

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

PREDICTION AND CONTROL OF BEHAVIORS ON DRIVING SHIELDS USING KALMAN FILTER THEORY

酒井邦登*・星谷勝**
By Kunito SAKAI and Masaru HOSHIYA

For the purpose of operating shield jacks automatically, a method was developed that predicts and controls the future behaviors on driving shields.

This is a method which applied effectively the Kalman filtering theory to the recursive prediction and control.

The prediction method is based on an autoregressive model that is used for analyzing a time series record, and the control method is based on the regression analysis.

For the actual observed data, this method was successfully verified that we can predict accurately the future behaviors from the sequential data of on-line observation, and can decide the optimal operation of shield jacks for the modified track.

Keywords : autoregressive model, construction, cybernetics, driving shield, Kalman filter, prediction and control, regression analysis

1. まえがき

最近のシールドトンネル工事は、複雑な路線線形や変化の激しい地盤での施工等の厳しい条件が増加し、より高度な施工技術が要求されるようになってきた。これに合わせて建設業界ではシールド工法の自動化に向けての研究が急速に進められており、小型コンピュータを用いた自動計測システムが多数開発されている。小型コンピュータは、大量のデータを短時間に処理することができる、データの集積が容易であり、しかも処理ソフトには汎用言語を使用できるため、要望に応じた細かいプログラミングが可能となるなどの多くの利点がある。このため、従来、目視あるいは手動計測により確認してきた切羽の状態や挙動をリアルタイムに認識できるだけではなく、線形管理においてもレーザー光による測量を応用して高精度に位置検出ができる自動計測となっている。

しかし、計測結果をもとにした制御は切羽の安定についてのものが多く¹⁾、路線線形については施工実績路線をリアルタイムに計測するものの制御にまで発展していないのが実情であった^{2)~4)}。これは、計測データに含ま

れる誤差の除去、時系列の計測データから制御に使用する範囲の決定、時系列の計測データ中での新旧の重み付け等が困難であることに起因する。しかも、リアルタイムとはいうものの、計測結果をもとに制御量を演算し、制御の動作に至るには、ある程度の時間を必要とするところから、シールド機の挙動に制御が追随できていない。これを補うために人間の判断により事前に傾向の把握を試みているが、リアルタイムに定量的な予測を行なうまでには至っていないことから、ここに適切な統計的予測を組み込めば、事前に制御することが可能になると考えた。

統計的解析をデータが得られるたびに、全部の時系列データに適用していたのでは、データの蓄積に伴って、予測演算に要する時間が増大してしまう。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近代制御理論の1つであるカルマン・フィルター^{5)~8)}を統計的解析に適用することで対処した。ここで、フィルタリング理論のカルマン・フィルターについて説明しておく。通常、構造系は各種の外力を受け、ノイズを帶びており、その状態は観測装置を通して観測される。また観測値もノイズに乱され、しかも状態量と観測量が異なることが多い。このような状況のもとで観測データから、構造系あるいは入力系の

* 正会員 東急建設(株) 施工本部土木技術部
(〒150 渋谷区渋谷 1-16-14 渋谷地下鉄ビル)

** 正会員 Ph.D. 武藏工業大学教授 土木工学科
(〒158 世田谷区玉堤 1-28-1)

状態に関する情報を抽出する理論がフィルタリング理論と呼ばれるものである。カルマン・フィルター以前の定常時系列に対するフィルタリング理論は非常に難解であり、応用範囲も限定されていたようである。カルマン・フィルターは以上に述べたようにばらつきや誤差を含む対象系の解析を可能とするだけでなく、シーケンシャルに取り込んだデータを処理するたびに廃棄できることから、小規模容量の小型コンピュータにおいてもオンライン予測が簡単に実行可能となる等の利点を有している。

この手法によれば、従来より望まれていたシールド機の何点か先の将来予測位置を精度良く算出することができるため、事前制御の前提条件を満足するものと考えられる。

本論文では予測手法を提案するだけでなく、実測データにおいて、手法の妥当性の確認、および実施工への適用性の検討を行った。

次に、シールドトンネルの路線線形の計測結果・予測結果に基づいた制御を行うには、対象系の物理的意味を考慮に入れた入力と出力の関係式が必要となる。シールドトンネルの路線線形の制御に必要な量は、方向力（ベクトル）であるが観測不可能であるため、これをジャッキ稼働パターンと線形に関連づけて可観測であるジャッキ稼働パターンを制御量として取り扱い、入力と出力の関係式を作成した。この関係式は線形の回帰式となるが、最適回帰係数を求めるために、従来、パッチ処理による最小2乗法が用いられてきたが、データの処理方法等、即時性の必要なオンライン処理には適さないものであった。しかし、前述の路線線形の予測に用いたカルマン・フィルターを利用することで観測データのシーケンシャル処理を行い、その最適推定値を逐次改良できることが明らかになった。この最適推定値に基づいて、制御量である目標到達点までのジャッキ稼働パターンを算出することができる。このジャッキ稼働パターンの最適設定法についても、実測データにて確認することができた。

本論文は、シールドトンネル工事の全自動化をねらいとして、路線線形の制御手法を確立するために、カルマン・フィルター理論を有効に用いた手法を提案し、実測データにおいて、開発した手法の適用性を検討したものである。これらの手法は、すでに実施工に適用中であり、今後のシールドトンネル工事における重要な手段として活用されるであろう。

