

拡張カルマンフィルタの基本的考察とEK-WLI法の提案

須藤敦史*・星谷 勝**

地盤・構造系の地震時の挙動特性や地盤の静的逆解析に拡張カルマンフィルタ理論が用いられている。本論文では、この拡張カルマンフィルタ理論における状態ベクトル推定の基本的なアルゴリズムを明らかにするとともに、その特徴を生かした手法(EK-WLI法)を提案し、同定・収束性の検討を行っている。

Keywords: extended kalman filter, identification problem, EK-WLI procedure

1. 目 的

土木構造物の動特性を実験・観測値等により同定し、構造物の応答挙動を的確に予測したり、現場計測により施工中の挙動を把握し、それに基づいた設計条件の見直しや挙動予測を確かなものにするいわゆる逆解析に拡張カルマンフィルタを用いた種々の研究が行われている。

この逆解析の手法の1つに、地盤・構造系の地震時挙動特性の同定に用いた著者の一人が提案した拡張カルマンフィルタアルゴリズムを基本とした同定手法(EK-WLI法)^{1)~6)}、入力の逆解析として土岐ら⁷⁾の解析手法がある。また地盤の静的逆解析では、村上・長谷川は、カルマンフィルタと有限要素法により観測節点配置を考察⁸⁾し、斉藤らは、山留め掘削による土質定数の推定⁹⁾や地下空洞計測による異方性岩盤の物性値・初期応力の推定¹⁰⁾を行っている。鈴木・石井は、カルマンフィルタの初期入力値を確率・統計的に求め土質定数の分布推定¹¹⁾を行っている。

カルマンフィルタの理論では、システムは状態を表現する方程式(状態方程式)と観測系を表現する方程式(観測方程式)に分離される。このことは、システムの状態量を表す変数と観測量との間には何らかの関係があればよい。

カルマンフィルタは、ランダムなデータを時系列のまま逐次処理を行うシーケンシャルな時間領域の解析手法であり、データの変動に対して追従性もよく、また計算量も少なくばらつきや誤差の多いデータの解析にも有効な手法である。

一方、拡張カルマンフィルタの理論は、非線形な状態

方程式と観測方程式を基準軌跡に対して線形化し、カルマンフィルタの理論と同様なアルゴリズムを構成したものである。

しかしながら、多くの適用例から、拡張カルマンフィルタが有効な手法として知られる一方で、今までの研究ではこの手法による同定・逆解析の基本的なアルゴリズムの特性の検討が十分になされていないのが現状である。将来、より一般的な手法として定着させるために、本研究では拡張カルマンフィルタにおける基本的なアルゴリズムの考察を行い理論の基本原則と同定・逆解析に対する適応性について論じたものである。また本論において、拡張カルマンフィルタの特徴である逐次処理を用いた手法を提案し、従来の手法との同定結果・収束性の比較を数値的に検討している。

本論文は、観測値を確率的に取り扱う拡張カルマンフィルタを用いてシーケンシャルな同定・逆解析へ合理的に適用することを前提として、次の基本事項の考察を行っている。

(1) 拡張カルマンフィルタによる状態ベクトル推定のメカニズムを明らかにするとともに、非線形な観測方程式を線形化することの影響を考察し、状態ベクトルの同定精度および収束性の検討を行う。

(2) 拡張カルマンフィルタの逐次処理の特徴を生かした解析手法を提案し、同時に拡張カルマンフィルタを順解析プログラム(有限要素法や境界要素法など)と組み合わせるための手法の数値的な検討を行っている。

(3) 本手法の適応範囲・収束安定性を示すため、従来の手法との数値的比較検討を行っている。

2. 拡張カルマンフィルタ¹²⁾

(1) カルマンフィルタ

カルマンフィルタの基本式は、線形離散型状態方程式と線形離散型観測方程式で構成され漸化的な最適状態量

* 正会員 武蔵工業大学 客員研究員(株)地崎工業 技術開発室
(〒105 港区西新橋 2-23-2)

** 正会員 Ph. D. 武蔵工業大学教授 土木工学科

推定アルゴリズムを形成している。

$$Xt_{k+1} = \phi(t_{k+1}|t_k)Xt_k + \Gamma(t_{k+1}|t_k)wt_{k+1} \dots\dots\dots(1)$$

$$Yt_k = Mt_kXt_k + vt_k \dots\dots\dots(2)$$

ここで, Xt_k : 状態ベクトル

Yt_k : 観測ベクトル

Mt_k : 観測マトリクス

$\phi(t_{k+1}|t_k)$: 状態変換行列

$\Gamma(t_{k+1}|t_k)$: システム雑音行列

wt_k : システム雑音ベクトル

vt_k : 観測雑音ベクトル

t_k : 時間ステップ

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。

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

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

δt_{ks} : クロネッカデルタ関数

Qt_k, Rt_k : システムおよび観測雑音の共分散マトリクス

(2) 拡張カルマンフィルタ

拡張カルマンフィルタでは, カルマンフィルタに対し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。

$$Xt = f(Xt, t) + Gtwt \dots\dots\dots(5)$$

$$Yt_k = h(Xt_k, t_k) + vt_k \dots\dots\dots(6)$$

この基本式に対するアルゴリズムは, 非線形の状態方程式と観測方程式を非確率関数である基準軌跡を導入することにより, 線形化しカルマンフィルタのアルゴリズムに代入し構成したものである。

拡張カルマンフィルタのアルゴリズムは,

$$\hat{X}(t_{k+1}|t_k) = \hat{X}(t_k|t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} f[\hat{X}(t|t_k), t] dt \dots\dots\dots(7)$$

$$P(t_{k+1}|t_k) = \phi[t_{k+1}, t_k; \hat{X}(t_k|t_k)]P(t_k|t_k) \times \phi^T[t_{k+1}, t_k; \hat{X}(t_k|t_k)] + \Gamma t_k Qt_k \Gamma^T t_k \dots\dots\dots(8)$$

$$\hat{X}(t_{k+1}|t_{k+1}) = \hat{X}(t_{k+1}|t_k) + K[t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)] \times [Yt_{k+1} - h(\hat{X}(t_{k+1}|t_k), t_{k+1})] \dots\dots\dots(9)$$

$$P(t_{k+1}|t_{k+1}) = [I - K[t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)] \times M(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k))]P(t_{k+1}|t_k) \times [I - K[t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)] \times M(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k))]^T + K[t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)]Rt_{k+1} \times K^T[t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)] \dots\dots\dots(10)$$

$$K[t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)] = P(t_{k+1}|t_k) \times M^T(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)) \times [M(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k))]P(t_{k+1}|t_k) \times M^T(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)) + Rt_{k+1}]^{-1} \dots\dots\dots(11)$$

ここで,

$\hat{X}(t_k|t_k)$: Yt_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 Xt_k との差の共分散行列

$\hat{X}(t_{k+1}|t_k)$: Yt_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

$P(t_{k+1}|t_k)$: $\hat{X}(t_k|t_k)$ と真値 Xt_{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

Yt_k : (yt_1, \dots, yt_k)

I : 単位行列

このアルゴリズムは, 式(7), (8)の予測アルゴリズムと式(9)~(11)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 $M(t_k; \hat{X}(t_k|t_k))$ と $\phi[t_{k+1}, t_k; \hat{X}(t_k|t_k)]$ は,

$$M(t_k; \hat{X}(t_k|t_k)) = \left[\frac{\partial h_i(Xt_k, t_k)}{\partial x_j} \right] (Xt_k = \hat{X}(t_k|t_k)) \dots\dots\dots(12)$$

$$\phi[t_{k+1}, t_k; \hat{X}(t_k|t_k)] \cong I + \Delta F[t_k; \hat{X}(t_k|t_k)] \dots\dots\dots(13)$$

$$F[t_k; \hat{X}(t_k|t_k)] = \left[\frac{\partial f_i(Xt, t)}{\partial x_j} \right] (Xt = \hat{X}(t_k|t_k)) \dots\dots\dots(14)$$

