

シールド方向制御学習システムの開発と改善 および運用報告

星野 智紀¹・服部 鋭啓²・田中 善広³・羽鳥 哲夫⁴

¹正会員 株式会社大林組 土木本部生産技術本部シールド技術部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）
E-mail:hoshino.tomonori@obayashi.co.jp

²正会員 株式会社大林組 土木本部生産技術本部シールド技術部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）
E-mail:hattori.toshihiro@obayashi.co.jp

³正会員 株式会社大林組 土木本部生産技術本部シールド技術部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）
E-mail:tanaka.yoshihiro@obayashi.co.jp

⁴正会員 株式会社大林組 大野導水路JV工事事務所（〒441-1371 愛知県新城市城北2丁目2-4）
E-mail:hatori.tetsuo@obayashi.co.jp

シールド工事において、決められた線形から逸脱することなく、シールド機の掘進方向を制御するためには熟練技能が必要とされる。昨今の建設業において、熟年労働者の離職・若年労働者への技術の伝承が思うように進まない問題が取り沙汰される中、シールド工事においても、オペレーターの高齢化・熟練オペレーターの減少の問題が表面化しており、オペレーターの経験に左右されないシールド機の自動方向制御技術の確立が求められている。このような状況下において、弊社は過去にシールドジャッキ同調圧制御システム（ASC-OM'）と連動した『シールド方向制御学習システム』を開発し、実現場にて適用したが、本格的な運用に向けて数々の課題があった。本報告では、システムの改良と実現場適用結果について考察する。

Key Words : *direction control of shield machine, retirement of the skilled operators, self-operationg system of shield machine, load point of thrust jacks, regression analysis*

1. はじめに

シールド工事では、オペレーターがシールド機に装備された複数のシールドジャッキのON/OFFを操作することで、計画線形から逸脱することなく掘進するようにシールド機の進行方向を制御している。この作業にはオペレーターの経験に基づいた知見が必要不可欠であり熟練技能が要求されると同時に、オペレーターの技量や癖により、シールド機の方方向制御の精度に差が出る。そのため、熟練オペレーターが減少する中で、オペレーターの技量に左右されないシールド機の自動運転技術の開発が求められてきた。弊社は過去に、「シールドジャッキ同調圧制御システム（ASC-OM'）」（以下、ASC-OM'）と連動した「シールド方向制御学習システム」（以下、方向制御学習システム）を開発し、実現場で試行した¹⁾が、データ解析の信頼性の面で課題があり、改善の余地があった。本報告では、方向制御学習システムの改善と実現場適用の結果について述べる。

2. ASC-OM' と方向制御学習システムの概要

(1) ASC-OM' の概要

通常のシールド機では、シールド機に装備された複数のシールドジャッキのON/OFFを操作することで方向制御を行う。ASC-OM'が導入されたシールド機では、オペレーターがシールドジャッキの力点位置（水平力点位置 F_x 、鉛直力点位置 F_y ）を指示することで、シールド機の方方向制御を行う（図-1）。指示された力点位置の座標を満足するため、ASC-OM' に組み込まれたコンピューター制御によりシールドジャッキを選択し、そのジャッキ圧を自動で調整する。これにより、方向制御操作の簡略化を図ることができる。さらに、通常のシールド機ではジャッキの選択がON/OFFの二択であったのに対し、ASC-OM' を導入したシールド機では、シールドジャッキの同調圧を制御することで、複数のシールドジャッキのジャッキ圧を滑らかに分布させることができる。そのため、セグメントに局所的な偏圧やせん断力が作用するこ

とを抑制し、ひび割れや目違いといった不具合の発生を防止することを可能としたシステムである。つまり、ASC-OM' を適用することで、シールドジャッキの選択を自動化できるとともに、セグメントの品質を確保することも可能となる。

(2) 方向制御学習システム

方向制御学習システムの概要を図-2に示す。シールド現場では、職員が日々の掘進管理測量でシールド機の位置（水平方向および鉛直方向の計画線形からの逸脱量）を把握し、その結果に基づいて掘進指示書を作成する。掘進指示は、水平方向はジャッキストローク差およびジャイロ方位角、鉛直方向はピッチング角度および水準計の値により行うのが一般的である。従来のシールド機の方向制御は、掘進指示書に記載された指示値を満足するために、オペレーターが複数のシールドジャッキのON/OFFを操作して行なってきた。それに対し、方向制御学習システムでは、過去のシールド掘進実績データ（水平方向はシールドジャッキのストローク差と水平力点位置、鉛直方向はシールド機ピッチング差と鉛直力点位置）を回帰分析し、求めた回帰式により掘進指示値の値に見合った推奨力点を表示する。この推奨力点に基づき、シールドオペレーターがASC-OM' 上で指示力点を入力し、シールド機の方向制御を行う。

