

# 30. 全シールド対応掘進無人化システム “ハイパーシールド”

(株)フジタ：\*関谷 克利・佐藤 清  
                  榎垣 和弘

## 1. 緒言

近年のシールド工事に於いては、次の様な問題が生じている。

- (1) 熟練したオペレータと現場作業員の、不足及び高齢化
- (2) 急曲線化による、高度な施工技術の要求

これらの問題を解決するために、株式会社フジタが、シールド工事の掘進の無人化を目指して開発し、この度実用化に至ったシステムが”ハイパーシールド”である。

”ハイパーシールド”には、泥水シールド対応型と、土圧シールド対応型とがあり、これらを総称して全シールド対応と称しているが、今回は、土圧シールド対応型の”ハイパーシールド”に関して報告する。

## 2. システムの概要

このシステムの概要を図1. に示す。また、このシステムのシステム概略図を図2. に示す。

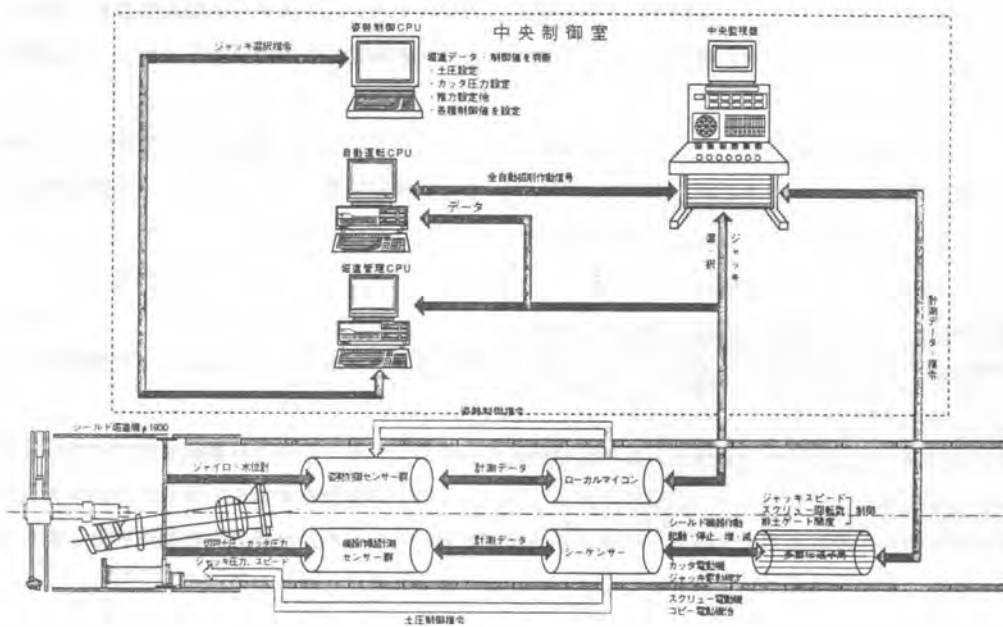


図1. ”ハイパーシールド” システム概要図

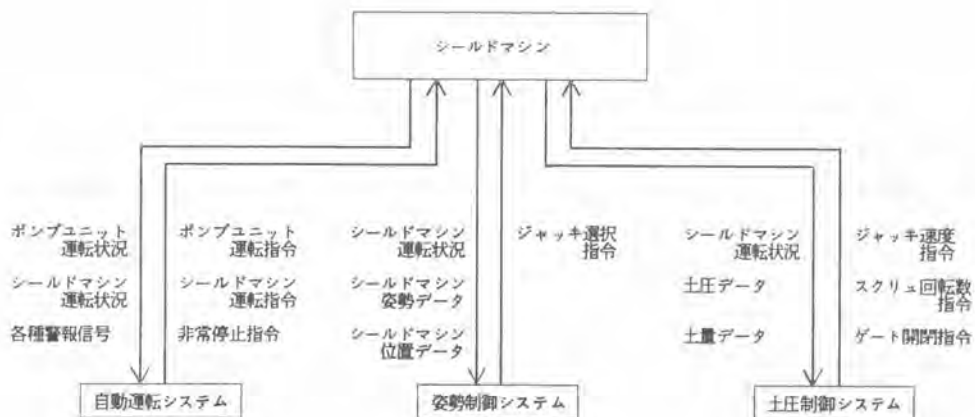


図2. “ハイパーシールド”システム概略図

このシステムは、土圧式シールド掘進機の全自動掘進制御を行ない、人間の手を借りずに、土圧式シールド掘進機による掘進を行なおうとするものである。このシステムを実現するために、ジャッキ選択指令を行なう姿勢制御システム及び土圧の制御を行なう土圧制御システムの2つのシステムに加えて、自動運転を行なうための自動運転システムが追加された。これら3種類のシステムを統合化することによって、初めて、土圧式シールド掘進機の全自動掘進制御が可能になった。

