

拡張カルマンフィルタによる泥炭性軟弱地盤の圧密沈下予測

星谷 勝*・板橋勝一郎**・伊藤俊裕***・
須藤敦史****

軟弱地盤における圧密沈下現象は複雑な挙動を示し、圧密理論による予測値と実際の沈下量が一致しない場合が多い。特に泥炭性軟弱地盤では圧密沈下量が大きく、盛土の施工過程や地下水位の変動等の非定常な荷重の影響を受けた圧密沈下挙動を示している。そこで本研究では、泥炭性軟弱地盤の圧密沈下挙動に対して区間定常性を仮定し、沈下観測記録を基に拡張カルマンフィルタと浅岡モデルを用いて、泥炭性軟弱地盤の沈下挙動をシミュレートし同時に圧密沈下量の予測を行っている。

Keywords : extended kalman filter, peaty soft deposits, consolidation, non-stationary process, parameter identification, prediction

1. 目 的

軟弱地盤の圧密沈下予測手法はいくつかの予測式が提案されているが、現実の軟弱地盤の沈下挙動は複雑な現象であり種々の問題が残されている。その中で地盤の理論予測と実際の沈下現象が一致しない問題として二次圧密沈下現象が揚げられ、特に泥炭性軟弱地盤の沈下挙動予測は室内試験の結果から予測が難しいと言われている。

一般に、泥炭性軟弱地盤における特徴は標準圧密試験等による圧密係数の推定が難しく、沈下挙動において二次圧密沈下量が大きいことが知られている。これは圧密沈下中の泥炭部分の変形や透水係数の変化が顕著であり、また標準圧密試験の結果から沈下量の予測を行うと予測誤差が生じる¹⁾。

泥炭性軟弱地盤はその大部分が北海道に分布しており、特に石狩川、釧路川および天塩川の下流部に広く分布している。この中で石狩川とその支流に囲まれた石狩泥炭地は札幌市北部に広く分布し、札幌市の拡大に伴い地盤の二次圧密沈下挙動が種々の土木構造物に対し影響を与えており工事施工中の施工管理や最終沈下量の予測手法の確立が望まれている。

本論文は、札幌市近郊の宅地造成工事における観測値をもとにその施工過程や地下水位の変化による泥炭性軟弱地盤の沈下挙動を拡張カルマンフィルタによりシミュレートし、同時にその圧密沈下量の予測を行うものであり、今後の泥炭性軟弱地盤での盛土工事の施工管理手法の向上を目的としたものである。

軟弱地盤における圧密沈下挙動の観測的予測手法は星

埜²⁾、門田³⁾、浅岡⁴⁾および浅岡・松尾⁵⁾により提案されているが、ここではその表現が自己回帰モデルである浅岡の手法を用いている。この浅岡の手法を用いカルマンフィルタによる軟弱地盤の圧密沈下量の予測は、村上・長谷川⁶⁾が行っている。また、能登⁷⁾は \sqrt{t} 双曲線法により泥炭性軟弱地盤の沈下予測を行っている。一方、藤井・島田^{8),9)}は、干拓地のサンドドレーンによる地盤改良に伴う軟弱地盤の沈下挙動予測を有限要素法により行っている。

しかし今回対象としている泥炭性軟弱地盤において、その沈下挙動は施工過程、地下水位の変動や降雪による非定常な荷重の影響を受ける挙動を示していると考えられる。しかし、従来の拡張カルマンフィルタによる軟弱地盤の沈下予測手法では、定常な荷重として沈下挙動の予測を行っており、このような非定常な荷重下における泥炭性軟弱地盤の沈下現象は、観測期間の荷重条件が異なるため予測しきれないことが生じる。

そこで本研究では、このような非定常な荷重状態における泥炭性軟弱地盤の沈下挙動を緩やかに進行する現象として区間定常性を導入して区間ごとに拡張カルマンフィルタの逐次処理により沈下挙動をシミュレートし、同時に沈下量の予測を行っている。また拡張カルマンフィルタの特徴は、状態量と観測量の関係が何らかの関係式で表現されていれば特別な定式化を必要とせず、複雑な関係式で構成された場合でも拡張カルマンフィルタのアルゴリズムに適用が可能である¹⁰⁾。そこで、将来は有限要素法を拡張カルマンフィルタと組み合わせ解析対象の軟弱地盤を二次元・三次元的に離散化し、その沈下挙動予測を詳細に行うことが可能になる。

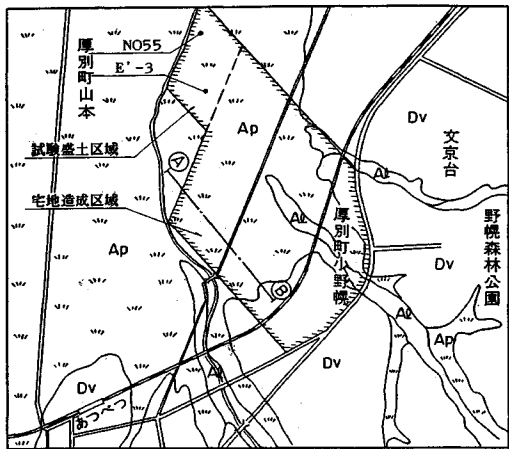
本論文では、泥炭性軟弱地盤の盛土工事において施工管理手法に適用することを考え、拡張カルマンフィルタにより沈下挙動を把握し、同時に的確に沈下量を予測することを目的として、次の基本事項の検討を行っている。

