スプライン関数を用いたシールド掘進データの平滑化

（株）大本組　正員　中尾　安行

はじめに

近年、シールドトンネル工事においては複雑な路線線形の施工や地下構造物との近接施工など、きびしい施工条件を伴う工事が急増しており、より高度な施工技術が要求されるようになってきた。施工精度の向上にあたっては掘進位置の測定頻度を増し、こまめに軌道修正をおこなうことが理想的である。しかし、位置測定の時間が作業行程に大きく影響することから、位置測定・掘進制御の自動化に関する研究が多くおこなわれている。掘進制御の自動化にあたっては制御量の算出に種々の手法が考案されており、その一つにシールド掘進軌跡の方向角の変化率が推進ジャッキにより発生する回転モーメントに一次的に比例することを利用したものがある[2]。この場合、シールドマシンの制御量（回転モーメント）を算出するために掘進軌跡の方向角の変化率を求めなければならない。

本文は、スプライン関数を用いて掘進データを曲線近似し、掘進軌跡の方向変化率を推定する手法の有効性について検討したものである。

スプライン関数による曲線近似

スプライン関数は、多項式をなんらかの連続条件を満たすように接続した区分的多項式であり、その局所的性質から多項式で近似することが困難な複雑な形をした関数を表現できるため、実験データや関数の近似、補間、数値微分など多くの分野で利用されている。

シールド位置の自動計測をおこなった場合、掘進データは、誤差を含んだ時系列データとして次々と得られる。したがって、本文では、掘進軌跡の算出において、データに追随しながら最小二乗処理をおこないスプライン関数の各区間における近似式を順次決定することのできるワンパス法を採用した。ワンパス法は、任意の区間 $I=[s,t]$ において、1次導関数まで連続な3次のスプライン関数 (1)式により曲線近似をおこなう手法である。ワンパス法に関する詳細およびアルゴリズムについては、参考文献 1) を参照されたい。

$$S(X)=y_0+m_0(X-s)+a(X-s)^2+b(X-s)^3 \quad \cdots\cdots (1)$$

$$\theta=S'(X)=m_0+2a(X-s)+3b(X-s)^2 \quad \cdots\cdots (2)$$

ここに、y_0：X=sにおける偏差
m_0：X=sにおける1次導関数の値
a, b：最小二乗処理により決定する係数

掘進軌跡の方向角 θ は(1)式の1次導関数により与えられ(2)式となる。したがって、(1)式が求まれば、(2)式より掘進軌跡の方向角が求まり、方向角の変化率 α は回転モーメントの一定区間 $I=[s,t]$ において(3)式により求めることができる。

$$\alpha=(\theta_t-\theta_s)/dt \quad \cdots\cdots\cdots (3)$$

ここに、θ_s：S点における掘進軌跡の方向角
θ_t：t点における掘進軌跡の方向角
dt：一定の回転モーメントを作用させた区間

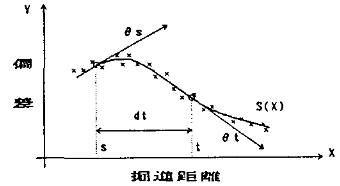

図-1　掘進軌跡の方向角

模擬データの平滑化

ワンパス法による、掘進データの平滑化に対する有効性を検証するために、模擬データを用いて平滑化のシミュレーションをおこなった。平滑化に用いた基本データを図-2に示す。図-3は基本データを基にワンパス法により掘進軌道の近似をおこなったものである。図より掘進軌道は忠実にスプライン関数により近似できていることがわかる。図-4は同データを用い5次の多項式により近似したものであるが、スプライン関数を用いた方がより良い近似値を得られることがわかる。また、図-5は基本データに平均値 0、分散 2×10^{-6}（標準偏差 1.4mm）の正規分布で誤差を与えたデータを用い曲線近似した例である。図-6は基本データに平均値 0、分散 4×10^{-6}（標準偏差 2mm）の正規分布で誤差を与えたデータを用い曲線近似をおこなったものである。同図は、X=6(m)付近で不安定な挙動を示しているが、基本データの特徴はほぼ再現されているものと考える。