Δ : 時間刻み

$h_i(Xt_k, t_k)$: $h(Xt_k, t_k)$ の要素

$f_i(Xt, t)$: $f(Xt, t)$ の要素

x_j : Xt または Xt_k の要素

上記アルゴリズムに初期状態ベクトル $X(t_0|t_0)$ 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 Yt_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。

3. 拡張カルマンフィルタによる状態ベクトル推定

拡張カルマンフィルタにおける同定の基本的メカニズムを検討するために, 簡単な2要素から成る状態ベクトルを例題として用いて考察を行う。また, 観測量は1要素とする。なお, 本論では構造物の動特性値や静的逆解析における地盤物性値などの同定を想定して, これらの値を要素とする状態ベクトルを対象として検討する。したがって, 状態ベクトルを定常とし状態量に対するノイズを考慮しない場合を行う。

ゆえに, 基本方程式は次式で与えられる。

$$Xt_{k+1} = IXt_k \dots\dots\dots(15)$$

$$Yt_k = h(Xt_k, t_k) + vt_k \dots\dots\dots(16)$$

vt_k : ガウス性ホワイトノイズ

$$E[vt_k] = 0, \quad E[vt_k vt_s^T] = Rt_k \delta t_{ks}$$

ただし $Xt_{k+1} = [x_{1k+1}, x_{2k+1}]^T$, Yt_k = スカラー量

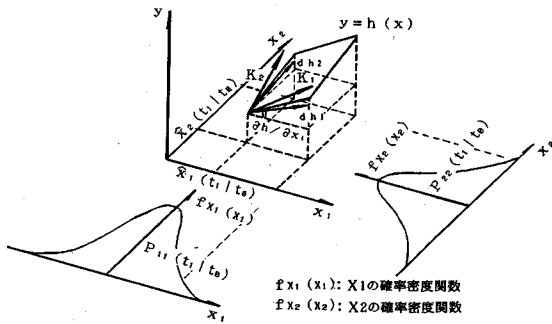


図-1 接線勾配とカルマンゲイン

(1) カルマンゲインと最適状態ベクトル推定

前記した拡張カルマンフィルタのアルゴリズムより、初期状態ベクトル推定値 $X(t_0|t_0) = [x_1(t_0|t_0), x_2(t_0|t_0)]^T$ 初期状態ベクトル推定誤差共分散値

$$P(t_0|t_0) = \begin{bmatrix} P_{11}(t_0|t_0) & 0 \\ 0 & P_{22}(t_0|t_0) \end{bmatrix}$$

としカルマンゲインを具体的に書き下してみる。式(11)より

$$K(t_1; \hat{X}(t_1|t_0)) = P(t_1|t_0) \times M(t_1; \hat{X}(t_1|t_0)) \times [M(t_1; \hat{X}(t_1|t_0))P(t_1|t_0) \times M^T(t_1; \hat{X}(t_1|t_0)) + R_1]^{-1} \dots (17)$$

ここで変換行列は、式(12)より初期状態ベクトル推定値 $X(t_0|t_0)$ の回りに線形化し

$$M(t_1; \hat{X}(t_1|t_0)) = \left[\frac{\partial h(X_1 t_0, t_0)}{\partial x_1} \quad \frac{\partial h(X_2 t_0, t_0)}{\partial x_2} \right] \dots (18)$$

となり、この変換行列は非線形観測方程式(16)の初期推定値 $X(t_0|t_0)$ 点における接線勾配になる。

また、式(17)のカルマンゲインに式(18)を代入すると

$$K(t_1; \hat{X}(t_1|t_0)) = \begin{bmatrix} \frac{P_{11}(t_0|t_0) (\partial h / \partial x_1)}{P_{11}(t_0|t_0) (\partial h / \partial x_1)^2 + P_{22}(t_0|t_0) (\partial h / \partial x_2)^2 + R_1} \\ \frac{P_{22}(t_0|t_0) (\partial h / \partial x_2)}{P_{11}(t_0|t_0) (\partial h / \partial x_1)^2 + P_{22}(t_0|t_0) (\partial h / \partial x_2)^2 + R_1} \end{bmatrix} \dots (19)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x_1} = \frac{\partial h(X_1 t_0, t_0)}{\partial x_1}, \quad \frac{\partial h}{\partial x_2} = \frac{\partial h(X_2 t_0, t_0)}{\partial x_2}$$

となる。

ここで曲面 $h(X t_k, t_k)$ の初期状態ベクトル推定値 $X(t_0|t_0)$ 点(式(15)より $X(t_0|t_0) = X(t_1|t_0)$ になる。)における接線勾配とカルマンゲインを表現すると図-1のようになる。

式(19)より、カルマンゲインの要素数も変換行列(接線勾配)同様に状態ベクトルの要素数に一致する。式(19)において各要素の分子は、接線勾配に状態ベクトルの推

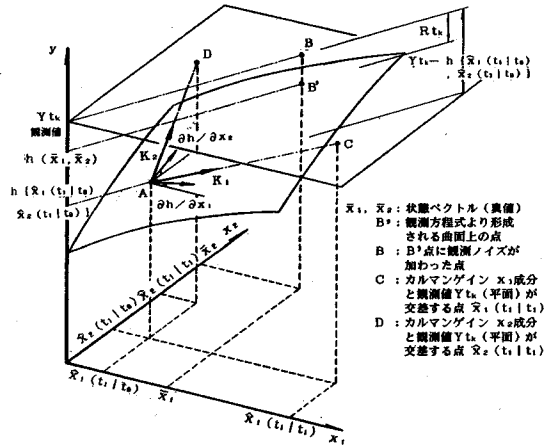


図-2 拡張カルマンフィルタの状態ベクトル推定

定時におけるばらつきの指標を乗じた形になっている。したがって、図においてそれぞれ dh_1 と dh_2 に対応する。

また、分母は状態ベクトルの全変化量 $P_{11}(t_0|t_0) (\partial h / \partial x_1) + P_{22}(t_0|t_0) (\partial h / \partial x_2)$ の各項に接線勾配 $\partial h / \partial x_1$ と $\partial h / \partial x_2$ を乗じたものであり、これに観測ノイズのばらつきの指標 R_1 を加えたものである。

したがって、図のように K_1 と $\partial h / \partial x_1$ 、 K_2 と $\partial h / \partial x_2$ は推定誤差共分散値と観測ノイズの分散値のために異なる勾配になる。

次に、カルマンフィルタでは観測ベクトルが得られた時、前記アルゴリズムの式(9)より、カルマンゲインを用いて次のように状態ベクトルの最適推定値を求めることになる。

$$\hat{X}(t_1|t_1) = \hat{X}(t_1|t_0) + K[t_{k+1}; \hat{X}(t_1|t_0)] \times [Y_{t_1} - h(X(t_1|t_0), t_1)] \dots (20)$$

式(19)のカルマンゲインの要素の式を用い、かつ式(20)に基づき状態ベクトルの最適推定アルゴリズムを示すと図-2のようになる。

状態ベクトルの推定は、式(20)より観測ベクトルが得られた時の推定観測値との差(修正量)にカルマンゲイン(修正方向)を乗じた量が、各状態ベクトルの次ステップの修正量になり、この修正量をその時の推定状態ベクトルに加えたものが最適推定値になる。

ここで式(19)、(20)において、観測ノイズ(観測誤差)を考慮せず、かつ状態ベクトルのばらつきを示す統計的指標を用いない場合、この式は出力誤差法におけるガウス-ニュートン法の反復公式と同じ式になることがわかる(APPENDIX 1参照)。

(2) カルマンゲインと変換行列

拡張カルマンフィルタにおけるカルマンゲインは、式(11)より

表一 変換行列とカルマンゲイン

Mt _k		K _{t_k}	Mt _k		K _{t_k}
P=10.0	0.0001	0.01	P=100	0.00001	0.1
R=0.1	0.001	0.1	R=0.01	0.0001	1.0
	0.01	1.0		0.001	10.0
	0.1	5.0		0.01	50.0
	1.0	1.0		0.1	10.0
	10.0	0.1		1.0	1.0
	100.0	0.01		10.0	0.1
				100.0	0.01