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

** (株)三菱地所 札幌支店

*** (株)地崎工業 北海道本店

**** 正会員 (株)地崎工業 技術開発室



(時代)	(記号)	(地質)
沖積世	Ap	泥炭
	Al	泥濘原堆積物(粘土, 砂)
洪積世	Dv	火山灰

図-1 表層地質図

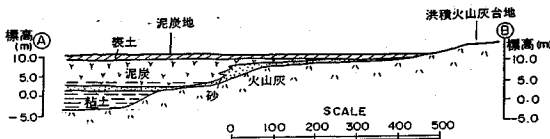


図-2 地質断面図

表-1 泥炭の工学的性状

項目	調査区域	今回観測区域	石狩泥炭
自然含水比 W_n (%)	300~900	115~1290	115~1290
比重 G_s	1.5~2.0	1.13~2.10	1.13~2.10
単位体積重量 γ_s (tf/m ³)	0.85~1.05	0.82~1.14	0.82~1.14
強熱減量 Lig (%)	45~90	30~98	30~98
間隙比 e	5~15	5~19	5~19
粘着力 C (tf/m ²)	0.4~1.0	0.5~3.0	0.5~3.0
体積圧縮係数 m (cm ² /kgf)	1.1×10^{-6}	—	—
強度増加率 m	0.5	0.5~1.0	0.5~1.0

図-1, 2 に示す。図より造成地域の地質構造は、北西に厚く泥炭層が堆積する単斜構造を示している。

また、泥炭性軟弱地盤の施工管理と圧密沈下特性を把握する2つの目的で、層別沈下計、地下水位計、間隙水圧計などを設置し長期観測を行っている。沈下観測は施工区域全般で実施しているが今回解析に用いた値は、図-1 に示した試験盛土区域内の観測点 E'-3 と観測点 NO 55 を用いている。

次に、標準的な石狩泥炭層と室内試験より得られた施工区域内の泥炭層の工学的性状を表-1 に示す。

表-1 より造成区域内の泥炭層は標準的な石狩泥炭層とほぼ同じ性状を示しているが、粘着力 C (0.4~1.0 tf/cm²) と強度増加率 m (0.5) が標準的な値より小さいのが特徴である。

3. 拡張カルマンフィルタによる定式化

拡張カルマンフィルタは、非線形連続型状態方程式と非線形離散型観測方程式を基本式として構成したものである¹¹⁾。

$$dXt/dt=f(Xt, t)+Gwt \dots \dots \dots (1)$$

$$Yt_k=h(Xt_k, t_k)+vt_k \dots \dots \dots (2)$$

Xt, Xt_k : 連続型, 離散型状態ベクトル

Yt_k : 観測ベクトル

wt : システム雑音ベクトル

vt_k : 観測雑音ベクトル

Gt : 変換行列

この基本式に対するアルゴリズムは、式 (1), (2) を推定状態ベクトル近傍で線形化し漸化的な最適状態ベクトルの推定アルゴリズムを構成したものである。

式 (1) は状態ベクトルの時間的遷移, 式 (2) は状態ベクトルと観測ベクトルの関係を示している。また雑音ベクトルは、正規性のホワイトノイズである。

$$E[wt_k]=0, E[wt_k wt_s^T]=Qt_k \delta t_{ks} \dots \dots \dots (3)$$

$$E[vt_k]=0, E[vt_k vt_s^T]=Rt_k \delta t_{ks} \dots \dots \dots (4)$$

δt_{ks} : クロネッカデルタ

Qt_k, Rt_k : システムおよび観測雑音の共分散マトリクス

(以下、本節の記号は APPENDIX I を参照)

一方、浅岡モデルは三笠の方程式を基本式とし式 (5) のようになる⁴⁾。

(1) 拡張カルマンフィルタに浅岡モデル (AR モデル) を組み込み、将来は有限要素法モデル等に拡張できるように定式化を行っている。

(2) 泥炭性軟弱地盤の沈下挙動を施工過程に伴う地下水位の変動などの非定常な荷重を考慮してモデル化を行っている。そして、実際の観測値を用いて拡張カルマンフィルタにより沈下挙動のシミュレートを行っている。

(3) 拡張カルマンフィルタにより同定された浅岡モデルの係数より泥炭性軟弱地盤の圧密沈下量を予測し、同時に泥炭性軟弱地盤の盛土工事における本手法の施工管理への適用性を検討している。

2. 泥炭性軟弱地盤の性質と観測位置

本造成工事は、札幌市の人口増加に伴い市街地の北東部に計画したものである。造成地区はほぼ全域にわたって泥炭性軟弱地盤が分布している。

そのため泥炭層の沈下挙動の予測とその圧密特性の把握が重要な課題となった。したがって事前に泥炭層の室内圧密試験を行ったが、前記したように実際の圧密沈下挙動は室内試験より予測した値と異なるため宅地造成区域内に試験盛土を実施し沈下観測を行った。

宅地造成区域の表層地質図・断面図と宅地造成位置を

$$\rho_k = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \rho_{k-i} \dots\dots\dots (5)$$

ρ_k : 時刻 $k=k\Delta t$ の沈下量
 β_i : 未知パラメータ

ここで、状態方程式は未知パラメータを要素とする状態ベクトルとなり時間的に遷移しないと仮定し、状態遷移マトリクス $F[]$ は単位マトリクス I として状態方程式 (1) を離散表示すると式 (6) のようになる。

$$\hat{X}(t_{k+1}|t_k) = I\hat{X}(t_k|t_k) + wt_k \dots\dots\dots (6)$$

これを未知パラメータの要素で表すと式 (7) のようになる。

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}_{t_{k+1}} = I \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}_{t_k} + \begin{bmatrix} w_0 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}_{t_k} \dots\dots\dots (7)$$

観測方程式は沈下量を観測値とし線形方程式とすると式 (8) のように示される。

$$Yt_k = Ht_k \hat{X}t_k + vt_k \dots\dots\dots (8)$$

$$Ht_k = [1, \rho_{k-1}, \rho_{k-2}, \dots, \rho_{k-n}]$$

観測方程式を要素で表すと式 (9) のようになる。

$$Yt_k = [1, \rho_{k-1}, \dots, \rho_{k-n}] \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}_{t_k} + \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}_{t_k} \dots\dots\dots (9)$$

式 (6), (8) を基本式とし拡張カルマンフィルタのアルゴリズムにより未知パラメータが逐次に推定される^{6), 12)}。

拡張カルマンフィルタ中の変換行列は、式 (8) を各状態ベクトルで偏微分して得られ、拡張カルマンフィルタのアルゴリズム中の変換行列 $M\{t_k; \hat{X}(t_k|t_{k-1})\}$ は式 (10) のように表される。

$$M\{t_k; \hat{X}(t_k|t_{k-1})\} = \left[\frac{\partial hi(Xt_k, t_k)}{\partial x_j} \right] Xt_k = \hat{X}(t_k|t_{k-1}) \dots\dots\dots (10)$$