表-1に、それぞれのデータにおける近似曲線の基本データに対する残差平方和、および、データ1つあた

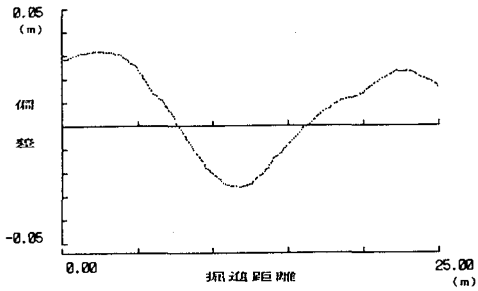

図-2 掘進軌跡の模擬データ

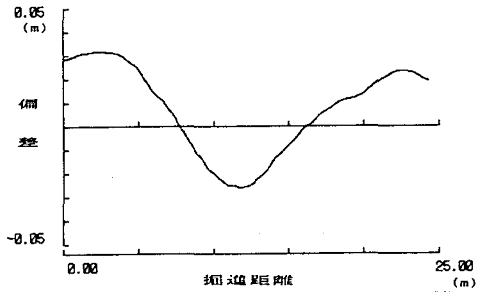

図-3 スプライン関数による曲線近似（基本データ）

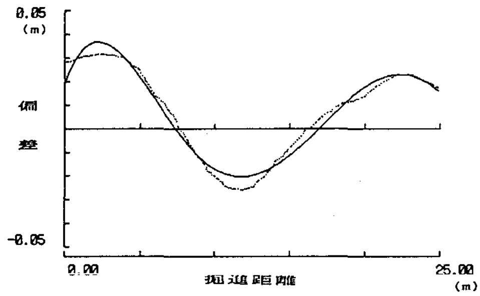

図-4 5次の多項式による近似

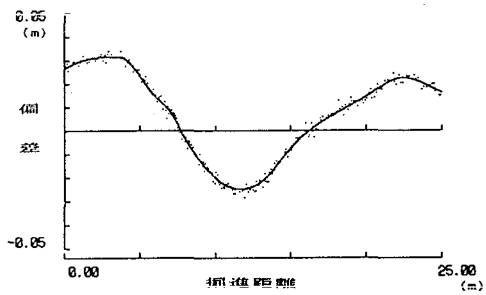

図-5 スプライン関数による曲線近似（標準偏差1.4mm）

表-1 近似曲線の残差平方和

近似曲線	スプライン関数			多項式
使用データ	基本データ	$\sigma^2=2\times10^{-6}$	$\sigma^2=4\times10^{-6}$	基本データ
Σr^2	1.57×10^{-6}	13.06×10^{-6}	18.05×10^{-6}	246.61×10^{-6}
$\sqrt{(\Sigma r^2)}/N$	2.51×10^{-4}	7.22×10^{-4}	8.49×10^{-4}	31.41×10^{-4}

r：残差　　N：データ数

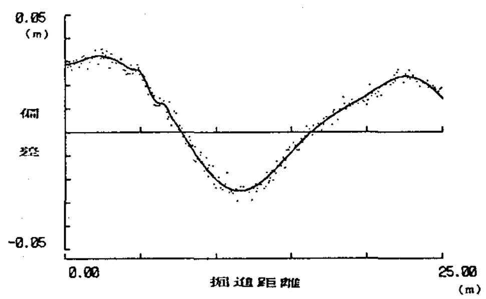

図-6 スプライン関数による曲線近似（標準偏差2.0mm）

りの平均の偏差を示した。表より、スプライン関数を用いた場合は、多項式に比べ1オーダー程度精度良く近似されており、曲線近似におけるスプライン関数の有効性が確認できる。

おわりに

シールド位置を自動計測した場合、その結果はジャイロコンパス、ジャッキストローク計、傾斜計などから得られる計測データを演算したものとなる。したがって、計測データには必然的に誤差が含まれており、また、地盤の不均質性による影響も考慮すると、実際の掘進データは、かなりばらつくものと予想される。最小二乗法が、測定値に偏りが無く、誤差が正規分布をしていることを前提としているため、データ処理をおこなう前には、データの持つ特性について十分に検討し、その性質を十分に把握しておかなければならない。今後は、実際の計測データを用いて曲線近似をおこないスプライン関数による掘進軌道の再現性について検討をおこないたい。

［参考文献］　1）市田、吉本：「スプライン関数とその応用」　pp.103-114
2）酒井、星谷：「カルマンフィルターを用いたシールド位置の予測と制御」
土木学会論文集　第385号　pp.69-78