

急曲線掘進時のシールド操作指標の開発

長岡技術科学大学 学 〇野田裕太郎 正 杉本光隆

1. はじめに

現在、トンネルの線形やシールド機の断面形状の複雑化により、施工前にシールド機の制御方法やそれに対するシールド機の挙動を検討することが必要になる場合がある。施工実績によると、曲線掘進時のシールド機の挙動は、3つの操作条件、すなわち、①ジャッキ推力・ジャッキモーメント、②中折れ機構（中折れ角度、向き）、③コピーカッター（長さ、範囲）によって、規定される。しかし、これら3つの操作条件は共線性を持ち、また、シールド機の形状の影響を受けることから、一意に決めることは困難である。

これらを背景にして、近年、現場実測データにAIを適用し、計画線形に対してマシンの操作方法を提案する手法の開発が行われている。

本研究ではシールド機操作支援 AI において基準化すべき特徴量を把握することを目的として以下を行った。

(1)シールド操作条件の特徴量の考察

シールド機挙動制御のための操作、およびシールド挙動に関する指標について、マシン形状やトンネルの線形などの幾何学的な条件や既往の施工実績から考察する。

(2)現場実測データの分析

シールド掘進で得られた各種計測データを用いて、シールド機の操作条件とシールド機の挙動の関係を分析する。

(3)シールド機動力学モデルによる感度分析

シールド機動力学モデルを用いて、(2)の現場条件で複数のトンネル線形（急曲線）のシミュレーションを実施し、シールド機の操作条件とシールド機の挙動の関係を分析する。

上記、(2)、(3)については(1)で導いた指標について分析を行い、AIに用いる特徴量としての有用性と適用時の留意点について考察した。

2. シールド操作条件の特徴量の考察

本研究では、シールド機の挙動を示す①掘進速度、②シールド軌跡の水平曲率半径、③シールド軌跡の鉛直曲率半径の3つの指標と、前述の3つの操作条件から導き出せる21の操作指標の関係を分析した。

ここでは、②シールド軌跡の水平曲率半径に特に大きな影響を与える指標の分析結果について述べる。

2.1 操作条件に関する指標

以下の3指標と、これらの指標の単位長さ当たりの変化量を分析対象とした。

①ジャッキ水平モーメント M_{3p}

②水平中折れ角 θ_{CH}

③余掘り体積 Vol

2.2 シールド挙動に関する指標

シールド軌跡の水平曲率半径については、直接求めることができないため、その曲率に相当する方位角の変化、すなわちヨーイング角を掘進距離で除した値 ϕ_y' とその変化率に相当する ϕ_y'' をシールド挙動の指標として設定した。

3. 現場実測データの分析

3.1 対象現場

対象とした現場条件は以下のとおりである。

1) 地盤条件

地盤反力係数：8.9MN/m³

静止土圧係数：0.641

最小土圧係数：0.495

トンネル中心位置：GL-25m

2) シールド機

シールド機：中折れ式泥土圧式シールド

半径：5.965m

機長：11.230m

自重：7510kN

シールド機挙動が定常状態になる直線部、円弧部においては操作条件も一定で変化しないため、緩和区間のシールド機挙動について分析した。

3.2 操作指標と挙動の相関関係

各操作条件とシールド機挙動の相関係数を表 1 に示す。表より以下のことがわかる。

- 1) 水平曲率 ϕ_y' は水平中折れ角 θ_{CH} 、余掘り体積 Vol と相関係数が高い。
- 2) 単位長さ当たり水平曲率変化量 ϕ_y'' に対しては単位長さ当たり水平中折れ角変化量 θ_{CH}' が比較的に相関係数が高いこと。これは、曲線開始時の緩和曲線(クロソイド曲線)の形成に大きく影響していることを示している。
- 3) ジャッキモーメント M_{3p} よりも水平中折れ角 θ_{CH} と余掘り体積 Vol の方が、水平面内のシールド機挙動への影響が大きいこと。

4. シールド機動力学モデルによる感度分析

実測データの分析では、1 パターンのみの操作条件の組み合わせであることから、操作条件同士の交互作用を検討するのは困難である。そこで、「3 現場実測データの分析」において対象とした現場条件で、シールド機動力学モデルによる、複数の計画線形の挙動シミュレーションを行い、シールド挙動に対する、2 操作指標のコンター図を作成し、操作条件同士の交互作用を検討した。

