

16. シールド機の圧力制御推進方式による大断面、大深度工事の施工

飛島建設(株)：西 明良

1. はじめに

シールド工法は、密閉型シールド機の発達により、適用土質の拡大、施工の信頼性、安全性が飛躍的に向上し、長距離、大深度、大断面化が進んでいる。反面、作業員の高齢化、熟練者の不足が深刻化し、また、近年工事コスト低減の要求から、高品質化はもとより、省力化、合理化を同時に実現できる実用的な技術開発が注目されている。我々は、トンネル覆工品質の向上を第一の目的に、操作の簡易化と将来の急速施工への対応などを考慮したシールド機の圧力制御推進方式による方向制御システム「FLEX」を開発し、実用化を進めてきた。今回、大断面、大深度である東京湾横断道路工事、元宮支線下水道整備工事への適用により、ほぼ全タイプのシールド工事への検証が完了したため、その有効性について述べる。

2. ジャッキ選択システムの課題

シールド機の姿勢制御は、計画線との偏差を修正するような推進ジャッキの作動パターンを選択することにより行っていた。すなわち、複数の推進ジャッキのうち、修正動作に適した作動ジャッキを過去のデータなどを参照して選択し、さらに1～2本のポイントになるジャッキを選択して、作動、停止させることにより微調整を行っていた。これには以下のような問題がある。

- ・一旦停止させた推進ジャッキは既設セグメントからはずれるため、再び作動させる場合には、その推進ジャッキがセグメントに当たるまで掘進を停止させなければならず、進行の妨げとなる。
- ・ジャッキパターンの選択では、制御が個々のジャッキのオン、オフによる段階制御となり、さらに、上下左右以外のジャッキのオン、オフでは、水平と鉛直の両方向の操作量が同時に変化するため、高い掘進精度を期待できない。
- ・上記の理由からPID制御等の一般的なフィードバック制御システムが適用できず、過去のデータに基づく統計判断やオペレータの経験判断を必要とする複雑な制御システムになる。
- ・ジャッキパターンの選択には経験技術が必要であり、オペレータの技量によりトンネル覆工品質にバラツキが生じる。

3. 圧力制御推進方式の開発

1) 概要

以上の課題を解決するため、推進ジャッキの圧力を制御する新しいシールド機の推進方式を開発した。この方式は、図-1に示すようにシールド機の推進ジャッキを複数のグループに分割し、目標方向に向かうように各グループのジャッキ推力をリアルタイムに無段階に制御するものである。これには以下の

特徴がある。

- ・推進ジャッキの合力の作用点を表すジャッキ操作点の入力により容易に目標方向が設定できるため、経験の浅いオペレータでも正確にシールド機の姿勢を制御できる。
- ・常に全ジャッキ推進となるため、作動ジャッキの追加による停止がなく、効率的に掘進できる。
- ・なめらかな一定勾配により推力を設定するため、セグメントに偏加重をかけない。
- ・水平方向と鉛直方向の姿勢を独立して制御できるため、PID制御などの一般的なフィードバック制御により容易に自動化できる。
- ・ジャッキ推力を広範囲に制御できるため、姿勢制御能力が高く、急曲線にも対応できる。

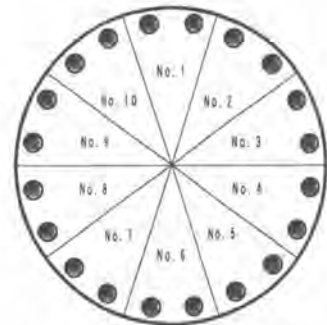


図-1 グループの分割例

2) 必要総推力の検出制御

推進ジャッキの圧力制御は、圧力調整弁の使用により容易に実現できるため、早い時期からシールド機の方角制御に利用することが提案されていた。しかし、地盤を切削し、土砂を取り込みながら推進するシールド機の場合、地盤の堅さや土砂の取り込み状況、さらに構築したセグメントの拘束状況により推力は刻々と変化するため、実用化には至っていなかった。

本方式では、設定されたジャッキ操作点から各グループが負担する推力の割合（以下推力分担とする）を求め、それを維持しながら、常にその合計値がシールド機の現在の必要総推力に一致するよう制御することにより解決した。以下、図-2により制御の手順を示す。