2. カルマン・フィルター理論

シールドトンネル線形の挙動のように地盤の非均質的なばらつきに起因する複雑な現象は確率論的に取り扱うのが妥当であろう。実際の物理現象は、入力系・構造系・

観測系等のすべてにノイズが含まれており、われわれの得られるデータは確率的に支配された同一環境下のデータ群の中の1つのサンプルデータとして取り扱うのが適切であると考えられる。この表現方法が確率システムに基づく表現法である⁹⁾。線形離散時間確率システムは、以下の観測方程式と状態方程式で表現される。

$$x_{t+1} = F_t \cdot x_t + G_t \cdot w_t \dots \quad (1)$$

$$y_t = H_t \cdot x_t + V_t^V \quad (t=0, 1, \dots) \dots \quad (2)$$

ここに、 $x_t : n$ 次元状態ベクトル、 $y_t : p$ 次元観測ベクトル、 $w_t : m$ 次元プラント雑音、 $V_t^V : p \times p$ 次元観測雑音、 $F_t : n \times n$ 状態遷移行列、 $G_t : n \times m$ 駆動行列、 $H_t : p \times n$ 観測行列、である。 F_t 、 G_t 、 H_t の要素は時間 t のみの確定関数とする。さらに雑音ベクトル w_t 、 v_t は平均値0のガウス白色雑音で、その共分散行列は次のように仮定する。

$$E \left\{ \begin{pmatrix} w_t \\ v_t \end{pmatrix} \left(\begin{matrix} w_s^T & v_s^T \end{matrix} \right) \right\} = \begin{pmatrix} Q_t & 0 \\ 0 & R_t \end{pmatrix} \cdot \delta_{ts} \dots \quad (3)$$

ただし、 $R_t > 0$

$$E\{w_t \cdot x_s^T\} = 0, E\{v_t \cdot x_s^T\} = 0 \dots \quad (4)$$

ただし、 $t \geq s$

ここに、 $Q_t : m \times m$ 非負定値対称行列、 $R_t : p \times p$ 正定値対称行列、 δ_{ts} ：クロネッカーノルムの記号、である。初期状態 x_0 はガウス分布に従い、その平均値および共分散行列は次のとおりで、雑音 w_0 、 v_0 とは独立であるものとする。

$$E\{x_0\} = \bar{x}_0 \dots \quad (5)$$

$$E\{[x_0 - \bar{x}_0][x_0 - \bar{x}_0]^T\} = \Sigma_0 \dots \quad (6)$$

式(1)～(4)で与えられる離散時間確率システムに対するカルマン・フィルター^{10), 11)}は、次の(a)～(d)で与えられる。

(a) フィルター方程式

$$\hat{x}_{t+1/t} = F_t \cdot \hat{x}_{t/t} \dots \quad (7)$$

$$\hat{x}_{t/t} = \hat{x}_{t/t-1} + K_t [y_t - H_t \cdot \hat{x}_{t/t-1}] \dots \quad (8)$$

$$(t=0, 1, \dots)$$

(b) カルマン・ゲイン

$$K_t = P_{t/t-1} H_t^T [H_t \cdot P_{t/t-1} \cdot H_t^T + R_t]^{-1} \dots \quad (9)$$

(c) 推定誤差共分散行列

$$P_{t+1/t} = F_t \cdot P_{t/t} \cdot F_t^T + G_t \cdot Q_t \cdot G_t^T \dots \quad (10)$$

$$P_{t/t} = P_{t/t-1} - K_t \cdot H_t \cdot P_{t/t-1} \quad (t=0, 1, \dots) \dots \quad (11)$$

(d) 初期条件

$$\hat{x}_{0/-1} = \bar{x}_0, P_{0/-1} = \Sigma_0 \dots \quad (12)$$

ここに、 $K_t : n \times p$ 次元カルマン・ゲイン行列、 $P_t : n \times n$ 次元推定誤差共分散行列、である。

カルマン・フィルターは y_t を入力、推定値 $\hat{x}_{t/t}$ (or $\hat{x}_{t/t-1}$) を出力とする線形システムである。まず最初に \bar{x}_0 、 Σ_0 が与えられると、式(12)により初期値 $\hat{x}_{0/-1}$ 、 $P_{0/-1}$ が定まり、式(9)より、 K_t が計算される。 $t=0$

において y_0 を観測し、式(8), (11)より $\hat{x}_{0/0}, P_{0/0}$ が求まる。続いて、式(7), (10)より $\hat{x}_{1/0}, P_{1/0}$ 、式(9)より K_1 が計算される。 $t=1$ において、 y_1 を観測し、再度、式(8), (11)より、 $\hat{x}_{1/1}, P_{1/1}$ が求まるので、以下同様の手順で推定値および推定誤差共分散行列が計算される。以上に述べたように、カルマン・フィルターは新しい観測値が得られるたびに、前の推定値を修正して新しい推定値とし、新しく得た観測値は廃棄してしまうアルゴリズムとなっているため、観測データを保存しておく必要がないという特長を有している。

3. シールド位置の予測

(1) 数式モデル

一般に制御問題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入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ーを含んだまま、理論的に構成することは不可能である。たとえ理論が構築されて、現実のパラメーターと整合性が取れ、適正な表現であっても数値計算の処理時間、雑音の程度等の点から、オンラインの制御問題には、ほとんど使用できない。