$hi(Xt_k, t_k)$: $h(Xt_k, t_k)$ の要素
 x_j : Xt または Xt_k の要素

ここで、式 (10) に示されるように変換行列は各未知パラメータで偏微分することにより求められる。そこで、この変換行列を影響係数法により近似的に算出する¹³⁾。

影響係数法は、状態ベクトルを順次微量変化させ有限要素法の順解析より求められ式 (11) のように表される。

$$\frac{\partial hi(Xt_k)}{\partial x_j} = \frac{hi(Xt_k + \Delta x_j e_j) - hi(Xt_k)}{\Delta x_j} \dots\dots\dots (11)$$

$hi(Xt_k)$: $h(X)$ の i 番目の観測点
 Δx_j : x_j の微小増分
 e_j : j 番目の要素 $e_j = [0, 0, 1, 0]^T$

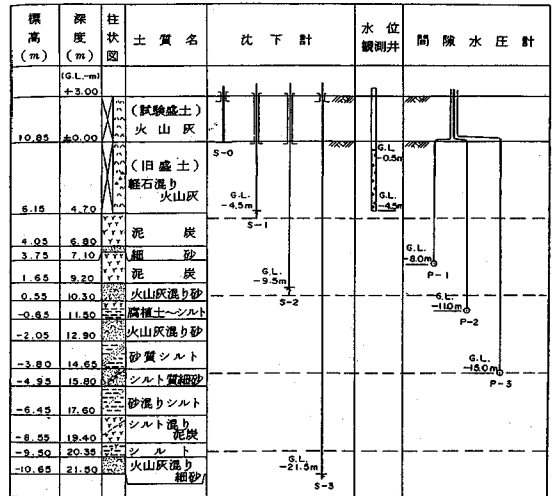


図-3 計測器設置図 (E'-3)

(j 番目の要素が 1, 他の要素は 0)

これにより、拡張カルマンフィルタのアルゴリズム中の変換行列が直接微分を行うことなく近似的に求められる。将来、有限要素法に適用する場合でも、このように影響係数法を用いれば、未知パラメータ同様に拡張カルマンフィルタを用いる解析が可能である。

4. 観測値の補間と沈下挙動のモデル化

浅岡モデルは、等間隔の沈下観測値にもとづいて各パラメータを同定し沈下挙動のシミュレートや予測を行う。しかし実際の観測値は施工過程における種々の要因により観測値の欠測や測定間隔のばらつきが生じる。そこで観測値が少ない場合には、観測値の補間が行われる。補間方法としては使用モデルによる補間と数学モデルによる補間が揚げられる。

使用モデルによる補間は村上ら¹⁴⁾が行っており、時刻 t_{k+1} において観測値が得られない場合カルマンフィルタにより推定された時刻 t_k における係数を用い時刻 t_{k+1} の推定観測値を算出し実観測値として用いている。

今回の推定に用いる観測データはその欠測率が大きく事前の解析で未知パラメータ推定に誤差が生じたので観測値の補間は数学モデルにあたる三次スプライン関数を用いている¹⁵⁾。スプライン関数は一般の多項式に比べ項数による影響が少なく、各節点において連続性が保証された区間多項式であり三次スプライン関数を式 (12) に示す。

$$S(x) = f(x_i) + \sum_{j=1}^3 C_{ij}(x-x_i)^j \dots\dots\dots (12)$$

$x_i \leq x \leq x_{i+1}$ ($i=1, 2, \dots, n-1$)
 (x_i, y_i) : 計測データの座標
 $(y_i = f(x_i))$

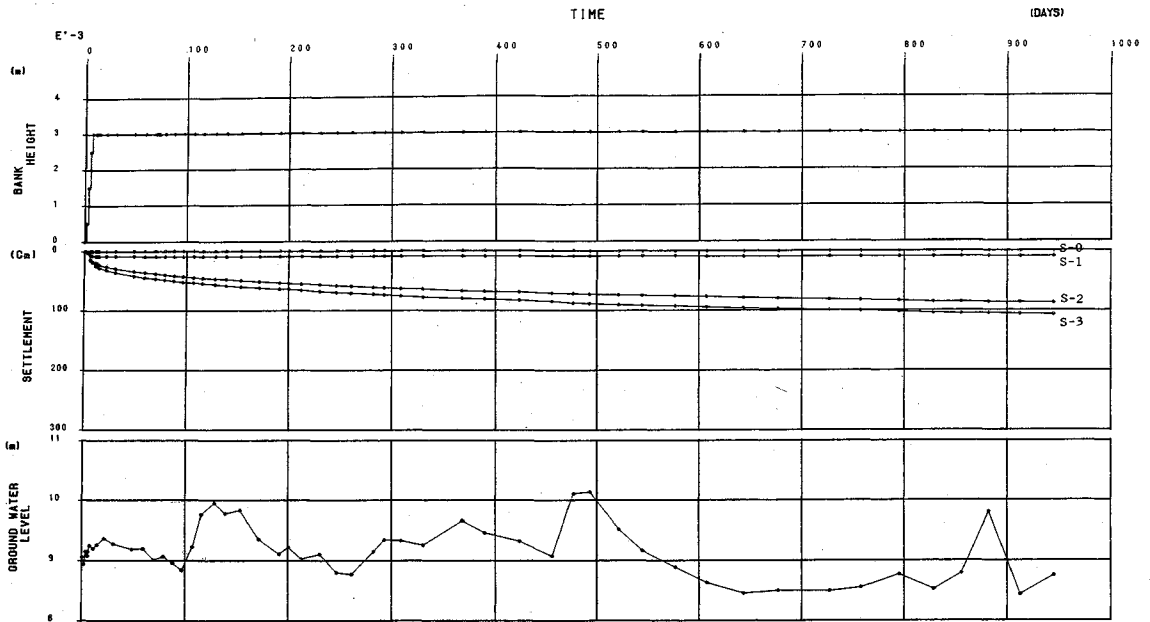


図-4 沈下観測記録 (E'-3)