3. 旧システムの問題点と課題

旧システムでは、過去の一定リング数における掘進200mm毎の実力点位置（水平力点位置 F_x 、鉛直力点位置 F_y ）と掘進実績（左右のシールドジャッキストローク差、シールド機の上下のピッチング差）を対象とした回帰分析を実施して推奨力点を演算していたが、両者（水平方向は水平方向力点位置 F_x と左右のジャッキストローク差、鉛直方向は鉛直方向力点位置 F_y とピッチング差）の相関が低い問題点があった。同手法により某シールド現場の掘進データを回帰分析した結果を表-1に示す。水平・鉛直方向共に、0.20未満の相関となっており、回帰分析の信頼性の面で改善の余地があることが分かる。今後の本格的な導入に向け、相関の高いデータ解析手法を確立し、システムの信頼性を向上することが課題であった。

4. 旧システムにおける課題の解決策

課題の解決策として、データの抽出方法の検討を行なった。前述のとおり、旧システムでは過去の掘進200mm毎の実力点位置と掘進実績を対象として推奨力点を演算

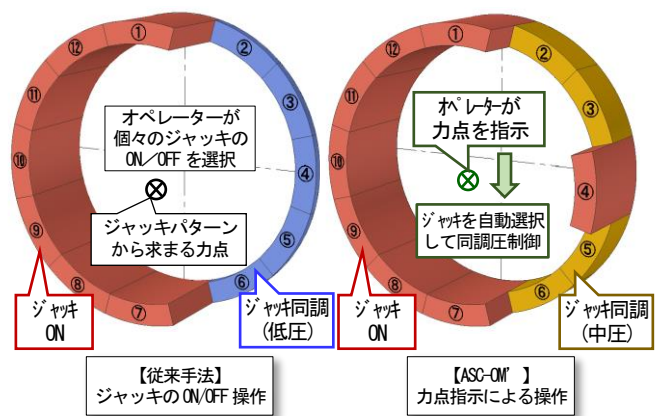


図-1 ASC-OM' の概要

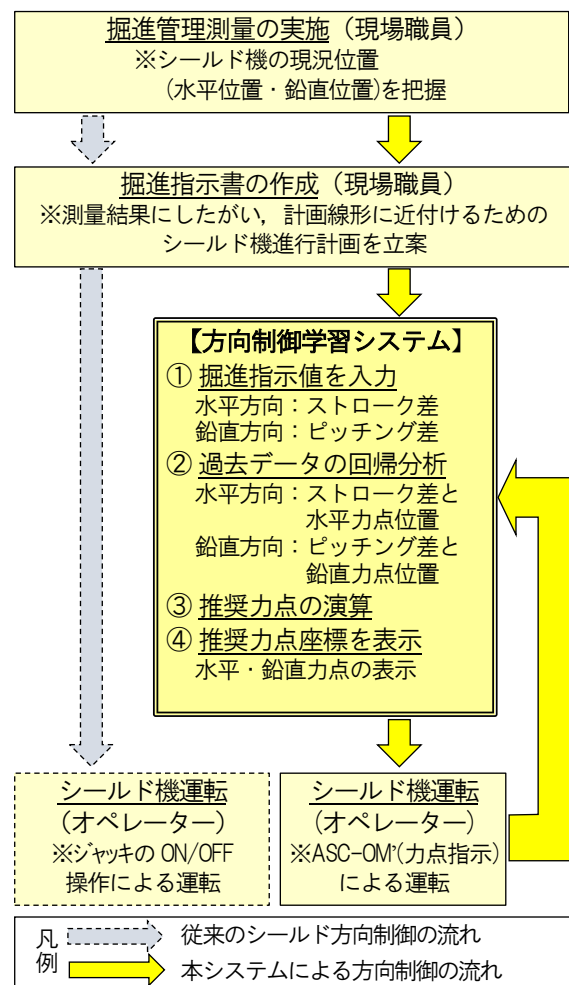


図-2 方向制御学習システムの概要

表-1 旧システムにおける解析対象データと相関

項目	解析対象		相関係数
水平方向	実力点 F_x	左右ストローク差	0.130 (正相関※)
	毎200mm値	毎200mm値	
鉛直方向	実力点 F_y	ピッチング差	-0.198 (負相関※)
	毎200mm値	毎200mm値	