そこで、実際の物理現象は確率論的、統計論的に取り扱わなければ本質的な面が表現できないため、シールド位置の計画路線からの偏差を、水平および鉛直座標に分離して時系列データとして扱い、統計的解析を行う。

図-1に、シールド位置の計画路線と施工実績路線を模式的に示す。

統計的解析に使用する数式モデルは自己回帰モデル¹²⁾ [autoregressive (AR) model] とし、基本式は式(13), (14)に表現される。

$$x_t = \sum_{i=1}^N a_i \cdot x_{t-i} + \varepsilon_t \quad \dots \quad (13)$$

$$y_t = \sum_{i=1}^N b_i \cdot y_{t-i} + \varepsilon'_t \quad \dots \quad (14)$$

ここに、 x_t ：掘進距離 t における計画路線からの水平方向偏差、 y_t ：掘進距離 t における計画路線からの鉛直方

向偏差、 a_i ：AR 係数（水平方向）、 b_i ：AR 係数（鉛直方向）、 ε_t ：誤差過程（水平方向）、 ε'_t ：誤差過程（鉛直方向）、 N ：自己回帰モデルの次数、である。

自己回帰モデルの次数決定については、赤池の提案した最終予測誤差（Final Prediction Error : FPE）を最小にする方法¹³⁾が実際的で、一般によく用いられている。

自己回帰モデルの構築にあたっては、有限個の観測データしか使用することができない。また、有限個の観測データからは、それ以下の数のパラメーターしか推定できることから、目的に応じて最適の自己回帰モデルの次数を選ぶ必要がある。

(2) カルマン・フィルターへの定式化

観測データをもとにして、自己回帰モデルによる最良の線形予測式を求めようとする試みは古くからあり、観測データのバッチ処理による最小2乗法の適用が最も一般的である。しかし、有限個の観測データに基づいて計算を行う場合、どの程度の過去まで観測データを予測に使用するかの判断・決定が困難である。しかも、逐次取り込まれる観測データを順次シーケンシャルに処理しながら、最良の線形予測式を漸化的に改良していくことが不可能である。

これらの問題点を克服するために、シーケンシャルに最新の観測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カルマン・フィルターを自己回帰モデルに適用する。

同定問題をカルマン・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(13), (14)の AR 係数を取ると状態方程式は式(15), (16)で示される。

$$[a_1 a_2 a_3 \cdots a_N]_{t+1}^T = [a_1 a_2 a_3 \cdots a_N]_t^T + w_t \quad \dots \quad (15)$$

$$[b_1 b_2 b_3 \cdots b_N]_{t+1}^T = [b_1 b_2 b_3 \cdots b_N]_t^T + w'_t \quad \dots \quad (16)$$

観測量は、シールド位置の計画路線からの偏差であるから、式(13), (14)より観測方程式は式(17), (18)に示される。

$$x_t = a_1 \cdot x_{t-1} + a_2 \cdot x_{t-2} + \cdots + a_N \cdot x_{t-N} + v_t \quad \dots \quad (17)$$

$$y_t = b_1 \cdot y_{t-1} + b_2 \cdot y_{t-2} + \cdots + b_N \cdot y_{t-N} + v'_t \quad \dots \quad (18)$$

以上により、掘進距離 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 x_t, y_t に追尾しながら逐次求められるので、算出した AR 係数を用いて、式(17), (18)より、 $\hat{x}_{t+1/t}, \hat{y}_{t+1/t}$ を算出する。次に $\hat{x}_{t+1/t}, \hat{y}_{t+1/t}$ を観測データとして扱い、同様に式(17), (18)より、 $\hat{x}_{t+2/t+1}, \hat{y}_{t+2/t+1}$ を算出する。

以上により、順次将来点のシールド位置の計画路線か

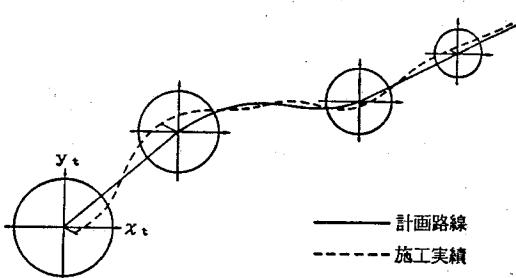


図-1 シールドトンネル線形模式図

らの偏差を予測することができる。

(3) 実測データへの適用

本研究では、カルマン・フィルターを適用した自己回帰モデルによるシールド位置の予測手法の妥当性および予測精度について検討を行うため、シールド工事の実測データを用いて検討を行うこととした。

本工事の内容は、 $\phi 2234\text{ mm}$ の手掘り式シールドで、一次覆工の仕上がり径は $\phi 1500\text{ mm}$ で、延長 583.34 m である。図-2に、シールド位置の実測データを水平方向と鉛直方向に分離して示す。これは、セグメントピッチに対応して、 900 mm 間隔で計測されたものである。

図-2に示した実測データを用いて、将来点の計画路線からの偏差を予測する。

カルマン・フィルターを用いた AR 係数の同定に必要な各初期条件は、以下のように設定した。

- | | |
|-------------------------|-----|
| ・状態量 (AR 係数) の推定誤差の分散 | 1.0 |
| ・観測量 (シールド位置の偏差) の雑音の分散 | 1.0 |
| ・状態量 (AR 係数) の初期値 | 0.0 |