表-2 変位勾配と地下水位 (E'-3)

期 間	変位勾配(cm/day)	地下水位
100日~200日	0.117	上昇期
200日~330日	0.109	下降期
330日~510日	0.072	上昇期
510日~810日	0.043	下降期
810日~845日	0.025	上昇期

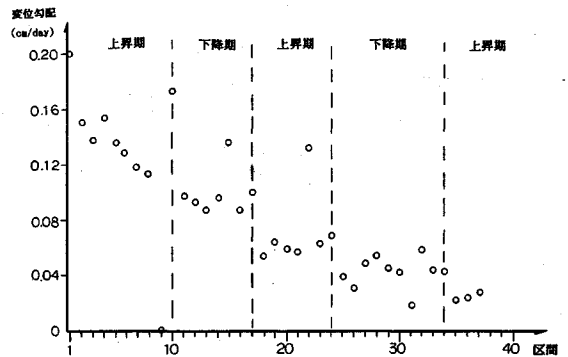


図-5 変位勾配と地下水位 (E'-3)

次に観測点 E'-3 の観測計器設置状況を図-3 に示し、実際に試験盛土により観測された E'-3 の沈下量と同時に観測した地下水位の結果を図-4 に示す。

図-4 に示したように泥炭性軟弱地盤では地表面沈下量に相当する S-3 の二次圧密沈下挙動が長く生じている。

また、S-3 において 100 日以降の沈下測定間隔を区間とし、1 日当たりの圧密沈下量の変位勾配を算定すると表-2、図-5 に示すようになる (本論文では地下水位の年平均水位を基準とし、上昇および下降としている)。

図-5 に示すように圧密沈下量の勾配は地下水位の上昇および下降とともに、ほぼ一定変位勾配を示しながら減少している。このことは泥炭性軟弱地盤の沈下挙動は、地下水位の変動による非定常な荷重の影響を受けながら圧密沈下していると考えられる。

また、多くの圧密沈下の挙動予測解析では荷重等が定常であるという仮定のもとに解析されている。この定常

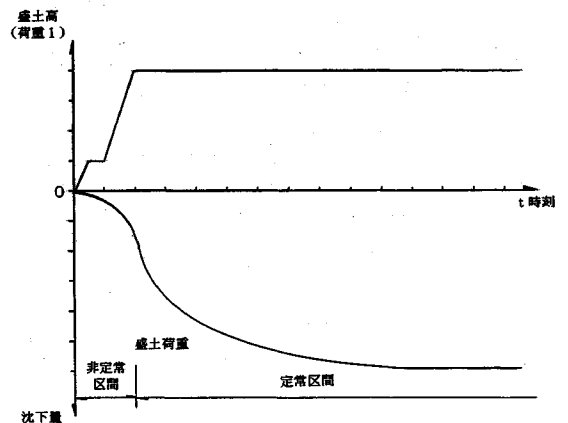


図-6 沈下曲線 (定常)

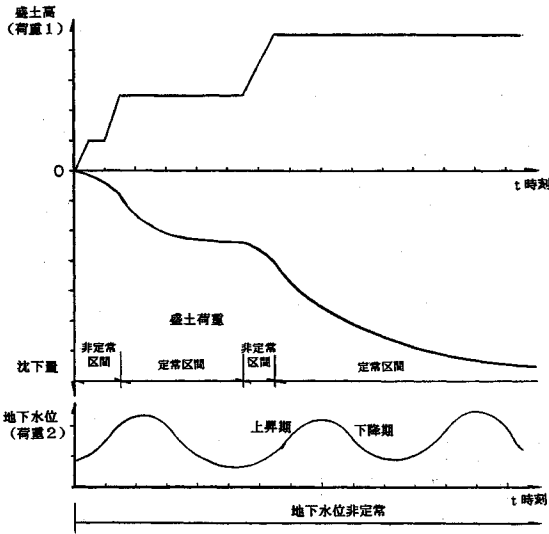


図-7 沈下曲線 (非正常)

な荷重による圧密沈下挙動を図-6に示す。

図-6に示すように盛土施工時には軟弱地盤に加わる荷重が時刻により増加する非正常な過程と考えられるが盛土施工後は定常な過程となる。また、一般の軟弱地盤では地下水位変動による荷重変化による沈下挙動に対する影響は微小である。したがって、沈下量予測の多くは定常な荷重を仮定し解析が行われる。

しかし泥炭性軟弱地盤の圧密沈下挙動は繊維質の個体部分の変形や透水係数の変化が無視できず、地下水位の変動による非正常な荷重変化の影響を受ける圧密沈下挙動を示す。このような非正常な荷重下における沈下挙動のモデル化を行うと図-7に示すようになる。

図-7に示すように盛土による泥炭性軟弱地盤に加わる荷重は施工終了とともに定常になる。しかし地下水位は季節により変動し泥炭層に非正常な影響を与える。ここで盛土施工中の沈下挙動は盛土による荷重が大きいいため盛土荷重に依存し、盛土終了後は沈下挙動が二次圧密現象に近づくにつれ地下水位の変動による非正常な荷重の微小増減の影響を受けた挙動を示す。したがって、泥炭性軟弱地盤の沈下挙動をシミュレートし予測するためには、盛土施工や地下水位の変動による荷重の非正常性を考慮した解析が必要となる。

前節の拡張カルマンフィルタの定式化は状態量が時間に依存しない定常状態と仮定したものである。そこで盛土や地下水位の変動による非正常な荷重の変化に対する沈下挙動はゆるやかな現象とし、同時に荷重の非正常性に対し区間定常性を導入し解析を行う¹⁶⁾。

区間定常性は、図-8に示すように時刻 T を中心にその前後 $(2l+1)$ の一定区間では状態は定常と仮定し解析する。次に時刻を一定間隔 ΔT 移動して解析するもの