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

上式の右辺において、初期状態ベクトル推定誤差共分散行列 $P(t_0|t_0)$ および観測ノイズの分散 $R t_{k+1}$ は、入力される量である。カルマンゲイン中の変換行列は $M(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k))$ であり、非線形観測方程式(6)より初期推定状態ベクトル $X(t_0|t_0)$ 点の近傍で観測方程式を線形化することにより求められる。カルマンゲインは、前節で説明したように最適状態ベクトル推定アルゴリズム(9)中の修正方向になり、状態ベクトルの修正量に影響を与える値である。

ここで、変換行列が1要素から構成されている場合において、変換行列(スカラー量)のカルマンゲインに与える影響を検討する。共分散行列値 $P(t_k|t_k)$ と分散値 $R t_{k+1}$ を固定し、変換行列値を変化させた場合のカルマンゲインを求めると表一のようになり、これを図示すると図-3になる。

上図よりカルマンゲインの大きさは、変換行列値(接線勾配)の値が観測ノイズの分散値と一致する近傍で急変することがわかる。変換行列値が観測ノイズの分散値より大きい場合、カルマンゲインは変換行列の逆数に近い値を示し、さらにこの範囲では表一から観測ノイズの分散値の影響はあまり受けず変換行列の大きさのみに依存している。

また変換行列が観測ノイズの分散より小さい範囲では表一より、カルマンゲインは変換行列と観測ベクトルの分散値の両方の影響を受け小さい値になることがわかる。このことは状態ベクトルに対する修正量が減少することを意味し、変換行列値が小さい場合には安定した推定が難しく、何らかの対応が必要である。また、変換行列値が大きい場合にはガウス-ニュートン法のアルゴリズムに近くなる。

(3) 非線形観測方程式と状態ベクトル推定誤差共分散行列の影響

拡張カルマンフィルタでは、観測ベクトル $Y t_k$ を順次得ることにより状態ベクトルの推定誤差共分散行列 $P(t_k|t_k)$ を求めながら、状態ベクトルの最適推定値 $X(t_k|t_k)$ を漸化的に求めてゆき、それに伴い各ステップで求められる状態ベクトルと状態ベクトル推定誤差共分散行列は、初期推定値の推定誤差の影響から脱却することに

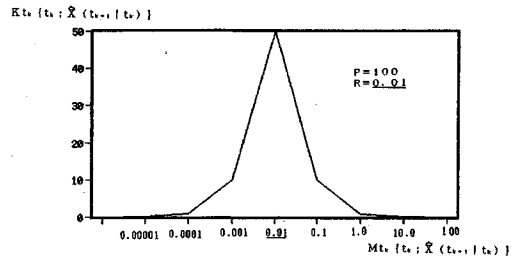
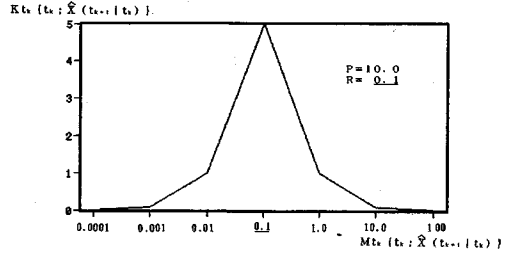


図-3 変換行列とカルマンゲイン

なる。

状態ベクトル推定誤差共分散行列を求めるアルゴリズムは、式(10)より求められる

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

になるが、カルマンゲイン算出の際の微小誤差 δK による状態ベクトル推定誤差の共分散行列の誤差 δP は微小なのでこれを無視すると状態ベクトル推定誤差の共分散行列は、次式のようなになる。

$$P(t_{k+1}|t_{k+1}) = [I - K(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k))] \times M(t_{k+1}; \hat{X}(t_{k+1}|t_k)) P(t_{k+1}|t_k) \dots (21)$$

ここで初期推定状態ベクトル $X(t_0|t_0)$ ・状態ベクトル推定誤差共分散行列を $P(t_0|t_0)$ とすると、式(21)より次ステップの状態ベクトル推定誤差共分散行列は次式のようなになる。

$$P(t_1|t_1) = [I - K(t_1; \hat{X}(t_1|t_0))] M(t_1; \hat{X}(t_1|t_0)) P(t_1|t_0)$$

上式右辺の [] 内は、初期状態ベクトル推定誤差共分散行列 $P(t_0|t_0)$ が、次ステップで減少する割合を示している。次に、状態方程式中の状態ベクトルを1要素としてカルマンゲインを求めると

$$K(t_1; \hat{X}(t_1|t_0)) = P(t_1|t_0) M^T(t_1; \hat{X}(t_1|t_0)) \times [M(t_1; \hat{X}(t_1|t_0)) P(t_1|t_0) \times M^T(t_1; \hat{X}(t_1|t_0)) + R_1]^{-1} \dots (22)$$

また式(21)より、次ステップの状態ベクトル推定誤差

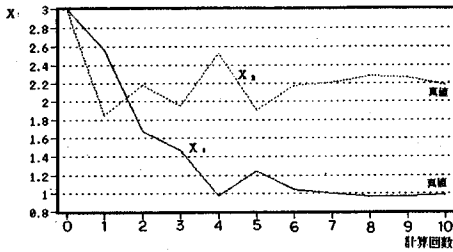


図-4 状態ベクトル推定

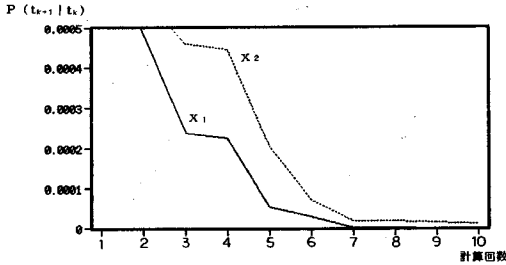


図-5 状態ベクトル推定誤差共分散行列

共分散行列を求めると

$$P(t_1|t_1) = [I - \hat{K}(t_1; X(t_1|t_0))] \times M(t_1; \hat{X}(t_1|t_0)) P(t_1|t_0) \dots (23)$$

ここで式(12)より、非線形観測方程式の場合には変換行列は、推定状態ベクトル $X(t_0|t_0)$ 点近傍で線形化を行い

$$M(t_1; \hat{X}(t_1|t_0)) = \left[\frac{\partial h(X(t_1), t_0)}{\partial x} \right]$$

式(21), (22)より

$$K(t_1; \hat{X}(t_1|t_0)) = [P(t_1|t_0) (\partial h / \partial x)] \times [(\partial h / \partial x) P(t_1|t_0) (\partial h / \partial x) + R_1]^{-1}$$

$$P(t_1|t_1) = [I - P(t_1|t_0) (\partial h / \partial x)] \times \{ (\partial h / \partial x) P(t_1|t_0) (\partial h / \partial x) + R_1 \}^{-1} \times (\partial h / \partial x) P(t_1|t_0) \\ = \left[I - \frac{(\partial h / \partial x)^2 P(t_1|t_0)}{(\partial h / \partial x)^2 P(t_1|t_0) + R_1} \right] P(t_1|t_0) \\ = \frac{R_1}{(\partial h / \partial x)^2 P(t_1|t_0) + R_1} P(t_1|t_0)$$

$$\frac{\partial h(X(t_0), t_0)}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x}$$

上式より、次ステップの状態ベクトル推定誤差共分散行列は、観測ノイズの分散値の影響を受ける。言い換えれば、初期状態ベクトル推定誤差共分散行列中に含まれていた観測ノイズの割合で減少する。

ここで、状態ベクトル推定誤差とその共分散行列の関係を検討する目的で次に示す非線形観測方程式(24)を

用いて、定常状態方程式(25)について数値的検討を行った結果を図-4、図-5に示す。

$$Yt_k = e^{ax_1 t_k} + bx_2 t_k^2 + vt_k \dots (24)$$

$$Xt_{k+1} = IXt_k \dots (25)$$

状態ベクトル推定誤差共分散行列の要素の初期値は共通に、 $P(t_0|t_0) = 10.0$ を用いている。

図-4では、非線形観測方程式を推定状態ベクトル近傍で線形化するため、次ステップの状態ベクトルに推定誤差が残っている。しかし図-5の状態ベクトル推定誤差共分散行列は、観測方程式の非線形とは別に観測ノイズの分散の含まれる割合で減少している。状態ベクトル推定誤差共分散行列が小さくなると、次ステップの状態ベクトルの修正量は前節で説明したように減少し状態ベクトルの収束性も悪くなる。