ただし、これらの初期値は多くの数値解析を行った結果、その安定性より妥当な値と判断した。

予測計算では、AR 次数を水平方向で 5 次、鉛直方向で 6 次、また現在位置と予測位置の離れは、1, 3, 5 点と設定した。

掘進に伴って、現在位置および将来予測位置におけるシールド位置の偏差は変動するものであるが、その予測結果の状況を模式的に図-3に示した。予測状況図に示

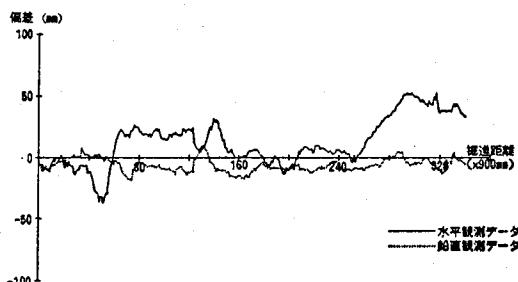


図-2 シールド位置偏差の実測データ

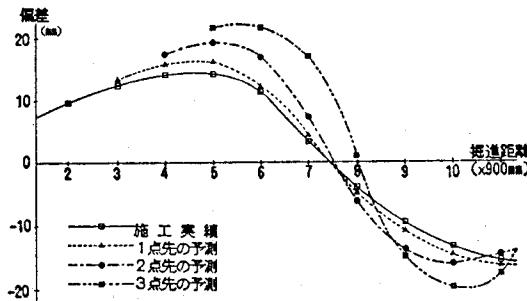


図-3 予測状況図

す 1, 3, 5 点先の予測結果とは、時々刻々と前進する現在位置に対して、1, 3, 5 点先にシールド機が進んだと仮定したときの将来予測位置の計画路線からの偏差を結んだものである。

以下に、予測計算の結果と状態量 (AR 係数) の収束状況を示す。

図-4～6 に、5 次の AR モデルを用いたシールド位置水平偏差の予測結果を示した。1 点先の予測は非常に良く安定した予測精度が得られている。3 点先の予測では、400 近い観測データに対して発散的な非定常の挙動を示すのは、わずかに、2 点しかなく実用上、ほとんど問題はないものと考えられる。5 点先の予測結果は、発散的傾向が増大し、予測精度がかなり低くなっているものと考えられることから、実用に供するには、何らかの平滑手法を使用する必要があると考えられる。

図-7 に AR 係数の同定結果を示した。何か所か激し

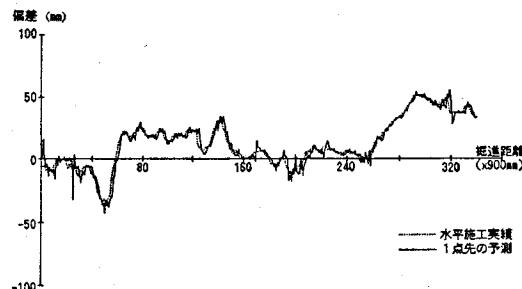


図-4 1点先の予測結果（5次）

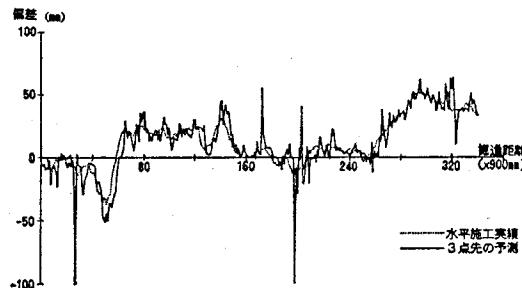


図-5 3点先の予測結果（5次）

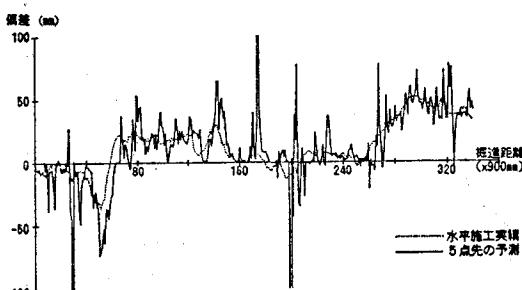


図-6 5点先の予測結果（5次）

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

く乱れているものの、その他については、定常であるべき AR 係数が誤差の影響を受けて乱れているものと考えられる。

図-8 に FPE の計算結果を示した。AR モデルの最適次数は 5 次であるが、4~7 次の AR モデルでは、FPE に大きな差異がないことから、この範囲の次数をあらかじめ選択しておけば、予測には支障がないものと考えられる。

図-9 に AR モデルの次数と残差平方和で表わされる予測精度の関係を示した。2, 3, 5 次の AR モデルは、次数にはあまり差がないが、予測結果と観測データの分散には明確に違いが現われている。

図-10~12 に、6 次の AR モデルを用いたシールド位置の鉛直方向偏差の予測結果を示した。この次数は FPE を最小にするときのもので（図-15 参照）、今回