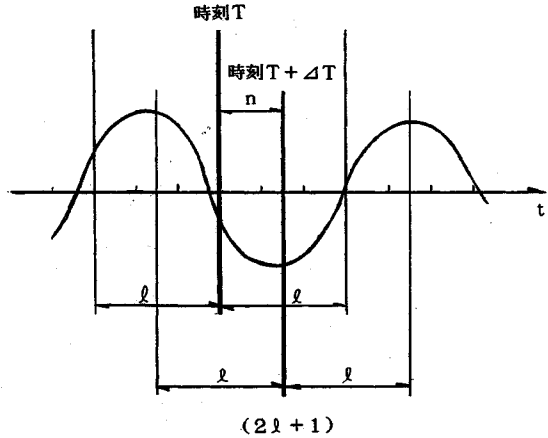


図-8 区間定常性

表-3 区間係数 (1日~30日)

区 間	β_0	β_1
1日 ~ 5日	0.0208	0.7432
5日 ~ 15日	0.2366	0.0201
10日 ~ 20日	0.0378	0.8884
15日 ~ 25日	0.0325	0.9123
20日 ~ 30日	0.0290	0.9266

であり、その結果を区間 $(T+2l+1)$ における推定値とする。

5. 実観測値による圧密沈下挙動の予測

試験盛土による泥炭性軟弱地盤の圧密沈下挙動を、層別沈下計とレベルにより観測された沈下量をもとに本手法の妥当性を検討する。ここで拡張カルマンフィルタによる解析に際しての入力初期値として、状態量の推定値はそれぞれ0.0、推定誤差共分散行列の対角項は1.0また、システムおよび観測雑音の共分散行列は $Q=0.0$ 、 $R=1.0^{-3}$ を用いている。

(1) 層別沈下計による観測値 (E'-3)

観測点 E'-3において層別沈下計の地表面沈下量を用いて沈下挙動のシミュレートを行う。ここで用いた浅岡モデルは現場による施工管理を対象とするために簡略化し一次モデルを用いており、施工管理に適用する目的で地表面沈下に相当する S-3の値を用いる。

まず、非正常な過程を区間定常と仮定した解析の妥当性を検証するために、施工による盛土荷重の増加が沈下挙動に影響を与えていると考えられる観測値 (1日~30日)を用いて、各区間毎に求めた未知パラメータを区間係数と定義し、同定を行った結果を表-3に示す。また、

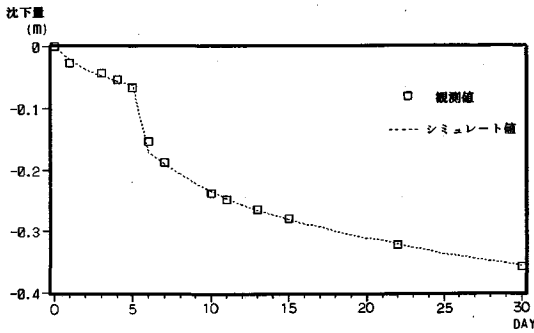


図-9 沈下挙動のシミュレート (1日~30日)

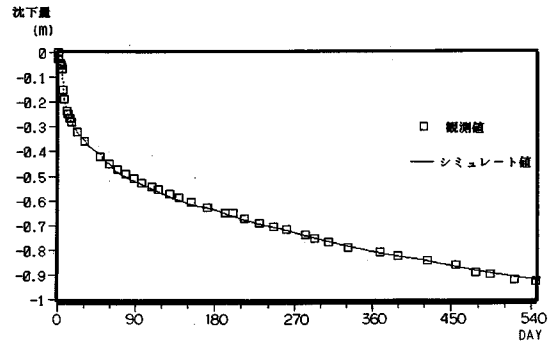


図-10 沈下挙動のシミュレート (1日~545日)

表-4 区間係数 (1日~545日)

区 間	β_0	β_1
1日~160日	0.1582	0.7393
80日~240日	0.1271	0.8184
160日~320日	0.0969	0.8801
240日~400日	0.0788	0.9135
320日~480日	0.0758	0.9188
400日~545日	0.0601	0.9427

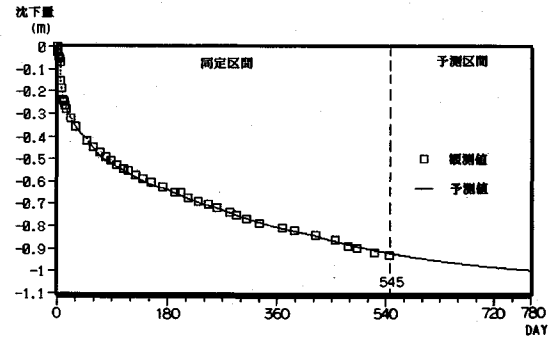


図-11 圧密沈下量の予測 (545日~780日)

求められた区間係数より沈下挙動をシミュレートした結果を図-9に示す。

区間定常性の仮定により求めたパラメータよりシミュレートした沈下量は若干の誤差はあるものの比較的良好に沈下量をシミュレートしている。したがって、圧密沈下現象において非定常な過程を区間定常と仮定し解析することは妥当であるといえる。

次に、同じ観測点E'-3における545日までの観測値を用いて同様に区間係数を同定する。この区間の沈下現象は図-7に示すように地下水位の期間変動による影響を受け、泥炭層には非定常な荷重が作用すると考えられる。

各区間毎に同定された区間係数を表-4に示し、求められた区間係数と浅岡モデルにより沈下挙動をシミュレートした結果を図-10に示す。

図-10より、地下水位の期間変動による非定常な荷重が作用する沈下挙動も比較的良好にシミュレートしていることがわかる。

そこで、同定された区間係数より泥炭層の圧密沈下量の予測を行う。各区間係数の推定に用いた観測値の最終区間は400日~545日である。また545日以降の地下水位は図-4より830日までは下降期であり地下水位による荷重の影響は定常であると考えられる。したがって求められたパラメータより780日までの圧密沈下量の予測