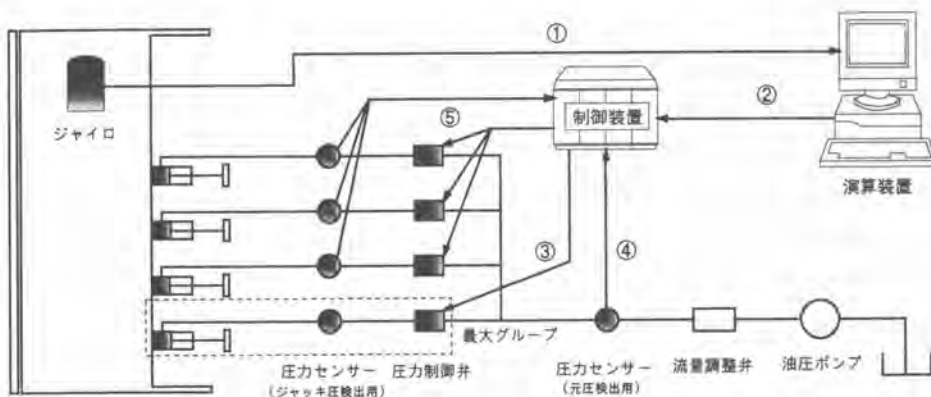


図-2 ジャイロによる自動方向制御の手順

- ①ジャイロによりシールド機の現在の掘進姿勢を計測する。
- ②目標方向との偏差を演算し、それを修正するジャッキ操作点とそのジャッキ操作点に見合う各グループの推力分担を計算する。
- ③上記で求めた推力分担の内、最も大きいグループの圧力調整弁を規定の最大圧力値に設定し、推力検出用グループとする。
- ④シールド機を所定の速度で掘進させ、全推進ジャッキに共通に油を供給するポンプの元圧を検出して、このときのシールド機の必要総推力を求める。
- ⑤推力分担と検出した必要総推力から最大圧力に設定したグループ以外のグループの目標推力を演算し、その推力を維持するように各グループの圧力を制御する。

以上を連続的に繰り返すことにより、シールド機は、姿勢修正のための推力分担を維持しながら、必要総推力になるように制御される。

3) 推力分担の算出法

ジャッキ操作点から各グループの推力分担の算出法について、10グループを例に説明する。図-3のジャッキ操作点から、 θ 方向を最大とした r の勾配の円筒状の推力分布を定義する。各グループの推力分担(P_i)は、そのグループが配置される位置の値を採用することにより求める。

4) ジャッキ操作点の算出法

推進ジャッキの合力の操作点を表すジャッキ操作点(r, θ)は、図-4のシールド機の水平方向と鉛直方向の目標方向に対する偏差(θ_x, θ_y)から求めることができる。本システムでは、PID制御演算式を用いている。