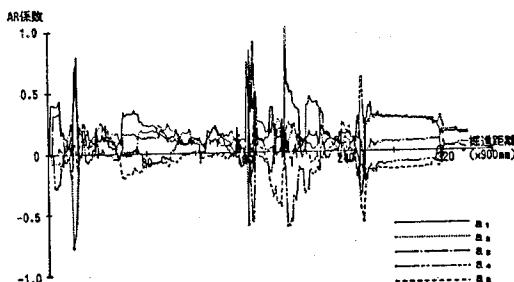


図-7 AR 係数の同定結果（5次）

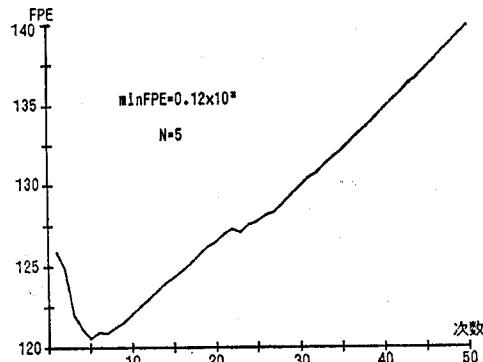


図-8 最終予測誤差(FPE)の計算結果

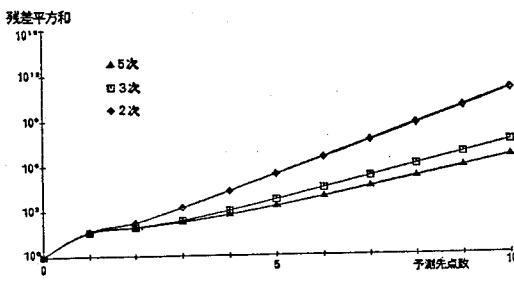


図-9 AR 次数と予測精度

使用するシールド位置の鉛直方向偏差の観測データについての最適次数となっている。1 点先の予測結果は、観測データの少ないときに不安定であるが、データ数が 10 点を超えると、非定常の発散的傾向を示すことなく、安定した精度の良いものとなっている。3 点先の予測結果は、非定常の発散的傾向がみられるようになり、予測結果の変動の幅も多少大きくなっているものの、実用に

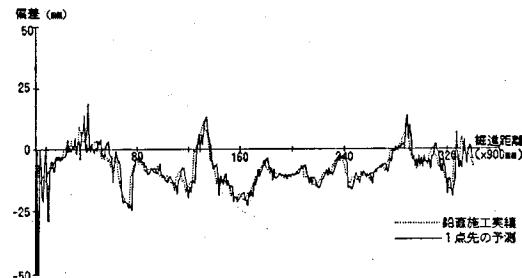


図-10 1点先の予測結果（6次）

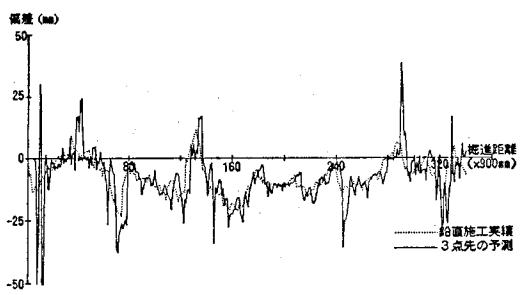


図-11 3点先の予測結果（6次）

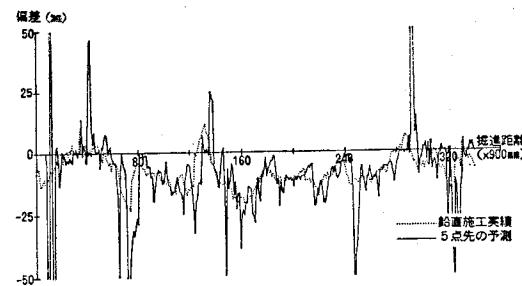


図-12 5点先の予測結果（6次）

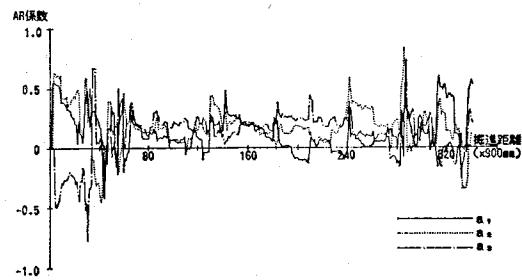


図-13 AR 係数の同定結果（6次）その1

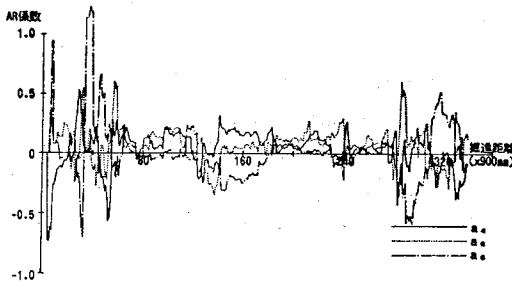


図-14 AR 係数の同定結果（6次）その2

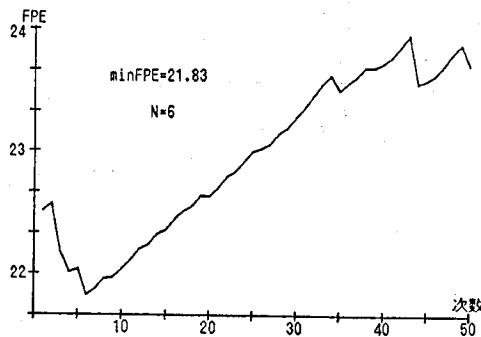


図-15 最終予測誤差（FPE）の計算結果

供することは可能であると考えられる。5点先の予測結果は、1, 3点前でのものに比較して、非定常の発散的傾向がみられるようになり、定量的判断を下すための資料とはならないが、定性的な傾向を把握することは可能であると考えられる。図-13, 14にAR係数の同定結果を示した。データの数がある程度(20点くらい)を超えると、全体的に係数値が小さく変動の幅も小さくなっている。予測結果と合わせてみると、AR係数の変動が急激な時点では、予測結果も乱れて非定常の発散的傾向を示していることから、この時点では観測した鉛直方向偏差の乱れが激しいものと考えられる。