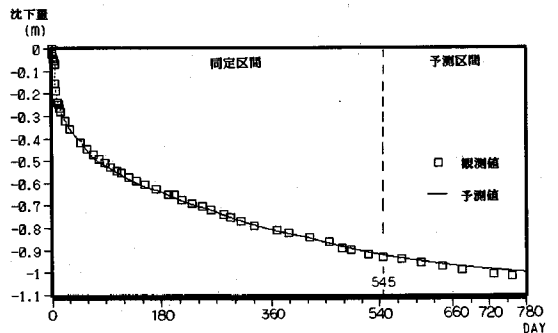


図-12 予測値と観測値 (545日~780日)

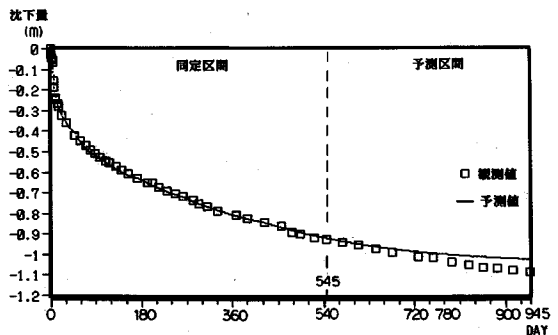


図-13 予測値と観測値 (545日~945日)

表—5 区間係数 (780日~856日)

区 間	β_0	β_1
780日~856日	0.0490	0.9583

を行う。圧密沈下量の予測を行った結果を図—11に示す。

また、実際に観測された値を加えた結果を図—12に示す。

図—12より圧密沈下量は比較的精度よく予測されることがわかるが、観測日数660日以降では予測誤差が生じる。

また同定された区間係数より780日以降の沈下量の予測を行うと図—13に示すようになる。

図—13より780日以降の圧密沈下量の予測値の推定誤差が大きくなる。図—4より830日以降は地下水位が上昇し、非定常な荷重が泥炭層に作用し予測誤差が大きくなったものと考えられる。

そこで観測日数780日~856日の観測値より区間係数を同定した結果を表—5に示す。

また、同定された区間係数より945日まで圧密沈下量の予測を行った結果を図—14に示す。

観測日数828日以降、地下水位は上昇し同定したパラメータは地下水位の上昇による泥炭層の沈下挙動の性質を表した値であり圧密沈下量の予測の精度はよい。

(2) レベルによる観測点 (NO 55)

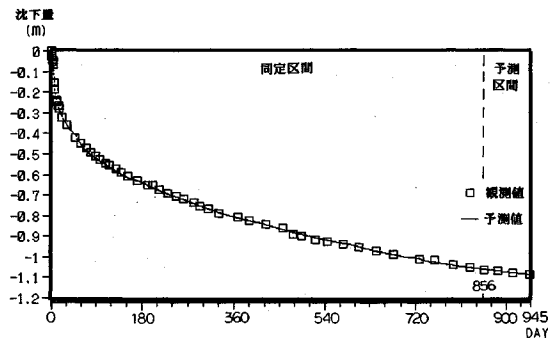
造成工事などの盛土工事における沈下量の観測は、通常レベルにより行われている。本工事においても、日常の施工管理としてレベルによる沈下観測を行っている。したがって施工状況などの原因により測定間隔はまちまちであり、各観測値には観測誤差が多く含まれると考えられる。

また、盛土の施工は計画高や施工工程などにより、段階的に実施される場合が多く、この観測点では盛土を3段階で行い(1段目2.0m, 2段目2.0m, 3段目1.2m)最大沈下量は約2.8mである。

ここで、現場の施工管理に本手法の適用するために、日常管理としてレベルにより観測されたNO 55の値を用いて未知パラメータを同定する。NO 55で観測された沈下データを図—15に示す。

また、この観測点では地下水位の観測を行っておらず沈下挙動と地下水位の関係が把握できない。しかし観測点E'-3や他の地下水位の観測値をもとにこの地区の地下水位は5月~2月が下降期, 3, 4月が上昇期であると推測される。

これを考慮し観測点NO 55の圧密沈下量の勾配を算出すると表—6のようになり、地下水位の上昇・下降に



図—14 予測値と観測値 (780日~945日)

表—6 変位勾配と地下水位 (NO 55)

期 間	変位勾配(cm/day)	地下水位
893日~ 895日	0.0540	下降期
895日~1077日	0.0400	下降・上昇期
1077日~1269日	0.0495	下降期
1269日~1424日	0.0297	下降・上昇期
1424日~1488日	0.0188	上昇期

より沈下挙動が影響を受けていることがわかる。

そこで、この観測点NO 55においても泥炭層に作用する荷重の区間定常性を仮定し沈下挙動のシミュレートと圧密沈下の予測を行う。観測日数1077日までの観測値を用いて沈下挙動をシミュレートした結果を図—16に示す。

図—16より、日常管理の観測値を用いても施工過程による沈下挙動を比較的よくシミュレートしていることがわかる。

次に、同定された区間係数より圧密沈下量を予測した結果を図—17に示し、実際の観測値を加えた結果を図—18に示す。

図—18より日常管理による観測値を用いた場合でも泥炭性軟弱地盤の圧密沈下量の予測を精度よく表し予測誤差は411日の予測期間で約4cmであり、泥炭性軟弱地盤の圧密沈下量の予測手法として本手法は適用可能であると考えられる。

6. 結 論

本研究は、拡張カルマンフィルタ理論を用いて浅岡モデルにより泥炭性軟弱地盤の沈下現象を把握することを目的としている。そして、実際に観測されたデータを用いて泥炭性軟弱地盤の沈下挙動の区間定常性を仮定し、圧密沈下量の予測解析を行い、同時に日常管理における観測値を用いて現場施工管理への適用性を検討した。