※水平方向は力点をプラス側(右側)にすると、ストローク差が増える(右のジャッキストロークが大きくなる)ため正の相関、鉛直方向は力点の高さを上げるとピッチングが下がるため、負の相関となる。

表-2 解析対象データの抽出方法と相関係数

方法	解析対象	単位	ジャッキストローク						相関係数 (水平方向)	相関係数 (鉛直方向)
			0mm	200mm	400mm	600mm	800mm	1000mm		
A	実力点Fx/Fy	mm	●	●	●	●	●	●	0.126	-0.224
	ストローク差/ピッチング差	mm/deg	●	●	●	●	●	●		
B	実力点Fx/Fy	mm	●	●	●	●	●	●	0.182	-0.272
	ストローク差/ピッチング差	mm/deg	●	●	●	●	●	●		
C	実力点Fx/Fy	mm	●	●	●	●	●	●	0.145	-0.358
	ストローク差/ピッチング差	mm/deg	●	●	●	●	●	●		
D	実力点Fx/Fy	mm	●	●	●	●	●	●	0.265	-0.435
	ストローク差/ピッチング差	mm/deg	●	●	●	●	●	●		
E	実力点Fx/Fy	mm	●	●	●	●	●	●	0.423	-0.487
	ストローク差/ピッチング差	mm/deg	●	●	●	●	●	●		
F	実力点Fx/Fy	mm	●	●	●	●	●	●	0.625	-0.610
	ストローク差/ピッチング差	mm/deg	●	●	●	●	●	●		

※力点Fxは掘進方向を向いて右方向を正、力点Fyは上方向を正と定義した。

ジャッキストローク差は右のストロークが勝っている状態を正、ピッチング差はシールド機が上を向いた場合を正と定義した。

していた。この計算手法 Aに加え、新たな手法としてB～Fの5手法を提案した。旧システムではデータの抽出間隔が200mmと細かく、力点データは抽出時の瞬間値を採用していたのに対し、新手法ではデータ抽出間隔を長くするとともに、力点の値を瞬間値ではなく平均値を採用するパターン（方法 B、方法 D、方法 F）を併せて試行した。これらの方法を用いて、前述の某シールド現場の掘進データ（直線区間 約240m分）を用いて相関の検証を行なった結果を表-2に示す。各抽出方法での相関係数に着目すると、データの抽出間隔を長くした方が相関が高く、力点は平均値を採用した方が相関が高い結果となり、方法Fが最も高い相関を示した。

次に、掘進時において継続的に信頼性が高いデータを取得できるか確認するため、高い相関を示した方法Eと方法Fを用いて連続する10リング、および20リングの相関を検証した。検証は水平方向・鉛直方向ともに実施して同じ傾向を得たが、ここでは水平方向の結果のみ表示する（表-3）。その結果、以下の結果を得た。

- ① 方法Eの相関係数の平均は0.41以上、方法Fの相関係数の平均は0.55以上となり、方法Fの方が高い相関を示した。これは表-2に示した傾向と合致している。
- ② 方法E、方法Fともに、10リング毎の相関で局所的に相関が低い区間（0.10前後）が存在した。

①の結果を考慮し、方法Fを採用することとした。また、②の結果で判明した、局所的に相関が低くなる現象については、解析対象データを過去10リングに固定せず、過去20リングおよび過去30リングを対象とした回帰分析を併せて行ない、その中で最も相関係数が高い回帰式を選択して推奨力点を演算することとした。これにより、統計対象の母数が大きくなることで回帰分析の信頼性が高くなると同時に、直近の少ない母数による回帰分析を加えることで、土質の急激な変化など、掘削特性の変化にも素早く対応することが可能となると考えた（図-3）。

表-3 20リング・10リング連続データ解析結果(水平方向)