図-15にFPEの計算結果を示した。ARモデルの最適次数は、6次であるが、4~9次のARモデルでは、FPEに大きな差がないことから、この範囲の次数をあらかじめ選択しておけば、シールド位置の偏差予測には支障はないものと考える。

図-16にARモデルの次数と残差平方和で表わされる予測精度の関係を示した。1点先の予測ではあまり差がないが、2点先の予測結果からは2次のARモデルが大きく精度が落ちていることがわかる。3次と5次のARモデルにはあまり違いがないようにみえるが、10点前での予測になると予測誤差の程度を示す分散は、オーダーが1桁違っている。しかし、実用上適用できると考えられる5点先までは、予測精度に大きな違いはないと考えられる。

以上に、各図についての考察を述べたが、これらを総括的にまとめておく。

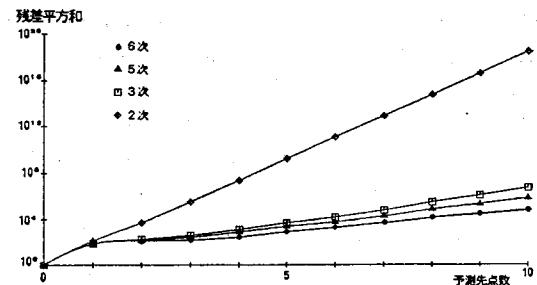


図-16 AR 次数と予測精度

今回、使用したシールド位置偏差の観測データは、1リング(900 mm)ごとに得られたものである。水平方向と鉛直方向の両方のFPEの計算結果より、1リングごとに観測データが得られるときは、5~7次のARモデルを設定しておけば、安定した予測結果が得られるものと考えられる。しかし、現在では、センサー、データロガーおよび小型コンピュータをオンラインで結び、2~10 cm間隔に観測データが得られるような計測システムが開発されていることから、短い間隔で得られる観測データに対して、適切なAR次数の設定について検討する必要がある。

シールド位置偏差の予測結果とAR係数の同定結果には、局所的に非定常の発散的傾向がみられたが、これは観測データの急激なばらつきに起因するもので、安定したデータの取込みが可能になれば、もっと安定した定常状態に近いARモデルになるものと考えられる。局所的に非定常の発散的傾向があり、全データに対して定常でないとしても、観測データをシーケンシャルに取り込みながら、カルマン・フィルターによりAR係数の同定結果を逐次修正していくため、区間的に定常状態であると仮定して、観測データを扱えば良いものと考えられる。

4. シールド位置の制御

(1) はじめに

シールド位置の予測には、システムの入力と出力のみの関係である自己回帰モデルを使用した。ところが、観測量をもとにシールド位置の制御を行うためには、シールドジャッキの操作状況とシールド位置偏差の物理的意味を考慮に入れた関係式の誘導が必要となる。

シールド位置の計画路線からの偏差をそのままジャッキ・ストローク、ジャッキ圧力、コピーカッター等の原因によるモーメントに結びつけることは不可能であるため、シールド位置の計画路線からの軌跡の方向偏差を横軸のスケールである掘進距離で微分した、軌跡の方向偏差の変化率を、観測データとして取り扱うこととする。

シールド位置の制御に必要な量はモーメントであるが、これは観測不可能であるため、以下に述べるように、このモーメントを可観測であるジャッキ稼働パター

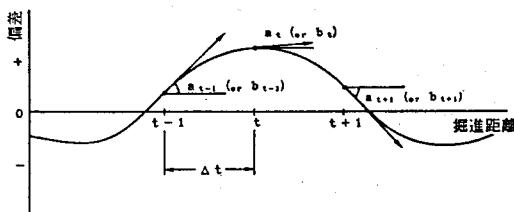


図-17 シールド位置の偏差変化状況

ンに線形に関連づけて制御量として取り扱うこととした。

(2) 位置制御の基本式

シールドの掘進に伴って、時々刻々と得られるシールド位置の計画路線からの偏差を、時系列データとしてとらえ、図-17に示す。

シールド位置の偏差を用いれば、シールド位置の軌跡の方向偏差は水平方向、鉛直方向に対して、それぞれ以下の式で与えられる。

$$a_t = \frac{x_t - x_{t-1}}{4t} \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

ここに, x_t : 水平方向のシールド位置の偏差, y_t : 鉛直方向のシールド位置の偏差, a_t : 水平方向のシールド位置の軌跡の方向偏差, b_t : 鉛直方向のシールド位置の軌跡の方向偏差, Δt : 捜進距離の計測間隔, t : 横軸のスケール (掘進距離), である.