以上の解析結果より以下の点が明らかになった。

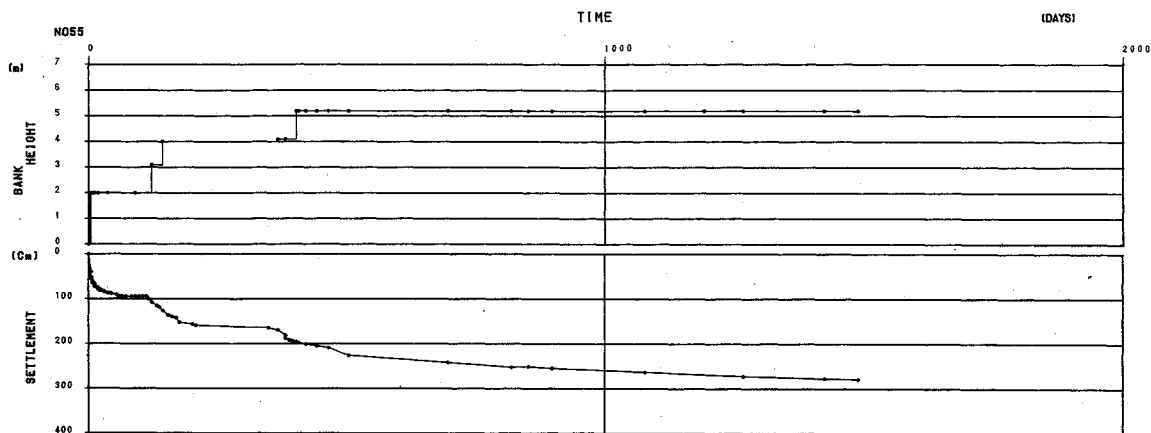


図-15 沈下観測記録 (NO 55)

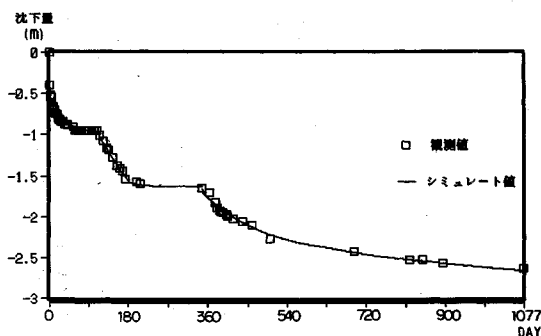


図-16 沈下挙動のシミュレート (NO 55)

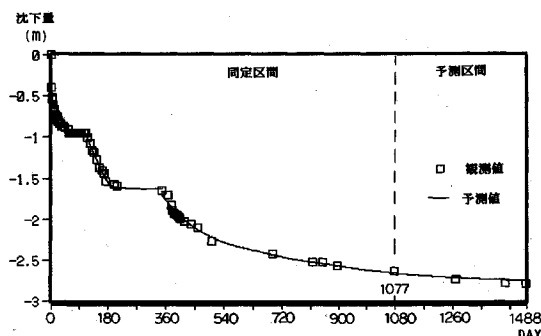


図-18 予測値と観測値 (1077日~1488日)

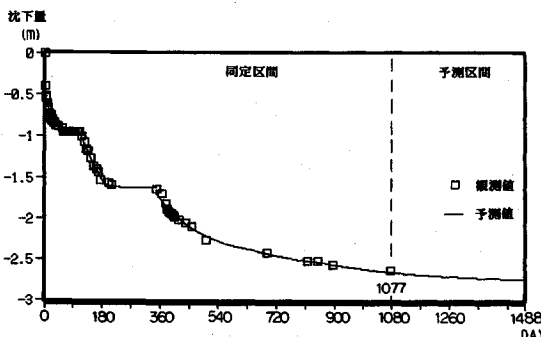


図-17 圧密沈下量の予測 (1077日~1488日)

の沈下挙動予測が可能であり、施工過程における状態の変化に対しても追従性がよく、また小型計算機において実行が可能であり泥炭性軟弱地盤の盛土工事における施工管理に適用が可能である。

今後は、拡張カルマンフィルタと有限要素法による二次圧密現象の長期予測解析と施工中の安全管理について研究する予定であり、また本手法を実際の施工管理に適用していく予定である。

最後に、本論文の数値計算および結果の整理にあたっては、武威工業大学学生 福井清太君 (現 関電工) の協力を得ている。

APPENDIX I

本文中の式 (1), (2) に対する最適状態推定のアルゴリズムを以下に示す。

$$\hat{X}(t_{k+1}|t_k) = \hat{X}(t_k|t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} A X(t|t_k), t] dt \dots\dots\dots (A-1)$$

$$P(t_{k+1}|t_k) = \phi[t_{k+1}, t_k; \hat{X}(t_k|t_k)] P(t_k|t_k) \times \phi^T[t_{k+1}, t_k; \hat{X}(t_k|t_k)] + \Gamma t_k Q t_k \Gamma^T t_k \dots\dots\dots (A-2)$$

$$\hat{X}(t_{k+1}|t_{k+1}) = \hat{X}(t_{k+1}|t_k) + K[t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)] [Y_{t_{k+1}}$$

- (1) 本手法は、拡張カルマンフィルタ理論の観測方程式に用いるモデルを容易に組み込むことが可能であり、状態方程式は定常条件を与えているが区間定常性を仮定すれば非定常な荷重が作用する現象の解析も可能である。
- (2) 区間定常性の仮定により盛土施工中の沈下挙動のシミュレートや泥炭性軟弱地盤の圧密沈下量の予測が短期的には可能であり、実際に観測されたデータで確認ができた。
- (3) 本手法は、レベルによる観測値を用いても泥炭層

$$-h(\hat{X}(t_{k+1}|t_k), t_{k+1})] \dots \dots \dots (A-3)$$

$$P(t_{k+1}|t_{k+1}) = [I - K(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)) \times M(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k))] P(t_k|t_k) \times [I - K(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)) M(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k))]^T + K(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)) R t_{k+1} K^T(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)) \dots \dots \dots (A-4)$$

$$K(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)) = P(t_k|t_k) \times M^T(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)) \times [M(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)) P(t_k|t_k) \times M^T(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)) + R t_{k+1}]^{-1} \dots \dots \dots (A-5)$$

ここで、

$\hat{X}(t_k|t_k)$: Y_{t_k} が得られた時の t_k 時間における推定状態ベクトル(最適推定値)