拡張カルマンフィルタを適用する際には、非線形観測方程式の線形化の影響に加え、状態ベクトル推定誤差共分散行列の大きさの変化についても注意を必要とすることがわかる。

4. EK-WLI法の提案

拡張カルマンフィルタによる状態ベクトル推定時に、推定結果が不安定になる大きな要因には次の2つが上げられる。

- 1) 観測方程式の非線形性(変換行列の線形近似)による推定誤差の増大
 - 2) 状態ベクトル推定誤差共分散行列の要素の値が線形近似により減少することによる収束の鈍化
- (1) 繰り返し拡張カルマンフィルタ¹²⁾

繰り返し拡張カルマンフィルタは、変換行列の線形化による状態ベクトルの推定誤差を少なくし観測ベクトルの情報を有用に活用する手法である。まず、最初の観測ベクトルを取り込み拡張カルマンフィルタのアルゴリズムにより状態ベクトルを推定する。推定した状態ベクトルを初期条件として再び拡張カルマンフィルタのアルゴリズムで状態ベクトルの推定を繰り返す。この時、観測ベクトルは所定の繰り返し回数まで、初期に取り込んだ観測ベクトル値を用いる。

この繰り返し拡張カルマンフィルタでは、繰り返し演算子と呼ばれる式(26)を拡張カルマンフィルタのアルゴリズム式(9)に導入している。

$$\eta_{i+1} = \hat{X}(t_{k+1}|t_k) + K[t_{k+1}; \eta_i] \times [Yt_{k+1} - h(\eta_i; t_{k+1}) - M(t_{k+1}; \eta_i)] \times \{X(t_{k+1}|t_k) - \eta_i\}_{i=1, \dots, l} \dots (26) \\ i = 1, 2, \dots, l \\ \eta_1 = \hat{X}(t_{k+1}|t_k) \\ \eta_l = \hat{X}(t_{k+1}|t_{k+1})$$

繰り返し演算子は、観測ベクトルと推定状態ベクトル

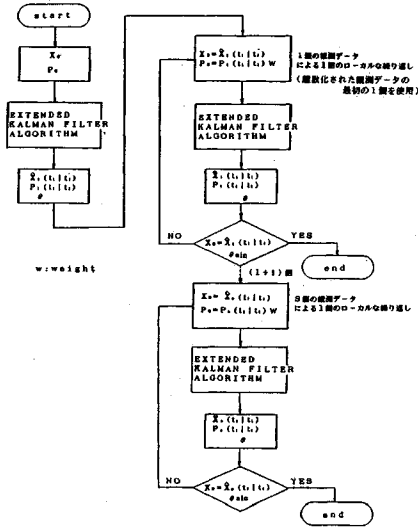


図-6 EK-WLI法のアルゴリズムフロー図

の差を繰り返しにより少なくするものである。

(2) 拡張カルマンフィルタ重み付きローカルな繰り返し法 (EK-WLI法)

(1)で述べたように、繰り返し演算子を導入することにより状態ベクトルの推定誤差は減少させることができるが、式(26)では推定結果が不安定になるもう一つの要因である状態ベクトル推定誤差共分散行列の減少を防ぐ考慮はされていない。前節までに明らかにしたが、状態ベクトル推定誤差共分散行列の要素は、状態ベクトル推定の変化量(修正量)に影響を与えるものであり、観測方程式が非線形の場合には、状態ベクトルに推定誤差が残っていてもそれらの値は小さくなってしまふ。

そこで、観測方程式の非線形性の影響を減少させ、かつ状態ベクトル推定誤差共分散行列の減少を修正する目的で、式(26)を用いたローカルな繰り返しに対して重み(W)を導入した拡張カルマンフィルタ重み付きローカルな繰り返し法(EK-WLI法)を提案する。これは、著者の1人が提案したEK-WGI法⁹⁾における重みの有効性を式(26)に適用した手法である(APPENDIX 2参照)。

この手法は、繰り返し拡張カルマンフィルタと同様なアルゴリズムにより状態ベクトルの最適推定値を求めるが、各ローカルな繰り返しごとに、状態ベクトル推定誤差共分散行列に重み(W)を乗じる。その値を次のローカルな繰り返しにおける初期値として用いて最適推定状態ベクトルを求めるアルゴリズムである。

したがってEK-WLI法の状態ベクトル推定アルゴリズムは図-6に示すフロー図になる。

(3) 繰り返し拡張カルマンフィルタとEK-WLI法の収束比較

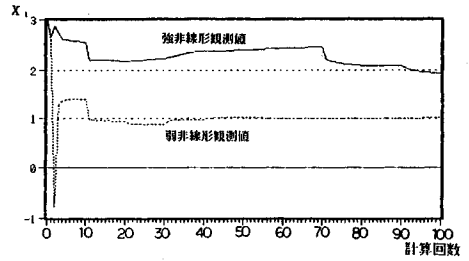


図-7 繰り返し拡張カルマンフィルタの安定性

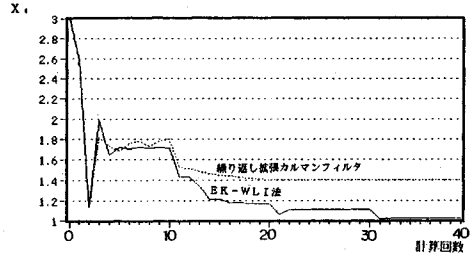


図-8 繰り返し拡張カルマンフィルタとEK-WLI法の安定性比較

繰り返し拡張カルマンフィルタでは、繰り返し演算子を導入し観測方程式の非線形性の影響を減少させており、また拡張カルマンフィルタ重み付きローカルな繰り返しでは、状態ベクトル推定誤差共分散行列に重み(W)を乗ずることにより、観測方程式の非線形性の影響のみならず状態ベクトル推定誤差共分散行列の減少の影響を修正している。

図-7は、繰り返し拡張カルマンフィルタにより状態ベクトルを推定したものであるが、推定初期に観測方程式の非線形性が強い場合には、状態ベクトルの安定性と収束性が悪くなっている。

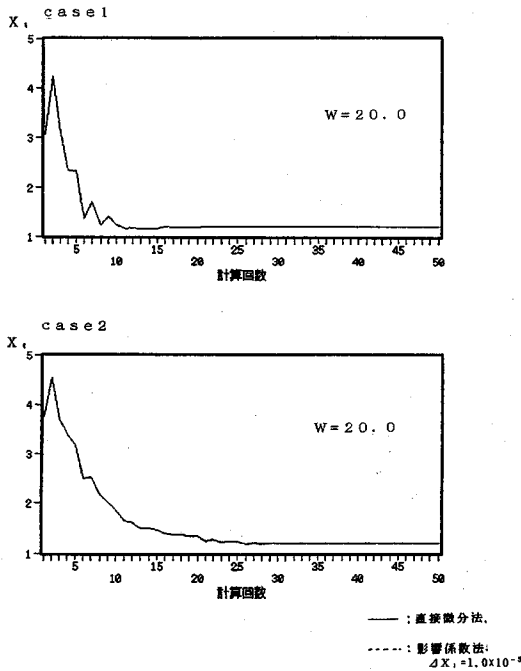
このことは繰り返し演算子は、観測方程式の非線形性の影響を減少させるには限界があると言える。

