Ⅵ-25　拡張カルマン・フィルターを援用したシールド位置予測

武蔵工業大学　工学部　正会員　星谷　勝
東急建設（株）　土木技術部　正会員　○酒井　邦登

1．はじめに

シールドトンネル施工においては、トンネル線形の精度と掘進中の切羽の保持が最も重要な課題である。特に線形管理については、シールドトンネル内での連続的測量が困難であることなどから、線形に関して十分な管理のできない状況で、制御にまで発展していないのが実情であったが、今回、計画路線と施工実績路線との偏差をリアルタイムに認識する装置の開発に成功した。そこで、シーケンシャルにデータを取り込みながら、その最適推定値を逐次修正することの可能な拡張カルマン・フィルター理論を統計的解析に適用することにより、従来は不可能であったシールド機の何点か先の未来位置を予測することが可能となり、シールド位置のフィードバック制御を可能とした。

切羽の安定についても、重回帰分析法に拡張カルマン・フィルター理論を適用して、シーケンシャルなデータ処理を行ったため、従来のバッチ処理に比較して極めて短時間に処理が可能となった。

2．位置の予測式

基本式　一般に、プロセス制御にコンピュータを利用する場合、何らかの数式モデルで、現象を表現することが必要である。しかし、シールド位置の物理的な意味を考慮にいれた理論の構築には、数多くの不明確な前提条件を仮定することが必要で、複雑なシステムの出力の数式モデルを、実測できない多くのパラメータを含んだまま、理論的に構成することは不可能である。

そこで、本論文では、シールド位置の計画線形からの偏差を、水平および鉛直座標に分離して時系列データとして取り扱い、自己回帰モデルにあてはめることとした。

$$y_t = \sum_{i=1}^{N} a_i \cdot y_{t-i} + \epsilon_t \qquad (1)$$

ここに、y_t;時刻t における計画路線からの偏差,
　a_i;AR係数,
　ϵ_t;誤差過程,
　N; 自己回帰モデルの次数

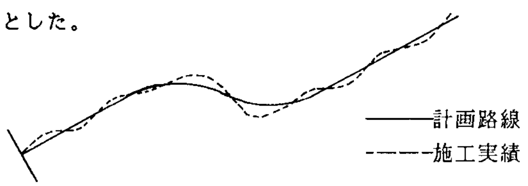

図-1　シールドトンネルの線形

式(1) は、通常バッチ処理により、AR係数の決定が行われるが、本論文では、データのシーケンシャル処理により、推定値を逐次改良できるように、拡張カルマン・フィルター理論に定式化する。

拡張カルマン・フィルター　拡張カルマン・フィルターは、線形確率システム理論に基づいており、線形確率システムは、以下の状態方程式と観測方程式で表現される。

$$\{x_{t+1}\} = [F_t]\cdot\{x_t\} + [G_t]\cdot\{w_t\} \qquad (2)$$

$$\{y_t\} = [H_t]\cdot\{x_t\} + \{v_t\} \qquad t=0,1,\cdots (3)$$

ただし、$\{w_t\}$,$\{v_t\}$ は、平均値0のガウス性の白色雑音で、その共分散行列は、次のように仮定する。

$$E\left\{\begin{pmatrix} w_t \\ v_t \end{pmatrix}(w_s^T \ v_s^T)\right\} = \begin{pmatrix} Q_t & 0 \\ 0 & R_t \end{pmatrix}\cdot\delta_{ts}, \quad R_t > 0 \qquad (4)$$

$$E\{w_t \cdot x_s^T\} = 0, \ E\{v_t \cdot x_s^T\} = 0, \qquad t \geq s \qquad (5)$$

各種同定問題を、拡張カルマン・フィルターに定式化するためには、対象系を状態方程式と観測方程式に表現する必要がある。推定したい状態量に式(1) のAR係数を取ると、状態方程式は、式(6) で示される。

$$[a_1 \ a_2 \ a_3 \cdots a_N]_{t+1}^T = [a_1 \ a_2 \ a_3 \cdots a_N]_t^T + w_t \qquad (6)$$

観測量は、計画路線からの偏差であるから、式(1) より観測方程式は、式(7) で表現される。

$$y_t = a_1 \cdot y_{t-1} + a_2 \cdot y_{t-2} + \cdots\cdots + a_N \cdot y_{t-N} + v_t \qquad (7)$$

以上により、時刻t における最適ＡＲ係数は、シーケンシャルに取り込まれる観測データ y_t に追尾しながら逐次求められるので、このＡＲ係数を用いて式(7) より、$\hat{y}_{t+1/t}$を求める。次に時刻t+1 におけるＡＲ係数を修正して、これにより、$\hat{y}_{t+2/t+1}$を求めて順次、将来点のシールド位置の計画路線からの偏差を予測していく。

