたが、明確な相関は認められなかった。このことは、前述したようにローリングの修正においてジャッキパターンの変更では対処できなかったことを示していると考えられる。しかしながら、当該掘進リングでは左円で+0.05度（上向き）、右円で-0.23度（下向き）の大きさで中折れを使用していること、また、27～30リングでの左胴上部の余堀り（50mm）を実施していること、を考慮すると、4心円シールド機の挙動に関して、シールドジャッキの偏心力よりも、地盤条件を含めた既掘削領域の状況によって支配される傾向が強いものと考えられた。

以上の結果より、4心円シールド機の挙動も従来の円形シールドと概ね同様であるものと判断された。

6. おわりに

今回、複円形シールド工法のひとつである4心円シールド工法に関し、掘進中のシールド機の挙動を理論的に表現する動力学モデルの検証に適用可能な精度の良いシールド機挙動データを収集すること、および、当該シールド機が掘進中に示す挙動について検討すること、を目的として、シールド機の方向角、ローリング角に着目した挙動計測を実施した。

その結果、得られたシールド機挙動データは動力学モデルの検証に必要な精度十分満足していたほか、4心円シールド機についても、平面的には通常の円形シールド機と同様な挙動であり単胴型のシールド機と見なせると考えられた。一方、シールド機のローリングに関しては、ジャッキパターンの変更等による偏心力とほとんど相関がなく、シールド機左右胴体の上下方向中折れやコピーカッターによる余堀りで確保された掘削領域に支配されるものと考えられた。今後、これらのデータを用いて動力学モデルの検証を行っていく予定である。

なお、本計測の実施においては、東京都地下鉄建設株式会社の多大なる御協力をいただいた。ここに感謝の意を表す次第である。また、本研究は平成11年度運輸分野における基礎的研究推進制度「大深度地下インフラストラクチャー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) 小浦場, 大西, 粥川: 4心円泥水式駅シールド工法の開発と施工, 土木学会, 最新の施工技術 13, pp.81~92, 2000.2
- 2) 杉本, 小西, 新井, 粥川: 掘進中のシールド機に関する挙動計測システムの開発, 土木学会, トンネル工学研究発表会論文・報告集第8巻, pp.361~366, 1998.11
- 3) 小西, 新井, 粥川, 津坂, 杉本: 新しい計測システムを用いたシールド機の挙動計測結果と考察, 土木学会, トンネル工学研究発表会論文・報告集第9巻, pp.289~294, 1999.11