シールド位置の軌跡の方向偏差の掘進距離に対する変化率が、シールドジャッキに作用させるモーメントに比例するものとしてベクトル量の関係を水平方向、鉛直方向に分離して示すと次のように書ける。

$$\begin{aligned}\beta_t &= \frac{b_t - b_{t-1}}{\Delta t} \\ &= \frac{y_t - 2y_{t-1} + y_{t-2}}{(\Delta t)^2} \\ &= K_t V_t\end{aligned}\quad (22)$$

ここに、 α_t : 水平方向のシールド位置の軌跡の方向偏差変化率、 β_t : 鉛直方向のシールド位置の軌跡の方向偏差変化率、 V_{x_t} : 水平方向のモーメント、 V_{y_t} : 鉛直方向のモーメント、 K_x : 方向の偏差変化率とモーメントの水平方向変換係数、 K_y : 方向の偏差変化率とモーメントの鉛直方向変換係数、である。

次に、ジャッキ稼働パターンを物理量に変換し、モーメントとの関係を考える。ただし、ジャッキ稼働パターンをモーメントに変換するには、シールド機の図心まわ

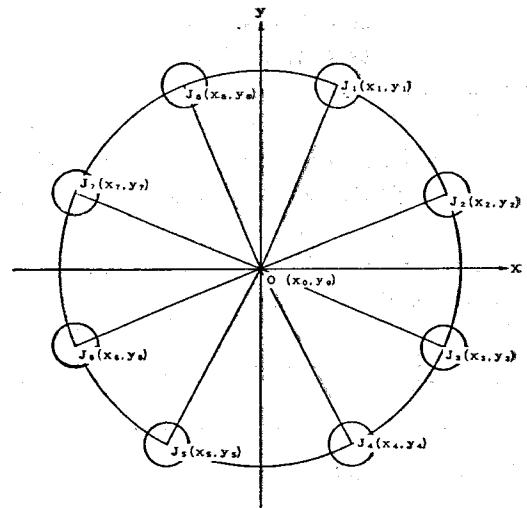


図-18 シールドジャッキ稼働パターン図

りにモーメントを考える必要がある。詳細図を 図-18 に示す。

図心Oに対する任意のジャッキ稼働パターンによるモーメントは、式(23)、(24)で表現される。

ここに, m : ジャッキ総数, n : ジャッキ稼働数, \bigcirc
 (x_0, y_0) : 図心, P : 全推力, $J_i(x_i, y_i)$: ジャッキ作用
 点, S_i : ジャッキ稼働の有無を表わし, 有のとき 1, 無
 のとき 0 とする.

以上より、シールド位置の軌跡の方向偏差変化率を、油圧およびジャッキ稼働パターンの可観測である物理量に関連させると、式(21)～(24)から、式(25)、(26)で表現される。

(3) カルマン・フィルタの実現化

線形の回帰式に対して最適の回帰係数を求めるために、従来、バッチ処理による最小2乗法が用いられてきたが、データの処理方法等、即時性の必要なオンライン処理には適さないものであった。

しかし、現在ではカルマン・フィルターを利用して観測データのシーケンシャル処理を行い、その最適推定値を逐次改良できることが明らかにされ、前述の問題点が克服されつつある。

そこで、本問題についてもカルマン・フィルターによる回帰分析により、シールド位置の軌跡の方向偏差変化率から、制御量の変換係数を推定する。

$$\begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \\ (t+s)^3 & (t+s)^2 & (t+s) & 1 \\ 3t^2 & 2t & 1 & 0 \\ -3(t+s)^2 & 2(t+s) & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_t \\ y_{t+s} \\ b_t \\ b_{t+s} \end{bmatrix} \quad \dots \quad (43)$$

式(42), (43)の両式を解くことにより、修正軌道の係數 $[c_1 c_2 c_3 c_4]^T$, $[d_1 d_2 d_3 d_4]^T$ を求めることができる。そこで、求めた係數を用いると、修正用軌道の線形は、次式で表現される。

$$x_t = c_1 \cdot t^3 + c_2 \cdot t^2 + c_3 \cdot t + c_4 \quad \dots \quad (44)$$

$$y_t = d_1 \cdot t^3 + d_2 \cdot t^2 + d_3 \cdot t + d_4 \quad \dots \quad (45)$$

式(44), (45)より、修正用軌道の通過点の座標を用いて、目標到達点までの距離と座標を細かく設定することで、無理のないシールドトンネルの線形を確保することが可能と考えられる。

そこで、図-2に示したシールド位置偏差の実測データ（水平・鉛直）を用いて、2回ずつ制御のシミュレーションを実行し、その結果を図-19, 図-20に示す。

以上の結果より、水平方向・鉛直方向ともに修正用軌道は、滑らかに目標到達点に達しており、制御手法としては非常に優れたものと考えられる。ただし、修正用軌道は比較的に偏差が大きい場合に使用すべきもので、通常の掘進時には何点か先で偏差をなくすように設定しておけば良いと考えられる。