次に図-8の解析結果は、EK-WLI法と繰り返し拡張カルマンフィルタの結果を比較したものでありEK-WLI法では安定した結果が得られている。

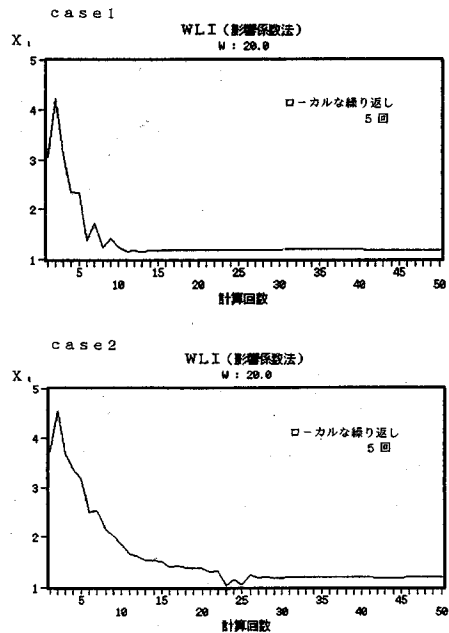
5. EK-WLI法の収束安定性の検討

拡張カルマンフィルタと順解析プログラム(有限要素法)を組み合わせた逆解析の研究が行われているが、順解析プログラムを拡張カルマンフィルタに適用するためにはアルゴリズム式(9)~(11)に必要な変換行列を求めなければならない。斎藤らは^{9),10)}、変換行列を影響係数法による感度解析により求めている。本論でも、影響係数法により求めた変換行列をEK-WLI法に適用した際の状態ベクトルの収束の安定性を検討する。

さらに、EK-WLI法とEK-WGI法の状態ベクトル推定の収束の安定性比較を数値例を用いて行う。数値例



図—9 変換行列による比較



図—10 EK-WLI法による状態ベクトル推定

で用いた非線形観測方程式は以下に示す2式である。

$$Y_{t_k} = a^3 x_{1t_k} + b^2 x_{2t_k}^2 + v_{t_k} \quad \text{case 1} \dots\dots\dots (27)$$

$$Y_{t_k} = e^{ax_{1t_k}} + bx_{2t_k}^2 + v_{t_k} \quad \text{case 2} \dots\dots\dots (28)$$

ここで、状態ベクトルは定常とし式(25)を用いる。

(1) 順解析プログラム適用のための変換行列

拡張カルマンフィルタの観測方程式は、式(6)に示されるように非線形であり状態ベクトル推定アルゴリズムに適用するためには、状態ベクトル推定値の近傍において線形化を行い、変換行列 $M(t_{k+1}; X(t_{k+1}|t_k))$ を求めなければならない。

この変換行列は通常、非線形観測方程式の状態ベクトル推定値での接線勾配を求めることであり、非線形観測方程式を微分し求める。しかし順解析プログラム(FEM, BEM)等では、変換行列を直接求めるのは困難な場合が多い。そこで、変換行列(接線勾配)を影響係数法による感度解析¹⁴⁾より近似的に求める。すなわち変換行列は、式(12)で示されるように

$$M(t_k; \hat{X}(t_k|t_k)) = \left[\frac{\partial h_i(X_{t_k}, t_k)}{\partial x_j} \right]_{X_{t_k} = \hat{X}(t_k|t_k)}$$

であり、状態ベクトルを推定値より順次微少に変化させその変化量により変換行列を形成する手法である。

$$\frac{\partial h_i(X_{t_k})}{\partial x_j} = \frac{h_i(x_j; t_k + \Delta x_j e_j) - h_i(x_j; t_k)}{\Delta x_j} \dots\dots\dots (29)$$

Δx_j : x_j の微少増分
 e_j : j 番目の要素

この変換行列が近似的に求められれば、順解析プログラムを拡張カルマンフィルタに組み込むことができる状態ベクトル推定が可能になる。

ここで、影響係数法により変換行列を求めた場合と、直接微分により求めた場合の状態ベクトルの安定性の比較をEK-WLI法を用いて数値的に求めた結果を図-9に示す。両図とも数値結果は一致し、区別が不可能である。

図-9より、直接微分法と影響係数法により変換行列を求めた際に各ローカルな繰り返し時に状態ベクトルの推定値には差がなく、順解析可能なプログラムをEK-WLI法のアルゴリズムに適用することが可能であり、状態ベクトル推定値も安定した結果が得られるものと考えられる。

(2) EK-WLI法の精度と安定性の比較

EK-WLI法とEK-WGI法を比較した結果を図-10, 11に示す。同じ観測ベクトルを用いて状態ベクトルの推定を行い、状態ベクトルの収束過程を示している。

ここで両手法は観測ベクトルの処理方式が異なるので、計算回数比較はむずかしいが、図-10で状態ベクトル推定に対してEK-WLI法も、安定した収束性を示している。

(3) EK-WLI法における重み(W)について

EK-WLI法の各ローカルな繰り返し初期の状態ベクトル推定誤差共分散行列に掛け合わせる重みの値について数値的検討を行う。ここでは重みの値を変えて、状態ベクトル推定値の収束過程を比較している。その結果を

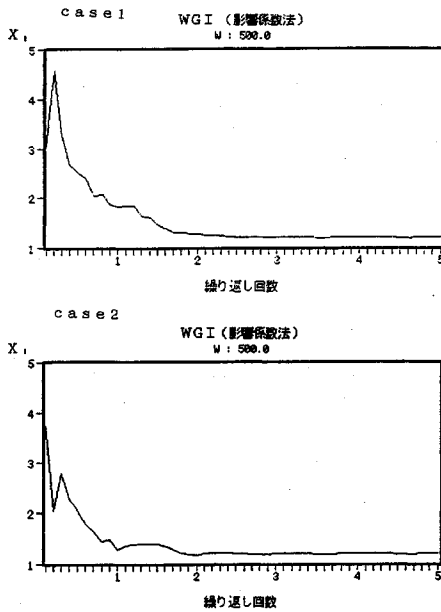


図-11 EK-WGI 法による状態ベクトル推定

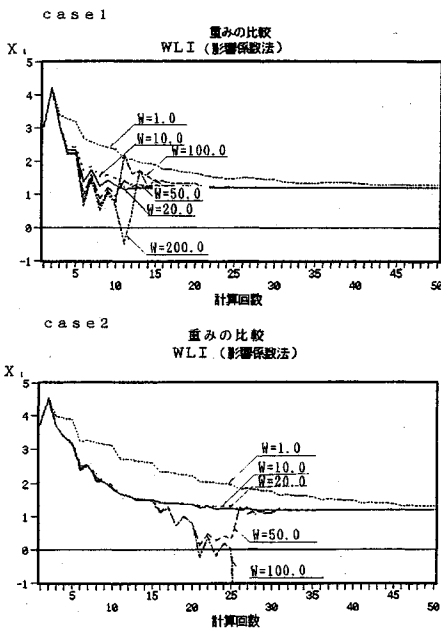


図-12 重みによる状態ベクトル収束過程

図-12 に示す。

図-12 より、EK-WLI 法における重み (W) は、状態ベクトルの収束速度を速める効果があり、今回用いた非線形観測方程式では、重み ($W=10-50$) が最適である。EK-WLI 法における最適な重みは、EK-WGI 法による重みより小さい値を示す。これは、EK-WLI 法では、各ローカルな繰り返し時に重みを状態ベクトル推定誤差共分散行列に乗じており、EK-WGI 法の重みを掛け合

わせる回数より多いことも要因の 1 つであると言える。

6. 結 論

拡張カルマンフィルタにおける状態ベクトル推定アルゴリズムの検討と非線形観測方程式の影響の考察を行った結果、拡張カルマンフィルタによる状態ベクトル推定に際して観測方程式の非線形性と、状態ベクトル推定誤差共分散行列の減少が、状態ベクトル推定に影響をおよぼすことが明らかになり、この 2 つの要因の影響を修正する手法として、拡張カルマンフィルタ重み付きローカルな繰り返し法 (EK-WLI 法) の提案を行っている。

この手法は、拡張カルマンフィルタの観測ベクトルの逐次処理の特性を生かした手法であり、状態ベクトル推定に際し安定した収束結果が得られている。またこの EK-WLI 法は、影響係数法により順解析可能なプログラムとの組合せが可能である。