$P(t_k|t_k)$: $\hat{X}(t_k|t_k)$ と真値 X_{t_k} との差の共分散行列

$\hat{X}(t_{k+1}|t_k)$: Y_{t_k} が得られた時の t_{k+1} 時間における推定状態ベクトル

$P(t_{k+1}|t_k)$: $\hat{X}(t_{k+1}|t_k)$ と真値 $X_{t_{k+1}}$ との差の共分散行列

$K(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k))$: t_{k+1} 時間でのフィルタゲイン行列
 Y_{t_k} : $\{y_{t_k} \dots y_{t_k}\}$, I : 単位行列

このアルゴリズムは、式 (A-1), (A-2) の予測アルゴリズムと式 (A-3)~(A-5) のカルマンゲインによるフィルタリングアルゴリズムより構成される。

アルゴリズム中の変換行列 $M(t_k; \hat{X}(t_k|t_{k-1}))$ と $\phi[t_{k+1}, t_k; \hat{X}(t_k|t_k)]$ は、

$$M(t_k; \hat{X}(t_k|t_{k-1})) = \left[\frac{\partial h_i(X_{t_k}, t_k)}{\partial x_j} \right] X_{t_k} = \hat{X}(t_k|t_{k-1}) \dots \dots (A-6)$$

$$\phi[t_{k+1}, t_k; \hat{X}(t_k|t_k)] = I + \Delta F[t_k; \hat{X}(t_k|t_k)] \dots \dots \dots (A-7)$$

$$F[t_k; \hat{X}(t_k|t_k)] = \left[\frac{\partial f_i(X_t, t)}{\partial x_j} \right] X_t = \hat{X}(t_k|t_k) \dots \dots (A-8)$$

Δ : 時間刻み

$h_i(X_{t_k}, t_k)$: $h(X_{t_k}, t_k)$ の要素

$f_i(X_t, t)$: $f(X_t, t)$ の要素

x_j : X_t または X_{t_k} の要素

上記アルゴリズムに初期状態ベクトル $\hat{X}(t_0|t_0)$ と初期の推定誤差共分散行列 $P(t_0|t_0)$ が得られれば、観測

ベクトル Y_{t_k} を順次取り込み漸化的に最適推定値(最適状態ベクトル)を求めることができる。

参 考 文 献

- 1) 能登繁幸: 泥炭地盤工学, 技報堂出版, 1991.
- 2) 星 堃 和: 最近における基礎の諸問題, 土木学会誌, Vol.47, No.7, pp.63~67, 1962.
- 3) Monden, H.: A new time-fitting method for the settlement analysis of foundation on soft clays, Mem, Fac, of Eng, Hiroshima Univ, 2-1 (21), pp.21~29, 1963.
- 4) Asaoka, A.: Observational procedure of settlement prediction, Soils and Foundations, Vol.18, No.2, pp.87~101, 1978.
- 5) Asaoka, A. and M. Matsuo: An inverse problem approach to the prediction of multi-dimensional consolidation behavior, Soils and Foundations, Vol.24, No.1, pp.49~62, 1984.
- 6) 村上 章・長谷川高士: Kalman フィルタを用いた圧密沈下量の観測的予測, 農業土木学会論文集, No.120, pp.61~67, 1985.
- 7) 能登繁幸: 泥炭地盤の沈下量の予測に関する考察, 土質工学論文報告集, Vol.27, No.2, pp.107~117, 1987.
- 8) 藤井弘章・島田 清・西村伸一・田尻宣夫: 標準圧密試験による土質定数の決定と有限要素圧密解析への適用—干拓地の軟弱地盤の挙動に関する実証的研究 (I)—, 農業土木学会論文集, No.154, pp.1~8, 1991.
- 9) 藤井弘章・島田 清・西村伸一・田尻宣夫: 袋詰めサンドドレーン改良地盤の沈下計測と軸対称有限要素法に基づく沈下予測—干拓地の軟弱地盤の挙動に関する実証的研究 (II)—, 農業土木学会論文集, No.154, pp.8~16, 1991.
- 10) 須藤敦史・星谷 勝: EK-WLI 法と有限要素法による逆解析, JCOSSAR '91 論文概要集, pp.699~702, 1991.
- 11) Jazwinski, A.H.: Stochastic process and filtering theory, Academic Press, pp.266~286, 1970.
- 12) 星谷 勝・斉藤悦郎: データ解析と応用 (カルマンフィルタを中心として), 鹿島出版会, 1991.
- 13) W.G-W. Yeh, Review of Parameter Identification Procedures in Groundwater Hydrology: The Inverse Problem, Water Resources Research, 22 (2): pp.95~108, 1986.
- 14) 村上 章・長谷川高士・小林範之: Kalman フィルタを用いた地盤挙動に関するパラメータ同定と平滑化, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp.1219~1220, 1991.
- 15) 斉藤悦郎・古賀重利・鎌田正孝: 拡張カルマンフィルタ—支援による山留め工事計測管理手法, 土木学会論文集, No.391, pp.115~124, 1988.
- 16) 星谷 勝・丸山 収: 多変量一次元 AR モデルの逐次同定法: 土木学会論文集, No.416, pp.349~355, 1990.

(1992.2.28 受付)

PREDICTION OF SETTLEMENT ON PEATY SOFT DEPOSITS USING EXTENDED KALMAN FILTER

Masaru HOSHIYA, Katuitiro ITABASHI, Toshihiro ITOH and Atsushi SUTOH

This paper describes parameter identification and prediction of consolidation settlement on peaty soft deposits using Extended Kalman filter. Consolidation settlement on peaty soft deposits shows non-stationary behaviour under the periodical loads of under ground water levels. At first, this non-stationary consolidation behaviour is assumed to be a regularly intervaled stationary process

Secondly, this procedure is applied to the parameter identification and prediction of consolidation settlement using observational data.

Finally, numerical analysis of observation data is carried out to show the usefulness of this procedure of parameter identification and prediction of consolidation settlement on peaty soft deposits.
