

拡張カルマンフィルター支援による 山留め工事の計測管理手法

EXECUTION OF EXCAVATION WORKS BASED ON DATA
SUPPORTED BY EXTENDED KALMAN FILTER

斎藤 悅郎*・古賀重利**・鎌田正孝***
By Etsuro SAITO, Sigenoshi KOGA
and Masataka KAMATA

The purpose of this study was to develop an observational control system for executing excavation works using data based on minimum measurements. Here, method of analysis and results of verification based on measurement are shown. The analytical procedure consists of 3 stages; analysis under present condition for estimating wall displacement and bending moment, back analysis for estimating lateral pressure and coefficient of horizontal subgrade reaction and prediction analysis based on these assumed parameters. The use of the extended Kalman filter of control theory is a spacial feature of the back analysis which has a greatest importance relative to the purpose of this study.

Keywords : extended Kalman filter, excavation works, measurements

1. はじめに

山留め構造の挙動は、多くの実践的研究や理論的研究がなされ、設計段階においてかなり実状に近い値として予測できるようになった。しかしながら、地質構成の条件、地下水の排水条件また山留め壁・支保工および掘削等の施工条件等々の、設計段階では詳細に考慮できぬ条件が重なりあって、設計時の予測値と実際との違いが生じる場合がある。現在では、これに加えて大規模な掘削工事や都市密集地の悪条件での工事が多くなった状況等により、安全性の高い施工を進めるうえで施工中の挙動を的確に把握することが特に必要となっている。ここで意図する情報化施工¹⁾は、現場計測により時々刻々と変化する工事の状況を把握し、これに基づいた設計条件の見直しや次期予測値の情報をもとに、工事を従来より安全にかつ経済的に行うことの目的としたものである。

現在では、計測センサーの精度の向上または計算機の急速な進歩により、多量の計測データの収集や計算処理

が施工現場で可能となり、処理情報を施工に迅速にフィードバックできることから、このような情報化施工が現実のものとなっている。

山留め構造の施工中の挙動把握また安全管理のための計測項目としては、山留め壁の状態を知る、壁体傾斜角およびひずみ計測、また山留め壁に作用する外力の状態を知る、土圧・水圧および切ばり軸力の計測等がある。これらすべての計測項目に対して適切な位置で正確に計測がなされれば、管理基準値を通して現掘削段階での安全性の評価およびこれらの計測値をもとに解析した次期掘削段階の予測値に対する安全性の評価が可能となるものと思われる。しかしながら、これらすべての計測を実施するためには、かなりの費用を必要とすることから、大規模な工事や悪条件の工事といったように対象工事が限定されるのが現状である。一般には、山留め構造の安全管理のために、山留め壁の傾斜角および切ばり軸力のみの計測を行うことが多い。

本論文は、上述の山留め壁の傾斜角および切ばり軸力のみの簡便な計測データをもとに壁体変位および曲げモーメントの推定（現状解析1）、背面側側圧および水平方向地盤反力係数の推定〔現状解析2（逆解析）〕および次期掘削段階の切ばり軸力・壁体変位および曲げモーメント等の予測（予測解析）を施工現場において迅速にか

* 正会員 工博 フジタ工業（株）技術研究所研究企画室
(〒223 横浜市港北区大船町74)

** 正会員 フジタ工業（株）技術研究所第一研究部土木施工研究室長（同上）

*** 正会員 工博 フジタ工業（株）技術研究所第一研究部長
(同上)

つ使用性よく解析する方法をシミュレーションデータおよび実測データを介して示すものである。

解析法の特徴は、現状解析1では、従来から用いられている多項式近似による関数微積分に対し、項数による影響の小さいスプライン関数²⁾を用いた点、また簡便な計測による情報化施工において最も重要な位置づけとなる逆解析では、現場計測データを統計量としてとらえ、確率論的な非線形最適化手法すなわち拡張カルマンフィルター^{3),4)}を用いて定式化の工夫を行った点である。

簡便な計測による山留め工事の情報化施工システムの概要是、図-1に示すようである。すなわち

① 計測データを用いて、現状解析1および現状解析2により現掘削段階での山留め架構挙動を解析し、あらかじめ定められた管理基準値とともに安全性の評価、またその結果に応じた対策を講じる。

② ①で推定した現掘削段階での山留め架構の状態をもとに予測解析を介して次期掘削段階での挙動を予測し、管理基準値をもとに次期掘削時の安全性の評価およびその結果に応じた計画変更等の対策を講じる。

③ ①、②の結果または対策に基づき次段階の施工を進める。

以上のように簡便な計測による情報化施工が可能であれば、その本来の目的とともに

- 多くの施工現場において適用が可能で詳細に検討できること
- 側圧や壁体ひずみ等も計測されている場合においても、本方法を併用することにより同じ物理量を多方面からの検討ができる