今後は、EK-WLI 法を用いて順解析可能なプログラム (有限要素法) と組み合わせて、地盤を対象とした逆解析の検討を行う予定である。

最後に、本研究は第二著者の指導のもとで第一著者が行ったものであり本論文の数値計算および結果の整理にあたっては、武威工業大学学生佐久間和弘君の協力を得ている。

APPENDIX 1

ガウス-ニュートン法の反復公式

$$\{X(i+1)\} = \{X(i)\} - q(i) \{d(i)\} \quad (A-1)$$

$$\{d(i)\} = [D(i)]^{-1} \{q(i)\} \quad (A-2)$$

$$[D(i)] = [H]^T [H] = [u(i)/\{x(i)\}]^T [u(i)/\{x(i)\}] \quad (A-3)$$

$$\{q(i)\} = [H]^T (u(i) - u^*)^{-1} \quad (A-4)$$

X : パラメータ値

i : 反復回数

$[H]$: JACOB 行列

u^* : 観測値

APPENDIX 2

拡張カルマンフィルタ重み付きグローバルな繰り返し法 (EK-WGI 法)

拡張カルマンフィルタ重み付きグローバルな繰り返し法は、推定初期条件 $X(t_0|t_0)$ および $P(t_0|t_0)$ を用いて、一度拡張カルマンフィルタで観測ベクトルすべてに対し状態ベクトルの推定を行う。さらに 1 回の拡張カルマンの適用で安定した結果が得られない場合には、2 回目以降のグローバルな繰り返しの初期条件として置き換え、再び拡張カルマンフィルタで状態ベクトル推定を行う。このグローバルな繰り返し時において、状態ベクトル推

定誤差共分散行列に重み (W) を乗ずる手法である。

参 考 文 献

- 1) Hoshiya, M. and Saito, E. : Structural Identification by Extended Kalman Filter, Jour. of Eng. Mech., ASCE, Vol. 110, No. 12, December, 1984.
- 2) Hoshiya, M. and Saito, E. : Linearized Liquefaction Process by Kalman Filter, Jour. of Geotech. Eng., 112, ASCE, Feb, 1986.
- 3) Hoshiya, M., Kodama, K. and Sakai, K. : Identification of horizontal subgrade reaction by EK-WGI method, Proc. 1st East Asian Conf on Struct. Eng. and Construction, pp.1664~1675, 1986.
- 4) Hoshiya, M. and Maruyama, O. : Identification of a Running Load and Beam System, Jour. of Eng. Mech., ASCE Vol.113, No.6, ASCE, June, 1987.
- 5) Hoshiya, M. and Maruyama, O. : Identification of a Restoring Force Model by EK-WGI Procedure, The 3rd International conference on Soil Dynamics and Earthq. Engineering, Princeton, U.S.A., June, 1987.
- 6) 丸山 収・相沢 旬・星谷 勝 : ARMA モデルによる既存構造物の動特性の同定, 土木学会論文集, Vol. 416, pp. 439~447, 1990.
- 7) Toki, K., Sato, T. and Kiyono, J. : Identification of Structural Parameters and Input Ground Motion from Response Time Histories, 土木学会論文集, Vol. 410, pp. 243~251, 1989.
- 8) 村上 章・長谷川高士 : Kalman フィルタ有限要素法による逆解析と観測点配置, 土木学会論文集, Vol. 388, pp. 227~235, 1987.
- 9) 斉藤悦郎・古賀重利・鎌田正孝 : 拡張カルマンフィルタ一支援による山留め工事計測管理手法, 土木学会論文集, Vol. 391, pp. 115~124, 1988.
- 10) 門田俊一・斉藤悦郎・和久昭正・後藤哲雄 : 繰り返し拡張カルマンフィルタによる異方性岩盤物性の同定と地下空洞計測管理への適用, 土木学会論文集, Vol. 406, pp. 107~116, 1989.
- 11) 鈴木 誠・石井 清 : 拡張カルマンフィルタによる土質定数の空間分布推定, 土木学会論文集, Vol. 406, pp. 71~78, 1989.
- 12) Jazwinski, A. H. : Stochastic process and filtering theory, Academic Press, pp.266~286, 1970.
- 13) 斉藤悦郎 : EK-WGI 法の開発と振動工学における同定問題への応用に関する研究, 学位論文, 武蔵工業大学, 1986.
- 14) W.G-W, Yeh, Review of Parameter Identification Procedures in Groundwater Hydrology : The Inverse Problem, Water Resources Research, 22 (2) : pp.95~108, 1986.

(1991.1.18 受付)

A BASIC CONSIDERATION ON AND A NEW LOCAL ITERATION METHOD OF EXTENDED KALMAN FILTER

Atushi SUTOH and Masaru HOSHIYA

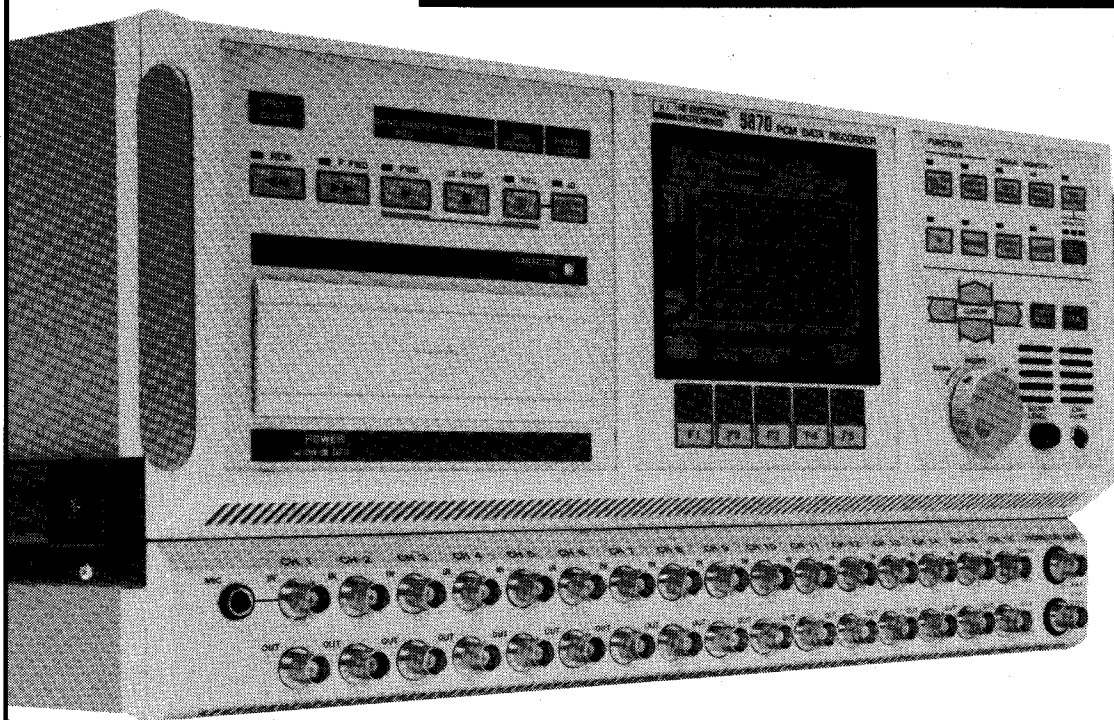
This study consists of the following two topics : one is a basic consideration on the extended kalman filter in identification problems, and the other is a proposal of a new local iteration procedure called Extended Kalman filter-weighted local iteration method (EK-WLI method).

In the former study, roles of each factor involved in the kalman filter algorithm was clarified using a two component state vector equation.

In the latter one based on the results of the former study, a local iteration procedure was developed which was found to be effective in reducing the error due to the linearization of the observation equation on the identified state vector.