対象 リング	相関係数(水平方向)		対象 リング	相関係数(水平方向)	
	方法E	方法F		方法E	方法F
20R①	0.285	0.332	10R①	0.419	0.642
			10R②	0.146	0.11
20R②	0.591	0.846	10R③	0.716	0.934
			10R④	0.516	0.696
20R③	0.345	0.698	10R⑤	0.293	0.563
			10R⑥	0.422	0.764
20R④	0.228	0.444	10R⑦	0.275	0.322
			10R⑧	0.277	0.582
20R⑤	0.330	0.320	10R⑨	0.062	0.006
			10R⑩	0.757	0.825
20R⑥	0.510	0.422	10R⑪	0.774	0.598
			10R⑫	0.355	0.434
20R⑦	0.211	0.629	10R⑬	0.069	0.638
			10R⑭	0.486	0.912
20R⑧	0.567	0.442	10R⑮	0.208	0.451
			10R⑯	0.673	0.319
20R⑨	0.772	0.928	10R⑰	0.678	0.855
			10R⑱	0.770	0.873
20R⑩	0.270	0.449	10R⑲	0.316	0.573
			10R⑳	0.272	0.293
平均	0.411	0.551	平均	0.424	0.570

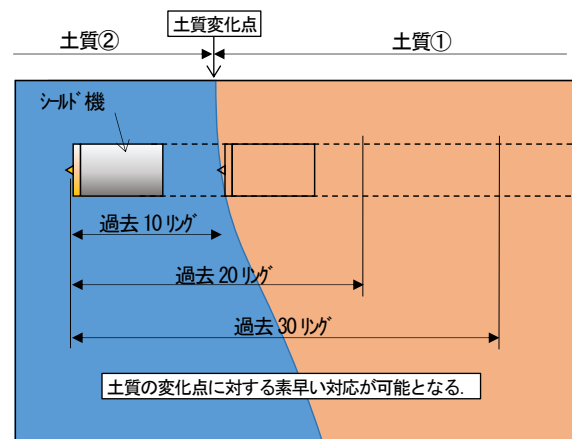


図-3 分析対象データ範囲

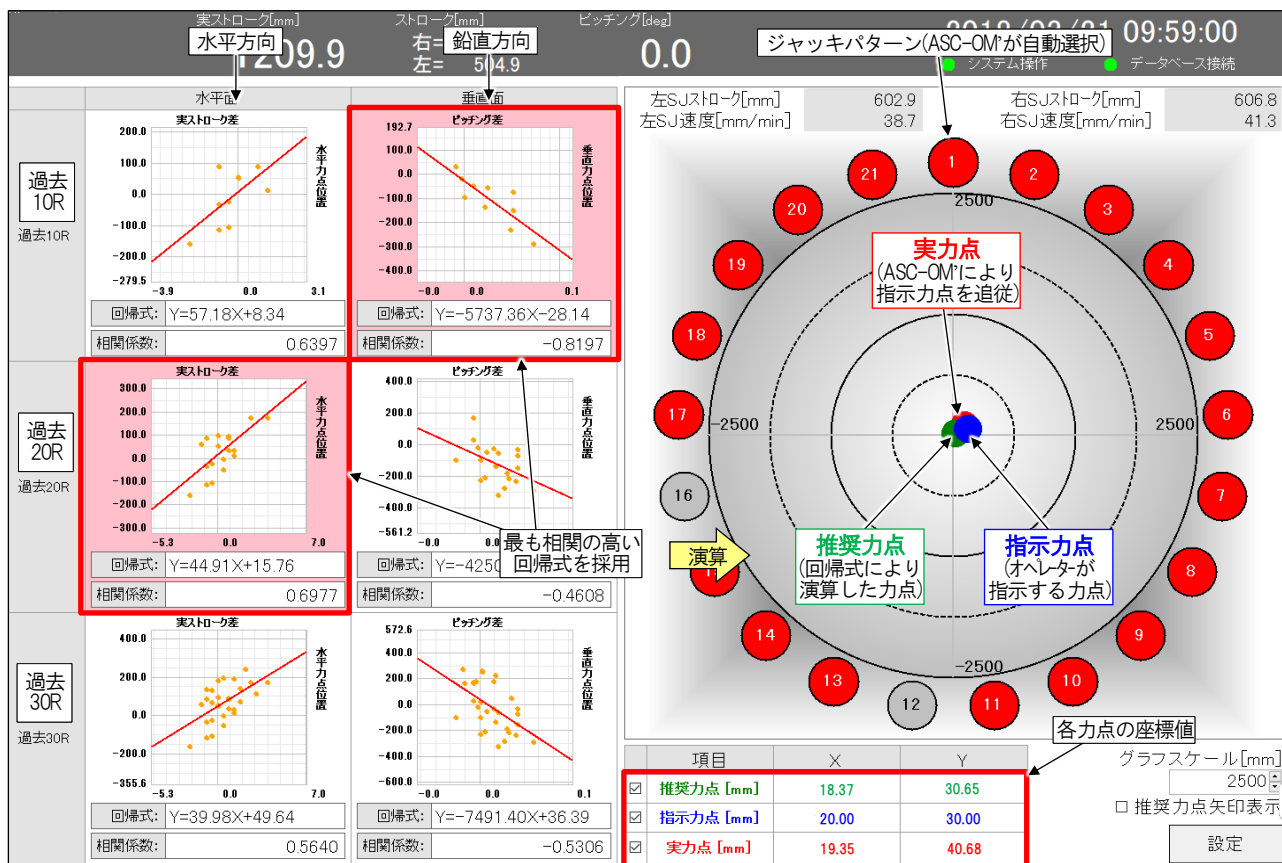


図-4 方向制御学習システム画面

5. 実現場適用

上記の新手法に基づいたシステムを新たに構築し、実現場に適用した結果を以下に記す。