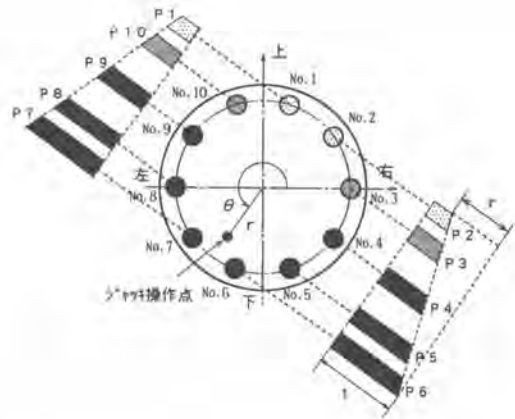


図-3 各グループの推力分担の算出法

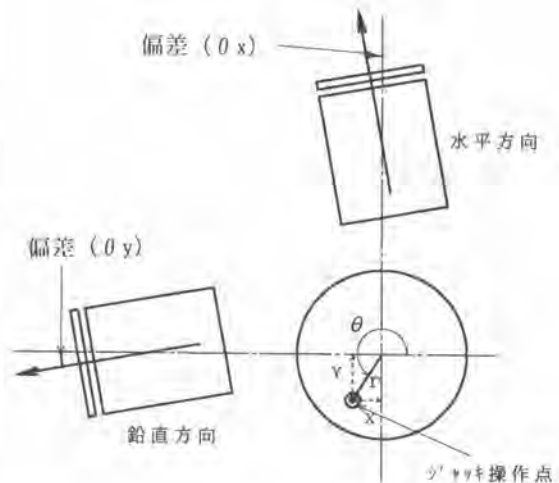


図-4 ジャッキ操作点の算出法

5) 油圧システムの検討

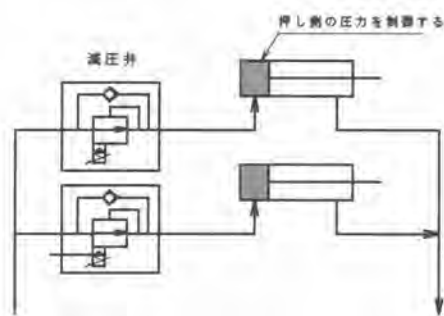


図-5 メータイン方式

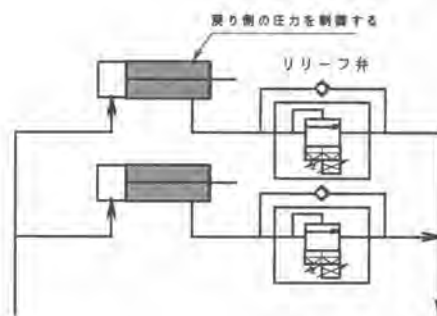


図-6 メータアウト方式

圧力の制御には、ジャッキの押し圧を制御する図-5のメータイン方式と、戻り圧を制御する図-6のメータアウト方式がある。メータイン方式は、推進側に圧力制御機構を直接設けるため、地山圧力の変動などの外的要因による影響を考慮しながら制御する必要がある。これに対して、メータアウト方式は、推進ジャッキにブレーキをかける制御であり、外的要因による影響は推進側で吸収され、それとは無関係に戻り圧を制御できるため、あらたな工夫を必要としない。しかし、メータアウト方式は、推進ジャッキの押し側と戻り側の面積比の関係から、押し側の最大圧力時の30%程度しか推力を制御できないため、高推力を必要とする大深度施工や、大きな旋回モーメントを必要とする急曲線施工では十分な制御能力を発揮できない。本方式では、2) 必要総推力の検出制御により、制御能力の高いメータイン方式を可能とした。

6) 実証実験

制御性能を検証するため、泥土圧式シールド工事（時期：平成元年4月～12月、外径：φ2,120mm、延長：1,217m、砂礫土質N値50以上、ジャッキ本数8本、4分割制御）に適用し、実証実験を行った。

土圧変動の最も大きい条件の悪い区間を選定し、掘進速度とジャッキ圧力の変動状況について確認した。その結果、掘進速度と圧力の変動幅は、ジャッキ選択方式と同程度に押さえることができ、砂礫地盤など土圧変動の激しい悪条件下においても安定した掘進が可能であることを確認した。また、当初、懸念されていた圧力調整弁の相互作用による圧力変動の問題も全くないことを確認した。

4. 大深度工事への適用

1) 適用工事の概要

工事件名：横浜市新羽末広幹線元宮支線下水道整備工事

工 法：泥水加圧式シールド工法

外 径：φ6,150mm(ジャッキ本数20本、10分割制御)

施工延長：842m

土かぶり：最大 62m

土質：固結シルト、細砂(N値50以上)

時期：平成6年4月～平成6年12月

当現場は、最大土かぶり62mの大深度工事であり、水圧 6kgf/cm² を切羽前面から常時受けるため、シールド機には相当な推力が必要になる。そのため、全ジャッキ推進により姿勢制御できる圧力制御推進方式を適用した。