表-1 柱状図および諸定数

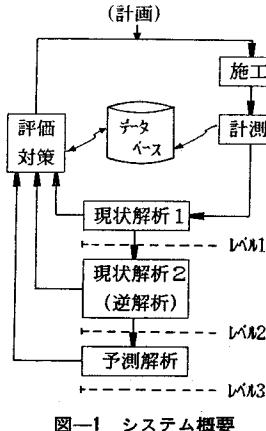
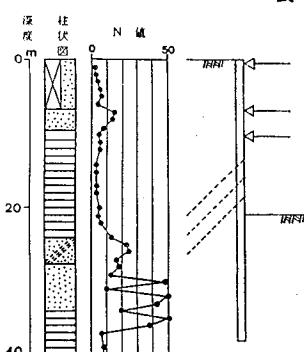


図-1 システム概要

などの利点がある。

本論文 2.~4. の計算例に用いる実測データは、以下に示す掘削工事の 5 次掘削終了時（掘削深度 GL -16.5 m）によるものとした。掘削工事は、掘削面積 4000.0 m²、掘削深さ GL -20.0 m であり、その山留め壁は RC 連続地中壁（幅 1.0 m、壁長 38.0 m）、また支保工は、第1段～第3段において、SRC ばかり、第4段～第6段においては、アースアンカー工法を採用したものである。地質構成は、地表面より GL -9.0 m 付近までが盛土および砂層の埋立て地盤であり、その下部 GL -21.0 m 付近までが非常に軟弱な N 値 4 程度の上部沖積層が厚く分布している。また GL -21.0 m 以深は、粘性土と砂層の互層で N=10~50 と締まっている。表

表-2 計測項目

計測項目	センサー及び位置
地中壁に関するもの	
側圧	土圧計、2m~3m ピッチ
水圧	水圧計、2m~3m ピッチ
内部応力	鉄筋計、2m ピッチ
傾斜角	固定式傾斜計、2m ピッチ
支保工に関するもの	
切欠応力	鉄筋計、ひずみ計
腹起し応力	鉄筋計、ひずみ計
アンカー張力	荷重計
切欠の温度	温度計

2. 現状解析 1

壁体の傾斜角データから変位および曲げモーメントを推定するためには、主に以下に示す 3 項目のデータ処理が必要である。

① 計測時に生ずるノイズおよびヒューマンエラー、異常値等の補正

② 計測点が少ない場合の補間

③ 他の物理量への変換（微分積分等）

傾斜角データからの変位推定は、壁体先端境界条件の仮定のもとに数値積分により求める方法が一般的である。また曲げモーメントの推定では、壁体曲げ剛性の仮定のもとに、ばらつきが少ない傾斜角データの場合には数値

微分により、またそのばらつきが大きい場合には、数学モデルとして多項式を用いその係数を二乗誤差最小の規範により近似関数を求め関数微分により行われるのが一般的である。

多項式近似の場合は、データ点数に対して低次の多項式を用いると、項数の相違により最大値の位置が異なるなど近似関数の形状全体へ影響を及ぼし、その近似多項

式の微係数の分布は、項数の相違により大きく異なることは明らかである。また項数を増やして近似度を高めると、端部付近で振動現象が生ずるなど最良の項数を決定することはきわめて難しい。

②および③のデータ処理のために用いたスプライン関数²⁾は近年 CAD 等に広く用いられている関数で、節点においてその連続性を保証した区間多項式であり、近似多項式と比べ項数による全体系への影響が小さいこと、端部における振動現象がほとんどないこと、また低次数でよい近似ができること等の特徴がある。このような特徴から、スプライン関数近似は、計測データに対する処理方法（カーブフィッティング、微分、積分等）として有効な手法であるものと思われる。

ばらつきが大きい計測データの近似曲線を求める場合には、節点を測定データ区間に適当に定め、最小二乗規範に基づき平滑化を行い最良のスプライン近似曲線を推定するのが最良であろう（たとえば B-スプライン関数）。しかしながら節点の位置によりその近似が悪くなる場合がある等の理由から、ここではばらつきが大きい計測データに対し前処理としてハニングのウインドウ⁵⁾によりスムージング（①の処理）を行い、そして節点と計測位置を等しく置き、3次のスプライン関数により計測データ処理を行った。

3次のスプライン関数は、

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

ここで、 $x_i \leq x \leq x_{i+1}$, $i=1, 2, \dots, n-1$

(x_i, y_i) ：計測データの座標

$(y_i = f(x_i))$

で示され、1階および2階の導関数 $S(x)', S(x)''$ が連続である条件式を用いて未知定数 C_{ij} を求め3次のスプライン関数 $S(x)$ が決定できる。

また、ハニングのウインドウによるスムージングは、

$$\theta_{i,j+1} = 0.25\theta_{i-1,j} + 0.5\theta_{i,j} + 0.25\theta_{i+1,j} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 i ：計測位置、 j ：スムージング回数、

