III-432 拡張カルマンフィルタを用いた圧密沈下予測について

武蔵工業大学 正 員 星谷 勝
東急建設(株) 正 員 酒井 邦登
武蔵工業大学 学生員 ○伊藤 新二

1．はじめに

圧密問題に関する研究は、過去数十年にも亘って行われてきたが、様々な問題点があり現在も研究が続けられている。長期間に亘る地盤沈下の推移と最終沈下量の予測として、現在は二つのランクの数学モデルが用いられている。一つは、設計段階で理論と土質調査の結果から得られたソイルパラメータを用いて、地盤と構造物の挙動を予測するAランクモデルである。もう一つは、施工段階で地盤の変状の観測結果を利用し将来予測を行うBランクモデルである[1]。Bランクモデルは、盛土の安全制御に関して重要な役割を持っているが、様々な不確実さがあり、観測と一致しない解が多分に見受けられるのが現状である。

本論文では、その不確実さを克服するため、カルマンフィルタ理論を用いて圧密沈下の予測式を観測データを基に修正し、次段階盛土施工時の沈下量、或いは、長期的な将来予測を行う。即ち、Bランクモデルに基づいた解析を行い、その結果を次段階施工にフィードバックして情報化施工システムの一助を成すことが目的である。

2．圧密沈下予測への定式化

現在、圧密沈下予測手法として、主に４つのBランクモデル[2]が知られている。それらは、回帰直線から最終沈下量を求める浅岡の提案している方法、修正双曲線法から得られる双曲線法と星埜法、それとバロンの提案した圧密度の近似式を用いる門田法である。これらの手法を拡張カルマンフィルタに適用するため、線形確率システムに表現する。まず、線形確率システムの基本式である状態方程式と観測方程式を示す。

$$x_{t+1} = F_t \cdot x_t \qquad (1)$$

$$Y_{t+1} = h_t(x_t) + v_t \qquad (2)$$

上述の４つのモデルの場合、状態量はすべて定常であるから、状態遷移行列F_tは単位行列となる。浅岡法は線形モデルであるが、他の３モデルは非線形であるため、全モデルを各状態量の回りに線形化し、拡張カルマンフィルタの重み付きグローバルな繰り返し法（EK−WGI法）[3]に組み込んだ。以下には４つのモデルの観測方程式と状態量を示す。

（a）浅岡法 観測方程式
$$Y_t = \alpha + \beta \cdot Y_{t-1} + v_t \qquad (3)$$
状態量
$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \qquad (4)$$

（b）双曲線法 観測方程式
$$Y_t = Y_0 + t/(\alpha + \beta \cdot t) + v_t \qquad (5)$$
状態量
$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_0 \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \qquad (6)$$

（c）星埜法 観測方程式
$$Y_t = Y_0 + \sqrt{t}/\sqrt{(\alpha + \beta \cdot t)} + v_t \qquad (7)$$
状態量
$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_0 \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \qquad (8)$$

（d）門田法 観測方程式
$$Y_t = Y_f\left[1 - EXP(-\alpha \cdot t)\right] + v_t \qquad (9)$$
状態量
$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_f \\ \alpha \end{bmatrix} \qquad (10)$$

３．数値例

２節で示した４つのモデルの状態方程式と観測方程式を、拡張カルマンフィルタアルゴリズムに組み込んで、何日かの観測データからパラメータ同定を行い、圧密沈下量の将来予測を行う。観測データは、観測ピッチを一日とし、1000日で５ｍの沈下を各モデルに想定し、シミュレーションで得られた値を実測データとみなした。検討ケースは、観測データの沈下量に、最大沈下量５ｍの１％、２％ノイズを付加させた場合と付加しない場合の３ケースとし、ノイズ付加データに関しては各10本の沈下曲線を検討した。ここに、１％、２％ノイズとは、－１～１の一様乱数を発生させて１％、２％に乗じたものである。解析に用いた観測雑音 v_t の分散は1.0、重みは10^2、状態量（推定値）の初期値は10^{-3}～10^2 の範囲から収束の状況が良くなるよう決定した。その結果、５～10回の繰返し計算を行えば、十分安定した推定値が得られることが判明した。表-1、2のノイズ付加データによる沈下量の予測平均誤差は、現時刻から200 日先の将来予測を行った際の、沈下量推定値と観測データとの差の絶対値を観測データで除し、10本の平均を示した。この結果に示す通り、観測日数を経て、次段階の予測ではさらに良い精度での解析が可能である。初期の沈下においては、沈下量よりも付加させたノイズの方が大きくなり、200 日程の観測データでは、推定結果が思わしくない。現実には、沈下量よりも観測ノイズが大きいことは考えられないため、今後、実測データによる検証を行う必要がある。しかしながら、観測日数400 を過ぎると、双曲線法、星埜法、門田法においては、かなりの精度で予測が可能であることが判明する。浅岡法は、一次の回帰式であり、一つ前の観測データを基に沈下量を計算するモデルであるため、長期的予測を行うことは困難である。しかし、前後の関係のみの簡単なモデルでパラメータの推定が容易であり、近い将来の予測を行っても、数％の誤差に収まるところから、浅岡モデルは、情報化施工の真意である短期的予測においては十分な効力が期待される。また、繰り返し計算をしなくても精度に変わりはないため、データの蓄積を必要とせず、小規模容量の計算機においても解析が可能である。

表－１　１％ノイズ付加データによる沈下量予測平均誤差（%）

	400日	600日	800日	1000日
浅岡法	6.218	2.729	2.011	1.835
双曲線法	0.235	0.108	0.064	0.056
星埜法	0.645	0.233	0.116	0.059
門田法	*5.876	0.262	0.116	0.093

＊　収束判定不可能

表－２　２％ノイズ付加データによる沈下量予測平均誤差（%）

	400日	600日	800日	1000日
浅岡法	17.495	8.648	6.641	5.499
双曲線法	0.664	0.161	0.116	0.063
星埜法	0.884	0.300	0.144	0.097
門田法	*6.871	0.318	0.195	0.136

＊　収束判定不可能

４．おわりに

ＥＫ－ＷＧＩ法による解析の結果から、この手法の圧密沈下予測への有効性が認められた。本研究は、情報化施工システムにおいて、合理的な判断を下すための一手法であり、Ｂランクの圧密沈下予測モデルを独立して検討したものである。往々にして見受けられる、Ａランクモデルでの当初予測計算と実測値との差異をもたらす不確定性の強い原因系のデータについては述べることはできないため、数多くのデータを収集して、盛土高や、様々なソイルパラメータを圧密沈下予測式と関係づける必要がある。

[参考文献]

1)A.Murakami & T.Hasegawa:Observational Prediction of Settlement Using Kalman Filter theory,5th. I.C.M.N.G,1-5,1985,2)吉国・井上・住岡・原：現場計測法による圧密沈下予測法の特性について，土と基礎，29-8,1981,3)酒井：情報化施工における逆解析問題とカルマン・フィルター,東急建設技術発表論文集,土木編,NO.11,1985