2) 施工結果

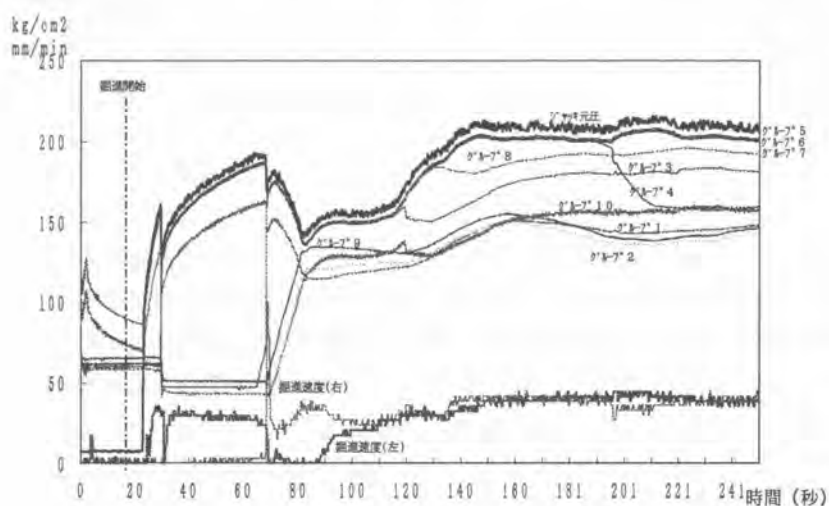


図-7 ジャッキ圧力と掘進速度の推移

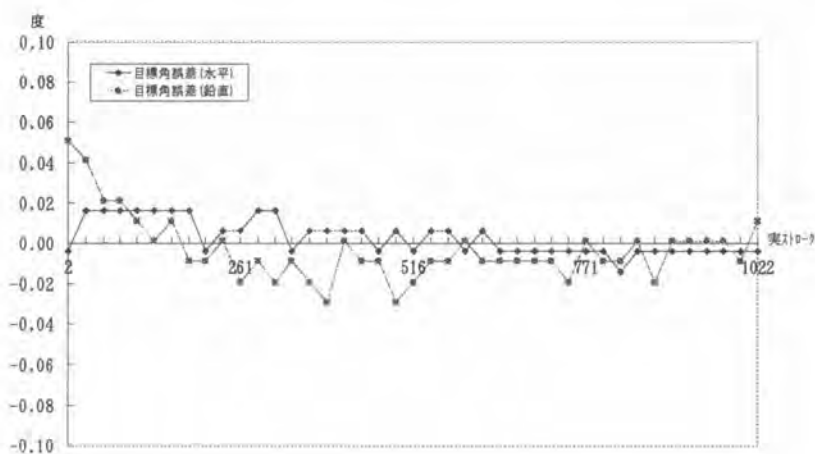


図-8 目標方向に対する誤差のリング内推移

図-7は、掘進開始後4分間のジャッキ圧力と掘進速度の変化を示したものである。開始直後より、左側のジャッキが伸び始め、50秒後に右側が伸び、約1分後に速度が35~40mm/minで安定していく状況が確認できる。その後の大きな掘進速度の変動は見られず、安定した掘進を行っている。また、各グループの圧力が、姿勢制御に従ってリアルタイムに微妙に制御されているのが確認できる。

図-8は、目標方向に対する誤差のリング内の推移を示したものである。水平方向と鉛直方向の姿勢を同時に迅速に制御している。

表-1に、ジャッキ選択による手動掘進との精度比較表を示す。圧力制御推進方式による自動掘進の誤差は、水平0.012度、鉛直0.005度であり、ジャッキ選択による手動掘進の、水平0.042度、鉛直0.024度と比較すると高精度に制御されている。また、バラツキが小さく、常に安定した制御が行われたことを示す。

5. おわりに

圧力制御推進方式は、シールド機の姿勢制御からみれば理想的な方式である。しかし、地山を切削しながら推進するシールド機の場合、切羽安定が最も重要であり、どのような条件下でも安定した掘進を約束するものでなければならない。そのため、種々のタイプの工事に適用し、不具合について改良を重ねてきた。今回、大断面、大深度である東京湾横断道路工事、元宮支線下水道整備工事に適用し、良好な結果を得たことで、本推進方式の技術は、ほぼ確立されたと考えている。今後は、この方式の特徴を生かし、セグメントを組み立てながら推進する同時施工システムに応用し、急速施工などの新技術発展に努める所存である。

なお、東京湾横断道路工事（外径：φ14,140mm、ジャッキ本数48本、12分割）の施工事例については、現在、データ取集中であり、結果については発表時に報告する予定である。

表-1 ジャッキ選択との精度比較表

	自動掘進		手動掘進	
	水平目標偏	鉛直目標偏	水平目標偏	鉛直目標偏
平均	0.012	0.005	0.042	0.024
標準誤差	0.003	0.000	0.005	0.004
中央値	0.002	0.004	0.030	0.019
最頻値	0.001	0.002	0.067	0.001
標準偏差	0.040	0.006	0.033	0.022
分散	0.002	0.000	0.001	0.000
尖度	26.144	23.233	0.486	1.955
歪度	4.957	4.139	0.926	1.538
範囲	0.274	0.052	0.135	0.086
最小	0.000	0.000	-0.002	0.000
最大	0.274	0.052	0.133	0.086
合計	2.353	1.021	1.542	0.873
標本数	259.000	259.000	37.000	37.000
信頼区間 (95%)	0.006	0.001	0.011	0.007