(1) 方向制御学習システム画面

シールド運転席には、個々のシールドジャッキのON/OFF操作を行うシールド機操作盤と、ASC-OM' による運転時の力点指示に使用するASC-OM' 操作盤と、方向制御学習システムの画面を表示している（図-5）。通常のシールド工事においては、シールド機操作盤に示された個々のシールドジャッキのON/OFF操作を行ないシールド機の方向制御を行うのに対し、オペレーターは方向制御学習システムの画面を参照し、ASC-OM' 操作盤を用いてシールド機の方向制御を行う。

方向制御学習システムの画面を図-4に示す。左側の表示は、過去10, 20, 30リングの掘進実績を回帰分析した結果である。表示されているグラフの縦軸は力点実績（水平方向はFx, 鉛直方向はFy）、横軸はシールド掘進実績（水平方向はジャッキストローク差, 鉛直方向はピッチング差）である。また、各グラフの下には回帰式とその相関係数を表示しており、その中で最も相関係数が高いものをシステムが自動的に選択し、その回帰式にしたがい、掘進指示書に示された次リングの掘進指示値を満足する力点座標を推奨力点として算出する（図-4では、

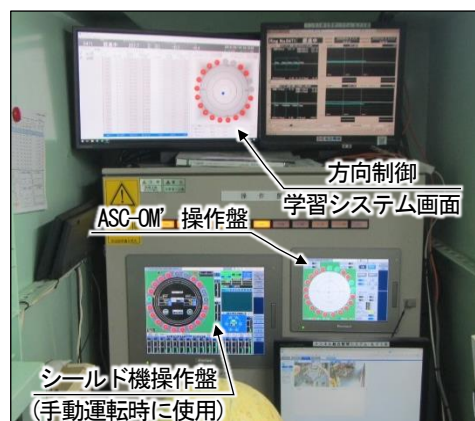


図-5 シールド運転席全景

表-4 新・旧手法の相関係数の比較

項目	旧手法 (平均相関)	新手法 (平均相関)
水平方向	0.297	0.635
鉛直方向	-0.245	-0.633

水平方向は過去20リング、鉛直方向は過去10リングの相関係数が最も高く、採用されている。右側の表示は、左の画面で採用した回帰式により算出した「推奨力点」、推奨力点に基づきオペレーターが実際に指示した「指示力点」、指示力点を追従し、ASC-OM' がジャッキパターンを自動選択して追従圧を調整した結果の「実力点」である。