## 2.1 AIについて

図2.のシステムの概略図の中の、姿勢制御システム及び土圧制御システムには、AIエキスパートシステムが使用されている。

AIとは、人工知能 (Artificial Intelligence) のことを言う。これは、人間と同じ様に過去の経験を記憶し、その経験を利用して現在の問題の解決にあたる機能、つまり学習機能を備えた、コンピュータのシステムのことである。AIはその学習機能によって、経験を蓄積すればするほど、正確な判断を下せるようになる。

## 2.2 自動運転システム

自動運転システムはシールドマシンから送られる次の3種類のデータを常に監視している。

- (1) ポンプユニット運転状況
- (2) シールドマシン運転状況
- (3) 各種警報信号

(1)のポンプユニット運転状況のデータには、どの種類のポンプユニットが起動しているのか、運転状態は良好なのかどうか等を表わす信号が含まれている。

(2)のシールドマシン運転状況のデータには、どの種類の油圧機器が動いているのか、また、それ

らの油圧機器の運転状態は良好なのかどうか等を表わす信号が、含まれている。

(3) の各種警報信号のデータには、マシンが危険な状態になっていないかどうかを、表わす信号が含まれている。

もしも、これらのデータの中に、異常な物があれば、自動運転システムはシールドマシンに対して、非常停止を含む適切な処置を指令する。

反対に、自動運転システムからシールドマシンへ送られる指令は、大きく分けると次の3種類になる。

- (1) ポンプユニット運転指令
- (2) シールドマシン運転指令
- (3) 非常停止指令

(1) のポンプユニット運転指令には、油圧及び泥漿注入ポンプユニットの運転指令が含まれている。

(2) のシールドマシン運転指令には、カッタ及びスクリュの回転指令と、シールドジャッキ推進指令が含まれている

(3) の非常停止指令は、警報信号が出た場合に、すみやかにシールドマシンの掘進を停止する。

## 2. 3 姿勢制御システム

姿勢制御システムは、次の様な順序で、シールドマシンの姿勢制御を行なう。

- (1) 作業所の職員が、坑内のセンター測量及びレベル測量を行なう。あるいは、光波を使用して、自動的に坑内のセンター測量及びレベル測量が行なわれる。
- (2) 測量結果をコンピュータに入力し、シールドマシンの現在の位置を自動姿勢制御システムに把握させる。
- (3) 自動姿勢制御システムは、以前の測量結果、及びそれまでの掘進の記録を基にして、現時点の位置から、最適なシールドマシンの制御方向を決定する。
- (4) 自動姿勢制御システムは、最適なシールドマシンの制御方向を向かせる為の、シールドジャッキの上下方向のトルクを決定する。
- (5) 決定したシールドジャッキの上下方向のトルクに最も近いジャッキパターンをシールドマシンへ送る。
- (6) シールドマシンへ送ったジャッキパターンによる、シールドマシンの姿勢及び位置の変化を、ジャイロ及びレベルセンサから計測する。
- (7) 新たに計測したシールドマシンの姿勢及び位置の変化を基にして、再度現時点の位置から、最適なシールドマシンの制御方向を決定する。

姿勢制御システムを使用した場合、このシステム自身がAIによる判断機能を有しているので、作業所の職員は、掘進指示書を作成する必要は無い。また、オペレータは、シールドマシンの癖や過去の掘進の結果を考える事無く、シールドマシンの姿勢制御が、自動的に行なわれる。

## 2. 4 土圧制御システム

土圧制御システムは、次の様な順序で、地山保持を行なう。

- (1) 土圧制御システムが、以前の土圧制御の結果を基にして、掘削土量が理論値に最も近くなる様な設定土圧を設定する。
- (2) 設定された設定土圧を保つ様に、土圧制御システムが掘進を開始する。
- (3) 設定土圧より土圧が高い場合、土圧制御システムは、スクリー回転数を上げ、ジャッキ速度を下げ、ゲート開度を大きくする。
- (4) 逆に設定土圧より土圧が低い場合、土圧制御システムが、スクリー回転数を下げ、ジャッキ速度を上げ、ゲート開度を小さくする。
- (5) 1リングの掘進終了後に、土圧制御システムが、掘削土量を考慮して、再度、掘削土量が理論値に最も近くなる様な設定土圧を設定する。

土圧制御システムを使用した場合、土圧の制御には、PIDA制御が用いられる。更に、このシステム自身がAIによる判断機能を有しているので、オペレータは、地山の特性や、過去の土圧制御の結果を考えなくとも、地山の保持が、自動的に行なわれる。

### 3. 施工実績と成果

現在までのハイパーシールドの施工実績は、泥水式シールドで5現場、土圧式シールドで3現場である。これらの他に、姿勢制御のみを適用した作業所が7現場ある。以下に記すのは、土圧式ハイパーシールドを初めて導入した天理送水管作業所の施工実績である。

#### 3.1 マシン先端の測量結果

ここでは、マシン先端の測量結果を、曲線部と直線・緩曲線部に分類し、まとめた結果を示す事にする。ここでの曲線部は曲率半径が500mの施工区間を言い、直線・緩曲線部は、それ以外の区間をいう。表-1は、その結果をまとめたものである。