データレコーダ異変。



最長記録時間は120日。しかも、そのデータを、
わずか2時間53分で高速再生！
「5870PCMデータレコーダ」は、
データレコーダを、突然、変えました。

5870PCMデータレコーダ

●DAT技術を応用した16ビットPCM方式データレコーダです。●S/N(信号対雑音比)は70dB(約3000倍)以上と、データの信頼性は抜群。●新開発の時間軸変換回路で、最高1/1000~1000倍の時間軸変換が可能。その結果、最長記録時間は2880時間。このデータを1000倍のスピードで高速再生することができます(2時間用のDATテープの全長を録・再独立に2時間53分から2880時間の間で使用可)。●サンプリングは16チャンネル同時。サンプリング周波数は最高48kHz。●総容量64kワードのウェーブメモリを内蔵。●見やすい大型のディスプレイ。●GP-IB標準装備でコンピュータ解析も容易。●コンパクトなDAT用テープの採用により、データの保存に場所をとりません。



●お問い合わせはお気軽に。
045-545-8111

エヌエフ

株式会社エヌエフ回路設計ブロック

横浜市港北区綱島東6-3-20 〒223 TEL. 045(545)8111
札幌 011(281)4120 仙台 022(274)6101 長野 0262(27)7591 水戸 0292(52)4411
北関東 048(652)5391 千葉 0472(43)3161 西東京 0425(29)2151 名古屋 052(777)3571
大阪 0726(23)5341 広島 082(263)8431 福岡 092(411)4301

データ解析に、新しい手がかりを提供するが、エヌエフの「5870PCMデータレコーダ」。

世界標準のソフトウェア

Mr. SOIL

Version-2.5

■豊富な機能

- 弾性及び弾塑性解析が可能。
- 掘削・盛土機能により、施工ステップにしたがった解析が可能。
- 荷重の段階的載荷が可能
- 側圧係数の指定が可能*
- 充実したグラフィック機能
変位ベクトル図*、変位コンター図*
応力ベクトル図、応力コンター図
棒・梁要素断面力図*
降伏要素プロット図*

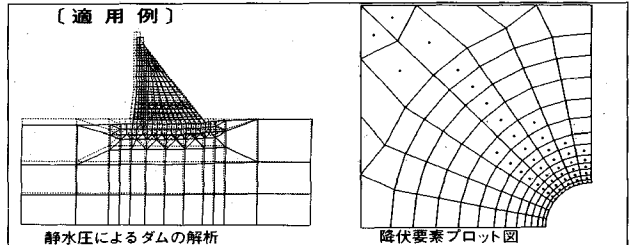
*はV.2.5による追加機能

■お求めやすい価格設定

パソコン版(PC-9801シリーズ).....64万円(税別)

EWS版(NEWS, SUN, HP, VAX など).....220万円(税別)

■実績が示す高信頼性(使用実績187本 平成2年度8月末現在)



(株)アースコンサルタント アイドールエンジニアリング(株) (株)葵エンジニアリング (株)荒谷建設コンサルタント 石川工業高等専門学校 (株)ウエスコ 上山試験工業(株) 運輸省港湾技術研究所 (株)エイトコンサルタント (株)NTT鈴鹿電気学園 (株)オリエンタルコンサルタンツ (株)応用地学研究所 大阪大学 大阪市交通局 大阪市立工業研究所 (財)大阪土質試験所 大阪府立工業高等専門学校 大阪府立大学 岡山大学 岡山大学 (株)奥村組 技術研究所 奥村組土木興業(株) 小田急建設(株) 小野田ケミコ(株) 小野田ケミコ(株) 鹿児島大学 梶谷エンジニア(株) 鹿島建設(株) 金沢大学 金沢大学 川崎地質(株) 関西電力(株) 岩水開発(株) 関西航測(株) (株)基礎建設コンサルタント 関西大学 九州共立大学 九州産業大学 九州産業大学 九州産業大学 九州大学 九州電技開発(株) 京都市立伏見工業高等学校 京都大学 京都大学 京都大学 協和電設(株) 近畿実測(株)	近畿大学 近畿大学 近畿大学 岐阜工業高等専門学校 久保田建設(株) (株)熊谷組 (株)熊谷組 (株)建設企画コンサルタント (株)建設工学研究所 神戸大学 神戸大学 神戸大学 興亜開発(株) 佐賀大学 佐伯建設工業(株) 佐田建設(株) 佐藤工業(株) 佐藤工業(株) サンコーコンサルタント(株) 島根大学 (株)CIT構造技術研究所 昭和田地質情報リサーチ(株) (株)新日本技術コンサルタント 新日本製鉄(株) 新技術計画(株) 技術設計部 JR西日本コンサルタンツ(株) (株)住化土建建設 住友建設(株) 住友建設(株) (株)西播設計 (株)ソイルプレーン 促進工事(株) (株)第一コンサルタンツ 大成建設(株) 大成基礎設計(株) 大豊建設(株) 大豊建設(株) (株)ダイヤコンサルタント (株)ダイヤコンサルタント (株)高千穂設計コンサルタント (株)タカラエンジニアリング (株)竹中工務店 玉野総合コンサルタント(株) (株)地崎工業 (株)地盤調査事務所 (株)中央設計技術研究所 中央復建コンサルタンツ(株)	中国電力(株) 中部工事(株) 中部電力(株) 通信土木コンサルタント(株) (株)テノックス 東海大学 (株)東京建設コンサルタント 東京大学 東京地下工事(株) 東京都土木技術研究所 東建地質調査(株) 東鉄工業(株) 東電設計(株) 東電設計(株) (株)東日測量設計社 東邦エンジニアリング(株) (株)東和技術コンサルタント 動力炉・核燃料開発事業団 戸田建設(株) (株)中堀ソイルコーナー 西谷技術コンサルタント(株) 西松建設(株) 技術研究部 日本大学 日本大学 日本鋼管(株) 日本鋼管(株) 日本シールドエンジニアリング(株) 日本工営(株) 日本工営(株) 日本交通技術(株) 日本通信建設(株) 日鉄コンサルタント(株) 日本水工設計(株) 日本道路公団 試験所 (株)日本パブリックエンジニアリング (株)日建技術コンサルタント (株)ニュー設計 八戸工業大学 林建設工業(株) (株)阪神コンサルタンツ 東日本旅客鉄道(株) (株)日立造船技術研究所 ヒメノコンサルタント(株) ヒロセ(株) 福井大学 (株)藤井基礎設計事務所 フジタ工業(株) フジタ工業(株)	(株)復建エンジニアリング (株)復建エンジニアリング 藤原技術士事務所 復建調査設計(株) 不動建設(株) 不動建設(株) 不動建設(株) (株)芙蓉調査設計事務所 北光ジョリサーチ(株) 前田建設工業(株) 前田建設工業(株) 前田設計(株) (株)松村組 三井建設(株) 三菱重工業(株) 明治コンサルタント(株) メトロ設計(株) (株)守商會 山口大学 山口大学 山口大学 (株)四電技術コンサルタント りんかい建設(株) 和歌山工業高等専門学校 和歌山工業高等専門学校
--	---	--	--

(五十音順 敬称略)

土と水の連成逆解析プログラム

未来設計企業
CRC

UNICOUP

応力解析と浸透解析がドッキングした!

軟弱地盤の解析に!

海洋開発・埋立

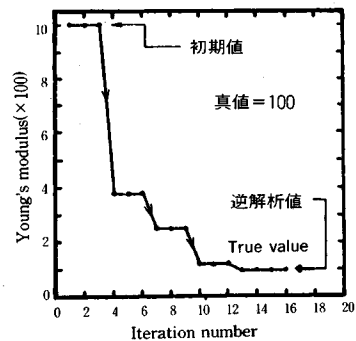
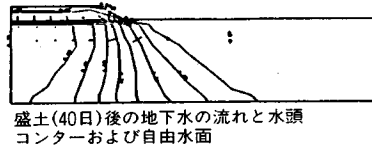
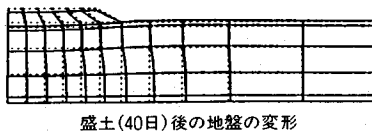
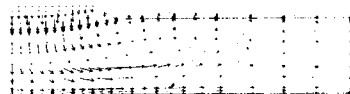
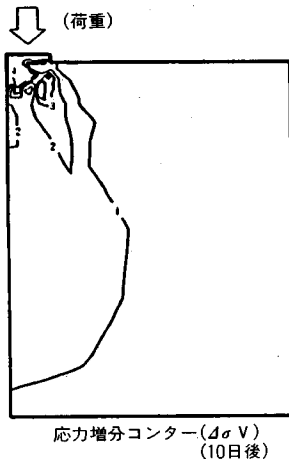
盛土・掘削