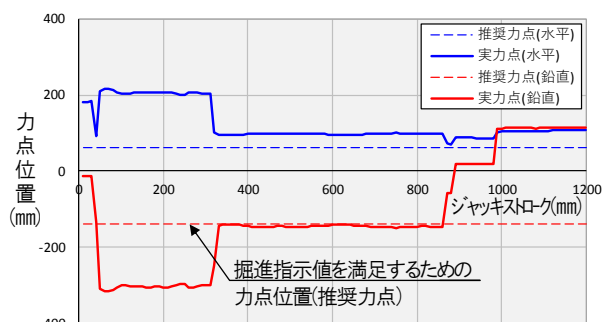


図-6 力点位置例（手動運転時）

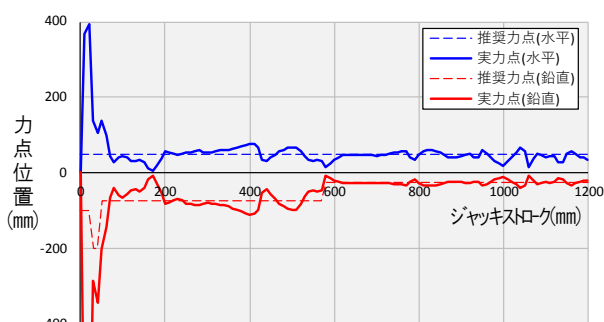


図-7 力点位置例（ASC-OM' 運転時）

(2) 適用結果

実現場にて適用した結果を以下に記述する。

a) システムの信頼性の向上

前述のとおり、旧システムにおいては解析対象データ間の相関が水平・鉛直方向ともに低く、システムの信頼性を向上することが課題であった。今回の実現場の掘進データを、旧システムにおける解析方法で計算した場合の相関係数と、今回の解析方法で算出した場合の相関係数の比較を示す（表-4）。旧システムの方法でのデータ解析結果が水平方向・鉛直方向ともに0.30未満であるのに対し、今回の解析方法で算出した場合の相関係数は0.63以上となり、事前の検証で確立したデータ解析方法Fの有効性を確認することができた。

b) ASC-OM' との併用の効果

ジャッキ手動選択による運転時（以下、手動運転時）と方向制御学習システムで演算した推奨力点に基づきASC-OM'を用いて運転した時（以下、ASC-OM'運転時）の力点位置を検証するため、図-6に手動運転時の推奨力点位置（掘進指示書に記載された指示値を満足するための力点位置）と実力点位置（手動選択されたジャッキパターンから算出した実力点）の例、図-7にASC-OM'運転時の推奨力点位置と実力点の位置の例を示す。ASC-OM'運転時には推奨力点を参照してオペレーターが指示した指示力点を実力点が追従し、推奨力点と実力点の偏差が少ないのに対し、手動運転時には推奨力点と実力点の偏差が大きい。手動運転時とASC-OM'運転時の推奨力点と実力点の平均偏差を表-5に示す。ASC-OM'使用時の平均偏差は手動選択時と比べて水平方向で約1/2、鉛直方向で約1/3と少ない結果となった。これは、ASC-OM'の使用により実力点を推奨力点に近い位置で維持した状態での掘進が可能で、方向制御学習システムとASC-OM'を併用することで、推奨力点付近の力点での運転が可能になることが分かる。

c) 操作回数の低減

手動運転時とASC-OM'運転時について、オペレーターの操作回数を比較すると、手動運転時はジャッキパターンを平均4.6回/R変更していたのに対し、ASC-OM'運転時の指示力点の変更回数は平均0.9回/Rと、操作回数を大

表-5 推奨力点・実力点の平均偏差の比較

運転方法	平均偏差(mm)	
	水平方向	鉛直方向
手動運転時	101	147
ASC-OM'運転時	52	47

表-6 掘進指示値と方向制御量の平均偏差の比較

方向	項目	手動運転時	ASC-OM'運転時
水平方向	ストローク差（平均偏差）	2.2mm	1.7mm
鉛直方向	ピッチング差（平均偏差）	0.014°	0.015°