この表から、水平方向の曲線部を除いて、±30mm以内になっていることがわかる。

表-1 測量集計結果

	リング数	水平方向 (単位: mm)			垂直方向 (単位: mm)		
		平均値	標準偏差	最大値	平均値	標準偏差	最大値
曲線部	134	-8.0	25.1	41	4.7	14.7	16
直線・ 緩曲線部	1695	3.1	17.3	30	2.1	12.6	28

### 3.2 掘削土量計測結果

ここでは、自動制御区間（701～725 R：25データ）と手動制御区間（726～750 R：25データ）区間の掘削データを比較する事にする。表-2はその結果を示した物である。

表-2 自動制御と手動制御の比較

項目	自動制御		手動制御	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
切羽土圧(kg/cm <sup>2</sup> )	0.947	0.828	0.942	0.834
掘削土量(m <sup>3</sup> )	1.805	0.376	1.709	0.581
掘削土量率(%)	82.26	17.13	77.88	26.47

この表で、掘削土量は、各リングの掘進終了後に計測された、土砂の重量を、地山の比重で除する事によって求めた値である。

この表から、自動制御の切羽土圧の標準偏差は、手動制御のそれよりも大きい事がわかる。また、自動制御での掘削土量率は、100%に近く、標準偏差は、手動制御のそれより小さい事がわかる。このことから、自動制御は手動制御に比べ、細かな切羽土圧制御を行ない、掘削土量から判断して安定した掘削を行なっている事がわかる。

### 3.3 路面変状計測結果

施工期間中、作業所では施工路線の直上に20mピッチで測点を設け、沈下測量を実施してきた。その結果は、土被りの大小に拠る差異は認められず、土被り15m～16mであった全路線を通じて、0～2mm程度と報告されている。この結果からも、この地山保持システムの有効性が確認されよう。

## 4. 考察

今回、土圧式ハイパーシールドを、天理送水管作業所に導入し、次の成果を得た。

(1) 高性能な姿勢制御システムによって、高精度の掘削が行なえるので、良好な掘削線形が得られた事。

土圧式ハイパーシールドは、シールドマシンの位置が、水平、垂直方向共に、計画線から外れぬ様に、常に監視しながら掘進を行なっていた。更に、シールドマシンの位置が、計画線から外れた場合におい

ても、シールドマシンを急激な操作で、計画線に戻そうとはせず、なめらかに計画線にすりつけたので、良好な掘削線形が得られた。

(2) 高性能な地山保持システムによって、掘削土量及び土圧を、一定に保つことができ、施工路線の直上の沈下を、最小限度に抑えることができた事。

土圧式ハイパーシールドは、掘削土量を一定に保つための設定土圧を、自動的に決定し、更にその土圧を保つために、細やかなシールドマシンの操作を行っていた。これによって、掘削土量と切羽土圧は偏差の少ない、安定した値を示した。また、こうする事によって、地盤沈下もごく僅かで済んだ。

(3) 自動運転システムによって、シールドマシンの起動から停止までを、自動的に行なうことができ、シールド工事の省力化が図れた事。

中央制御室のボタンを押すだけで、シールドマシンの運転操作の全てを自動的に行なうので、熟練したオペレータの技量に頼る事無く、シールド掘進を行なう事が出来た。掘進開始のスイッチをオンにした後に、オペレータは、泥漿プラント及び濁水処理設備の運転、整備等を行なう事が出来た。このため、従来はオペレータと作業員が二人で行っていた作業を、オペレーター一人で行なうことが出来た。

また、更に改良が必要であろうと思われた点は、次の通りである

(1) 掘進中にクリアランスが小さくなり過ぎる場合は、サブオートモードに切り換え、シールドマシンの方位角とピッチングを一定に保ちながら掘進を行なう必要があった。

この事は、姿勢制御システムの中に、クリアランスを考慮しながら掘進を行なう機構が無いことに原因がある。従って、クリアランスを考慮する機構を、姿勢制御システムの中に組み込む事が必要であった。

(2) 掘進中、土圧が急激に高くなった場合は、しばらくの間、掘進速度が遅くなった。

土圧が急激に高くなり、その後すぐに土圧が低くなる場合があったが、この時に、しばらくの間、掘進速度が遅くなり、その後掘進速度が基の速度に戻った。この事が掘進時間を長くする要因となっていた。土圧が急激に高くなり、その後すぐに土圧が低くなる場合には、掘進速度を遅くしない様な機構を、地山保持システムの中に組み込む事が必要であった。

これらの点は、土圧式ハイパーシールドの新しいバージョンに於いては、既に改良が完了している。

## 5. おわりに

今回、土圧式ハイパーシールドを作業所に導入する事によって、このシステムによるシールド工事の省力化が可能である事が実証された。今後、熟練したオペレータの不足の問題を解決するためには、このシステムが必要となるであろう。今後は知識ベースの拡充、改良を図り、不測の事態、急激な地山の変化にも対応できる様なシステムの完成を目指したい。