３．予測結果

観測量であるシールド位置の計画路線からの偏差は、周期の異なる２本の正弦曲線を重ね合わせ、これに偏差の最大値の10％に、-1.0～1.0 の一様乱数を乗じたものを加えて作成した。これを、時系列観測データとみなして、拡張カルマン・フィルターにより、ＡＲ係数の逐次同定を行って、求められたＡＲ係数から、将来の1,3,5 点先の計画路線からの偏差を予測した。図-2にシールド位置の予測結果を示す。

予測計算に必要な条件

自己回帰式　$y_t = a_1 \cdot y_{t-1} + a_2 \cdot y_{t-2} + a_3 \cdot y_{t-3} + v_t$

状態量の推定誤差の分散	Q=1.0
観測量に含まれている誤差の分散	R=1.0
推定値（状態量）の初期値	0.0

図-2より、１点先の予測結果は大体施工実績に一致しており、観測ノイズの影響をあまり受けず非常に良い精度で推定できた。５点先の予測はデータの蓄積が少ない時刻においては、観測ノイズの影響を受け、結果が安定しないが、観測データの数が10点を越えると落ち着いて概略の傾向は把握でき、ある程度の精度が得られたものと考える。以上の予測結果は、自己回帰式の次数を変えることにより、あるいは、観測時間間隔を短くすることにより、推定精度を高めることが可能であると思われる。

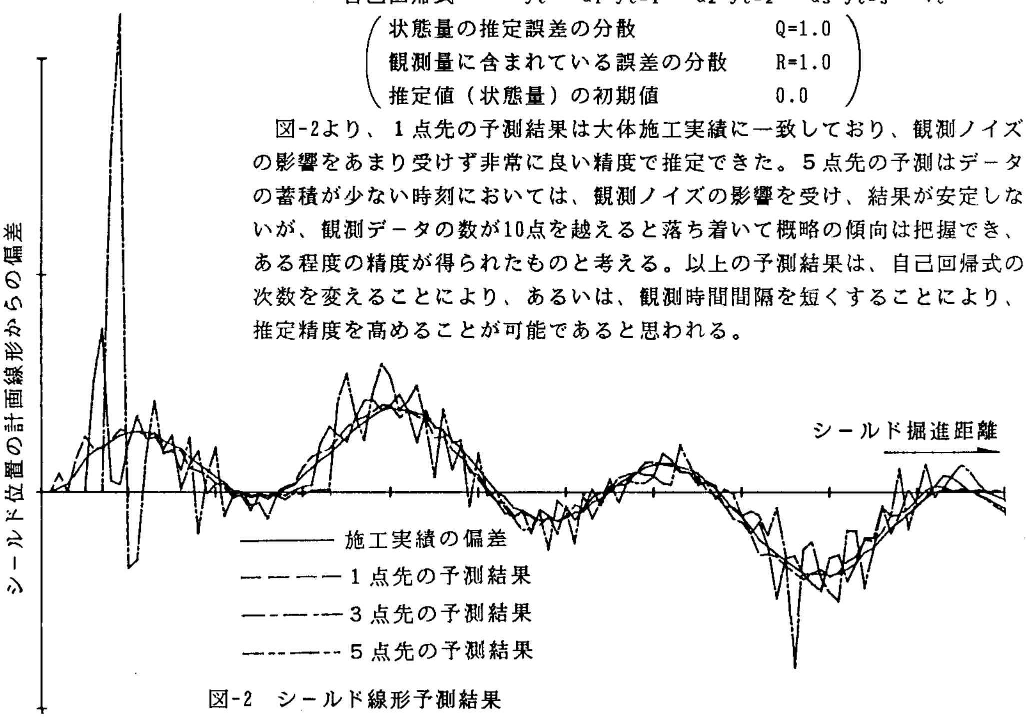

図-2　シールド線形予測結果

４．おわりに

本報告では、シミュレーションデータについて統計的解析により予測を行っただけで、自己回帰モデルの係数が有する物理的意味については言及していない。しかし、位置の偏差を掘進距離で微分した位置の偏差の変化率を、拡張カルマン・フィルターを援用した重回帰分析を行い、ジャッキパターンやストロークの物理力に関連づけることが可能と考え、実際の施工現場への適用を行っているところである。

参考文献

(1) 星谷・斉藤；拡張カルマン・フィルターを用いた同定問題の各種振動系への応用，土木学会論文報告集 No.339,pp.59～67,1983.11.　(2) 赤池・中川；ダイナミックシステムの統計的解析と制御，サイエンス社
(3) Jazwinski,A.H. ; Stochastic Processes and Filtering Theory,Academic Press,1970