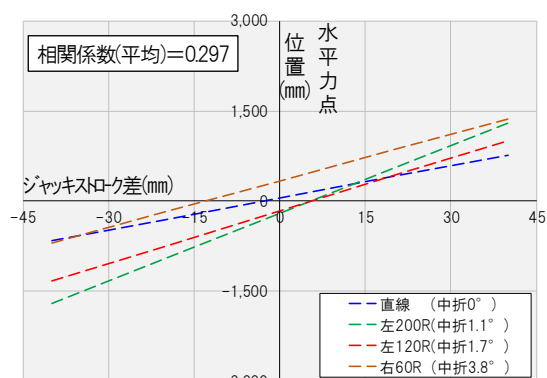


図-8 旧手法による回帰直線（水平方向）

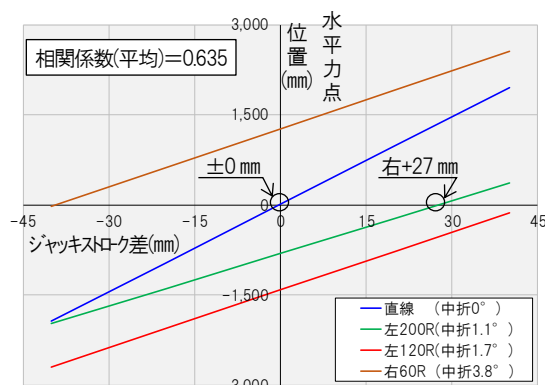


図-9 新手法による回帰直線（水平方向）

幅に低減できた。ある区間におけるASC-OM運転時と手動運転時の掘進指示値に対する方向制御量の比較を表-6に示す。これによると、水平方向・鉛直方向ともに手動運転時もASC-OM運転時も同等の偏差量となっており、同等の線形精度を確保できているのが分かる。つまり、方向制御学習システムにより、オペレーターの主観を排除したシールド機の方方向制御が可能になったと考える。

d) 制御直線の取得

得られた回帰式の実績（新・旧手法による対比）を図-8、図-9（水平方向）および図-10（鉛直方向）に示す。水平方向は、直線区間と曲線区間に分けて示している。旧手法による回帰式は新手法と比較して相関係数が低く信頼性は薄いが、傾きおよび切片の値ともに新手法と比較して少ない値を示している。図-9の新手法の水平方向の回帰式（直線区間）はX切片が0となっている（力点を中心付近で掘進した場合、左右ジャッキストローク差は0となる）のに対し、曲線区間では中折角を付けているためX切片が値を持つ（例えば、左200Rでは、力点を中心で掘進した場合でも、中折機構により左右ストローク差が27mm付くことが分かる）。つまり、得られた回帰式より、曲線区間におけるシールド機の中折機構による効果を定量的に評価できることが分かった。また、鉛直方向の新手法による回帰式より、ピッチングを維持したい場合（ピッチング差を0とする場合）は鉛直力点を100mm付近で掘進すれば良いことが分かる（図-10）。

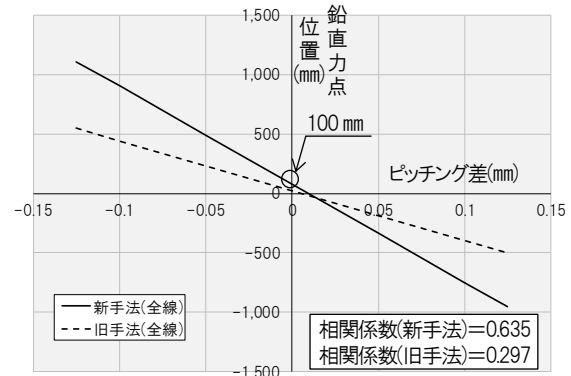


図-10 新旧手法による回帰直線（鉛直方向）

6. まとめ

新たな方向制御学習システムの構築の結果、旧システムの課題であったデータ解析の信頼性を向上し、実現場でその有効性を確認した。今後は実績を積み上げ、掘削土質・シールド径等による傾向をまとめるとともに、設計線形への自己追従機能の付与や、自動切羽圧管理技術や自動測量技術と連携することで、将来のシールド機自動運転に結びつけることを今後の課題として、本稿の結びとする。

参考文献

- 1) 伊藤透，服部鋭啓，谷口智洋：シールド方向制御学習システムの構築と現場適用事例，土木学会学術講演会，土木学会，2013
- 2) 三井仁哉，服部鋭啓，田中善広，羽鳥哲夫，星野智紀：シールド方向制御学習システムの改善とその結果，土木学会学術講演会，土木学会，2018

(2018.8.11受付)

DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF LEARNING SYSTEM FOR SHIELD MACHINE ATTITUDE CONTROL SYSTEM

Tomonori HOSHINO, Toshihiro HATTORI, Yoshihiro TANAKA and Tetsuo HATORI

Attitude control of shield machine is carried out by turning the thrust jacks on and off, and the special skill is required for the operation. Recently, the number of the skilled operator for shield machine has been decreased due to advancement of the aging society and the retirement of the aged skilled operators, therefore the development of the self-operating system of shield machine is desired. Learning system for shield machine attitude had been developed and adopted on-site by us in the past. However, the improvement was necessary in the aspect of the reliability of the system. We have established the new analyzing method to improve the reliability of the regression formula, and confirmed the effectivity by adopting the method on-site.