今後、実施工において多くの制御を行って、データの蓄積とともに、本手法の評価・改良を進めていく必要がある。

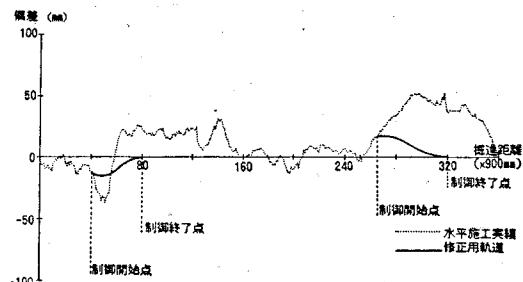


図-19 制御のシミュレーション結果（水平方向）

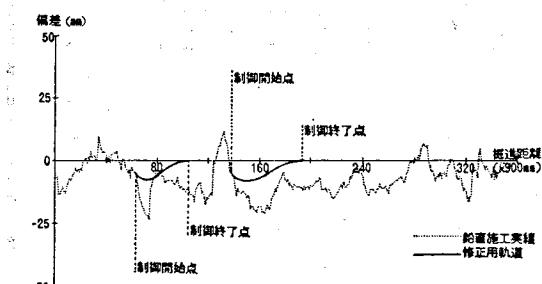


図-20 制御のシミュレーション結果（鉛直方向）

5. おわりに

本研究は、カルマン・フィルター理論を効率良く用いることで、シールド位置の予測と制御を可能としたものである。

予測手法は、時系列データの統計処理に使用するARモデルをカルマン・フィルターに組み込み、制御手法はバッチデータの統計処理に使用する回帰式をカルマン・フィルターに組み込んで、予測結果に基づく制御手法を開発した。この手法によれば、リアルタイムに計測可能となったシールド位置から、将来点の位置を精度良く予測することができる。また通常の掘進状況での誘導だけでなく、予測結果に基づいて目標到達点までの修正用軌道を設定し、これに要する最適ジャッキ稼働パターンの選択により誘導できることが確認された。

シールド位置の制御は、ジャッキ稼働パターンの選択で行ったが、同一の地盤条件下で、まったく同じジャッキ稼働パターンを用いて掘進しても、シールド位置の進行状況は必ずしも一定でない。また、本報告に使用したデータで検討すると、ジャッキ稼働パターンによるモーメントとシールド位置の変化量は、全体的にはあまり相関が良くないが、モーメントが小さいときには、良い相関を見せることがわかった。したがって、方向制御には急激なジャッキ稼働パターンの変更をしないで、徐々に変化させた方が効果的であると思われる。

今後、実測データへの適用を増やし、モーメントとシールド位置の関係、および曲線部での施工時の挙動等、未解明な点を検討していく予定である。

参考文献

- 野上正廉・茶谷恭男：“全自動化泥水加圧式シールド”と礫地盤における施工実績、最近のシールド工事における小型コンピュータの現場活用事例、日本プロジェクトリサーチ、59.11.6.
- 西野憲明：シールド・TBM機のレーザーによる全自动曲線誘導システム、最新の施工技術・2、(社)土木学会・土木施工研究委員会、61.9.
- 川瀬泰裕：シールド施工管理の自動化、最新の施工技術・2、(社)土木学会・土木施工研究委員会、61.9.
- 田中博三・園田徹士：シールドトンネルにおける掘進制御、土木学会論文報告集、第349号/VI-1, pp. 44~52, 1984.9.
- Kalman, R.E. : A new approach to linear filtering and prediction problems, Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol. 82, pp. 35~45, 1960.
- Kalman, R.E. and Bucy, R.S. : New result in linear filtering and prediction theory, Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol. 83, pp. 95~108, 1961.
- Hoshiya, M. and Saito, E. : Structural Identification by Extended Kalman Filter, The Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 110, No. 12, pp. 1757~1770, Dec., 1984.
- Hoshiya, M. and Saito, E. : Linearized Liquefaction Process by Kalman Filter, The Journal of Geotechnical

- Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 2, pp. 155~169, Feb., 1986.
- 9) たとえば、得丸英勝・添田喬・中溝高好・秋月影雄：計数・測定=ランダムデータ処理の理論と応用、培風館、1982.
- 10) 片山徹：応用カルマンフィルタ、朝倉書店、1983.
- 11) Jazwinski, A.H.: Stochastic Processes and Filtering Theory, Academic Press, 1970.
- 12) 赤池弘次・中川東一郎：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、1972.
- 13) Akaike, H.: Statistical predictor identification, Ann. Inst. Statist. Math., Vol. 22, pp. 203~217, 1970.

(1986.12.18・受付)

●コンクリート・ライブラリー案内●

54 鉄筋コンクリート構造物の設計例

3 000 円 会員特価 2 700 円 (円 300)

55 鉄筋継手指針(その2)

2 200 円 会員特価 2 000 円 (円 300)

56 人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル

2 200 円 会員特価 2 000 円 (円 300)

57 コンクリートのポンプ施工指針(案)

4 200 円 会員特価 3 700 円 (円 350)

58 エポキシ樹脂塗装 鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(案)

4 000 円 会員特価 3 500 円 (円 350) 一部カラー

59 連続ミキサによる現場練りコンクリート施工指針(案)

2 200 円 会員特価 2 000 円 (円 300)

60 アンダーソン工法—設計・施工の研究

1 300 円 会員特価 1 100 円 (円 300)

61 コンクリート標準示方書(昭和61年制定)改訂資料

4 500 円 会員特価 4 000 円 (円 350)

申込先 〒160 東京都新宿区四谷1丁目無番地 土木学会 電話03-355-3441(代) 振替 東京6-16828