4.1 コンター図による分析

現場実測データにおいて相関係数の高かった、水平中折れ角 θ_{CH} と余掘り体積 Vol に対する水平曲率 ϕ_y' のコンター図を図 1 に示す。この図より、通常、曲線内側の余掘り体積 Vol が増加し、水平中折れ角 θ_{CH} が大きくなると、水平曲率 ϕ_y' が大きくなるが、コンター図の等高線は曲線となっていることが確認できる。これは、水平中折れ角 θ_{CH} に対して余掘り体積 Vol が過剰であると、水平曲率 ϕ_y' が増加しにくくなることを示しており、水平曲率 ϕ_y' に対して、余掘り体積 Vol と水平中折れ角 θ_{CH} は交互作用を有していることがわかる。

4.2 重回帰分析による分析

コンター図において交互作用があると判断された水平中折れ角 θ_{CH} と余掘り体積 Vol を説明変数とし、階層的重回帰分析を行い、交互作用を検討した。

階層的重回帰分析とは、ステップごとに関心のある変数を追加した複数回の重回帰分析を行い、寄与率 R^2 や、説明変数の回帰係数等の変化を比較するこ

表 1 操作条件とシールド機挙動の相関係数

シールド機挙動		操作条件					
		M_{3p}	M_{3p}'	θ_{CH}	θ_{CH}'	Vol	Vol'
		kN-m	kN-m/m	min	min/m	m^3	m^3/m
ϕ_y'	rad/m	0.039	0.017	-0.760	-0.202	0.703	-0.161
ϕ_y''	rad/m ²	0.113	0.130	-0.038	-0.442	0.043	-0.028

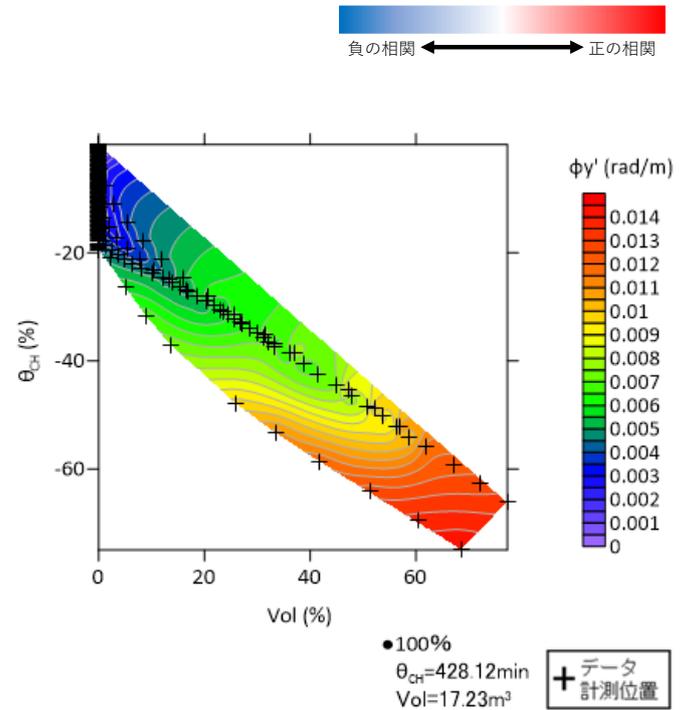


図 1 水平曲率のコンター図 ($\phi_y' \times \theta_{CH}$, Vol)

とによって、追加した変数の重要性を評価する手法である。分析の結果、元の回帰式より、交互作用項(水平中折れ角 $\theta_{CH} \times$ 余掘り体積 Vol)を追加した回帰式の寄与率 R^2 が大きく、また t 検定の結果、交互作用項の回帰係数は有意水準 5% で有意であった。これらより、上記の 2 指標が水平曲率 ϕ_y' に対して交互作用を有していることが確認された。

5. まとめ

以上の検討の結果、個々のシールド操作指標のシールド機挙動への影響と、操作指標間の交互作用を把握することができた。特に今回、交互作用が確認された指標については、特徴量として用いる場合、交互作用を反映した指標にする必要があるため、今後、シールド機動力学を用いて追加の解析を行い、その関係性について検討する。

参考文献

- 1) 杉本光隆, A. Sramoon: 施工実機に基づくシールド機動力学モデルの開発, 土木学会論文集, No.673/III-54, pp.163-182, 2001.3.