出力項目

- 各節点での変位、各要素での応力
- 各節点での全水頭・圧力水頭 他
- 豊富な図化処理
変位図、変位ベクトル図、応力ベクトル図、応力コンター図、安全率コンター図、水頭コンター図、圧力水頭コンター図

プログラムの特長

- 応力と地下水の流れをカップルさせた問題が解析可能です。(圧密含む)
- 地下水の流れは飽和・不飽和域を対象としています。
- 多段掘削・盛土や降雨等が扱えます。
- 梁や連結要素も扱え実用的です。
- 経時観測記録(変位・水位)があれば、非線形最小二乗法に基づき変形係数や透水係数が逆解析できます。(順解析、逆解析がスイッチにて選択可能です。)
- 弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤が扱えます。
非線形弾性(電中研式、ダンカン・チャンの双曲線モデル)
弾塑性(ドラッカー・ブラガー、モール・クーロン、カムクレイモデル、ハードニング、ソフトニング)
弾粘塑性(関口・太田モデル)



ヤング率と繰り返し回数
の関係
逆解析によるパラメータの推定

このシステムは、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。

IPA 情報処理振興事業協会

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

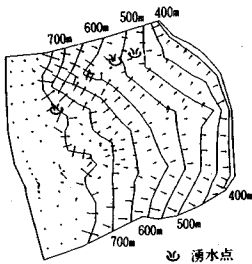
問合せ先

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06-241-4121) 営業担当: 岩崎

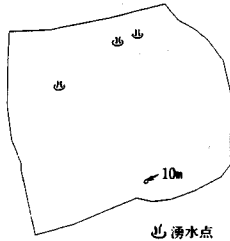
あの地下水解析ソフトがさらに機能充実!

UNISSE_{ユニセフ}(V-2)

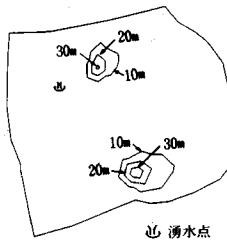
スピーディな同定・安価な解析



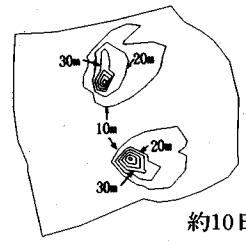
初期状態の地下水流



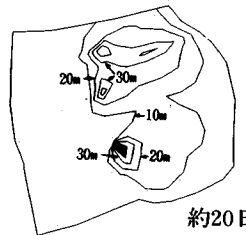
トンネル掘削開始直後



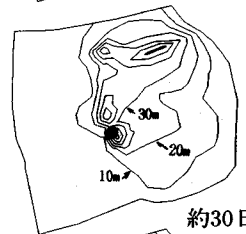
約4日後



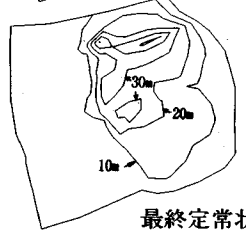
約10日後



約20日後



約30日後



最終定常状態

特長 ○有限要素法による準3次元解析を中心とした地下水の流れのトータルシステムです。

○観測水位と計算水位より、非線形最小二乗法を用いて帯水層定数の同定が可能です。(逆解析手法)

○建設・土木工事(掘削・ディープウェルその他)の解析に対応する多くの機能を備えています。

○メッシュ・ジュネレータにより、モデル(要素分割)作成の手間を軽減できます。

○図画処理プログラムにより、結果の確認が容易に行えます。

適応機種: SUN, NEWS, HP,
IBM 30XX, FACOM-Mシリーズ 他

このシステムは、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。

IPA 情報処理振興事業協会

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06)241-4121 営業担当: 岩崎

個別要素法プログラム **CRC**

CRC-ITASCAが提供するカンドールモデル個別要素法(DEM)!!

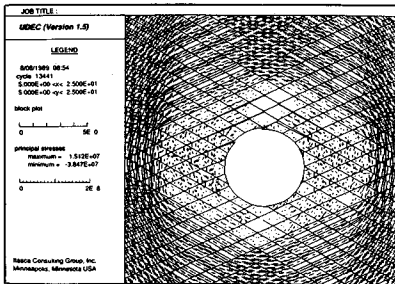
二次元個別要素法プログラム(ソースコード)



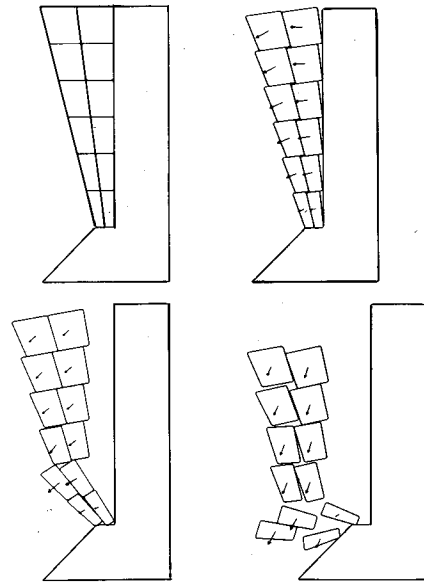
三次元個別要素法プログラム(ロードモジュール)



個別要素法とは、1971年にDr. P. Cundallが発表した不連続体に対する動的崩壊過程をシュミレートするための解析手法です。すなわち、岩盤をジョイントとブロックから構成される岩石ブロックの集合体と考え、個々のブロックの挙動を時々刻々に追跡し、全体挙動を解析しようとするものです。集合体としての岩盤や地盤が最終的に、安定状態となるのか、あるいは大変形するのか、崩壊していくのかなど、時間の経過に伴うモデル全体のブロックの動きや破壊の進行の様子を視覚的に追跡できます。現在、岩盤・地盤の崩落や安定性の解析など、不連続体力学の有力な解析手法となっています。



大深度地下掘削時の安定解析



岩盤斜面崩落シミュレーション

- 岩盤の転倒・滑落解析
- 岩盤の掘削解析
- 不連続性岩盤の安定解析
- 地震応答解析
- 浸透一ブロック連成解析(UDEC)
- 熱一ブロック連成解析(UDEC)

- 販売条件**
- UDEC・3DEC**
- ◆ EWS, SUN-SPARC, HP, SONY-NEWS
 - ◆ IBM-PC/AT及び互換機
 - ◆ UDECはソースコードで提供します。
 - ◆ 3DECはロードモジュールで提供します。

より現実的な解析を！

未来設計企業
CRC

任意形状臨界すべり面自動決定プログラム

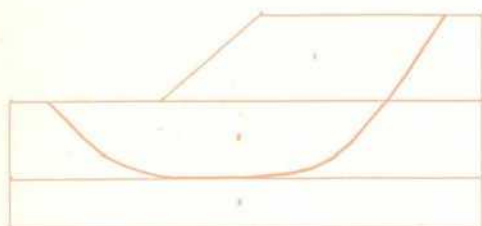
Mr. 一番すべり

(平成3年10月新登場)

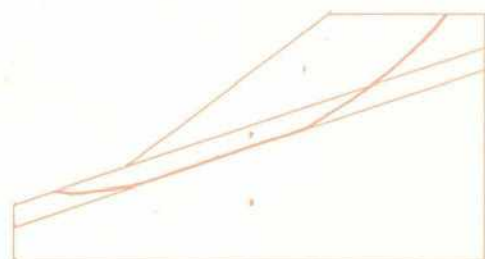
・概要

Mr. 一番すべりは、簡易 Janbu 法に基づき任意形状臨界すべり面位置を自動的に探索し、安全率を計算する斜面安定解析プログラムです。また、操作性が良く、グラフィックやプロッタ出力も充実しています。

- ・ 適応機種 NEC PC9800シリーズ
- ・ 価格 50万円(税別)
- ・ 適用例



軟弱地盤上の盛土



傾斜地盤上の盛土

新発売キャンペーン

平成3年12月20日までに御注文のお客様には、
40万円(税別)にて御提供致します。

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当: 岩崎