$\theta_{i,j}$ ：計測位置 i 点の j 回目の補正值

として示されるものである。

（1）壁体の曲げ剛性および曲げモーメント

壁体に生ずる曲げモーメントは、傾斜角データのスプライン関数近似式に対して、その関数微分により曲率 (ϕ_x) を求め曲げ剛性を評価し推定するものとする。壁体曲げ剛性は、鋼矢板の場合には、カタログ値に対してその継手効率を考慮した値を用いるものとし、RC 連続地中壁の場合には、図-2 の $M-\phi$ 曲線を介してすなわち剛性低下を考慮して、推定するものとした。図中のひびわれモーメント (M_c) は、コンクリートのひびわれ限界ひずみ ε_{ct} より推定し、降伏モーメント (M_y) は、Whitney の式を用いて推定するものとした。また、降

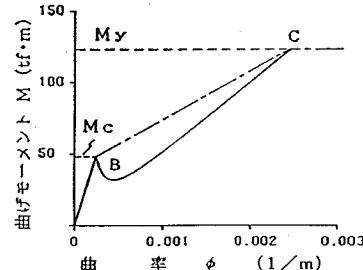


図-2 $M-\phi$ 曲線

伏時の曲率 ϕ_c は、ひびわれ発生後のコンクリート断面においても平面保持を仮定し、ひびわれ限界ひずみより大きなひずみを生ずる引張りひずみ位置ではその応力を無視した $M-\phi$ 曲線 (B, C) と降伏モーメントとの交点により求めた。ひびわれモーメント～降伏モーメント間の $M-\phi$ 曲線は、B, C 曲線によって示される。傾斜角データでは、ひびわれ発生による局所的な曲げモーメントの評価は、難しいものと考えられることから、B, C 区間では、直線とみなした平均的な $M-\phi$ 曲線を用いた。

（2）計算例

図-3 は、計測ピッチ 0.5 m, データ総数 35 点で傾斜角の計測を行ったたわみ性の山留め壁（鋼矢板）の場合の計算結果である。図-3 (a) はスプライン関数（スムージング 1 回）処理の場合で、推定された曲げモーメント分布は、切ぱり位置とよい対応をした分布形状となり、たわみ性山留め壁の連続ぱりとしての挙動が明確に表わされることがわかる。図-3 (b) は、25 次の多項式を用いた場合で、傾斜角に関してはほぼよいカーブフィッティングがなされたものと思われるが、関数微分により曲げモーメントを求めた場合、特に傾斜角の変化が複雑な 1 段切ぱり～3 段切ぱり間では、スプライン関数処理のように、切ぱり位置と曲げモーメント分布の対応がつかないことがわかる。また図示していないが、多項式の次数を 29 次にすると 1 段切ぱり～3 段切ぱり間でもスプライン関数による処理とほぼ同様な曲げモーメント分布の推定が可能であるが、壁体の両端部に振動現象

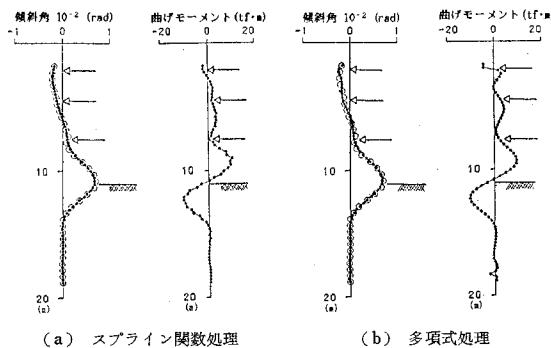


図-3 スプライン関数処理と多項式処理との比較

を生じ分布形状はかなり乱れる。

図-4 は、1. で示した山留め工事の傾斜角データに対する計算結果である。推定した曲げモーメント分布は、鉄筋計から求めた曲げモーメント分布とよい対応を示すことがわかる。

図-5 は、計測データとしてばらつきが大きな計測例を選び、ハニングのウインドウ処理による影響について検討したものである。スムージング回数0回（処理を行っていないもの）では、曲げモーメント分布はかなり乱れ、何らかの補正が必要であることがわかる。スムージング回数を数回以上にするとほぼ安定した分布形状となり、また実測値ともよい対応した分布形状となることがわかる。以上より複雑な傾斜角分布に対して、スプラ

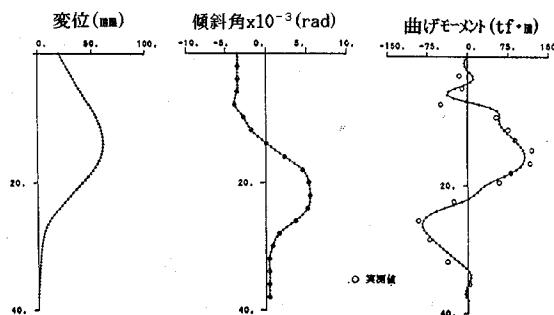


図-4 推定値と実測値の比較

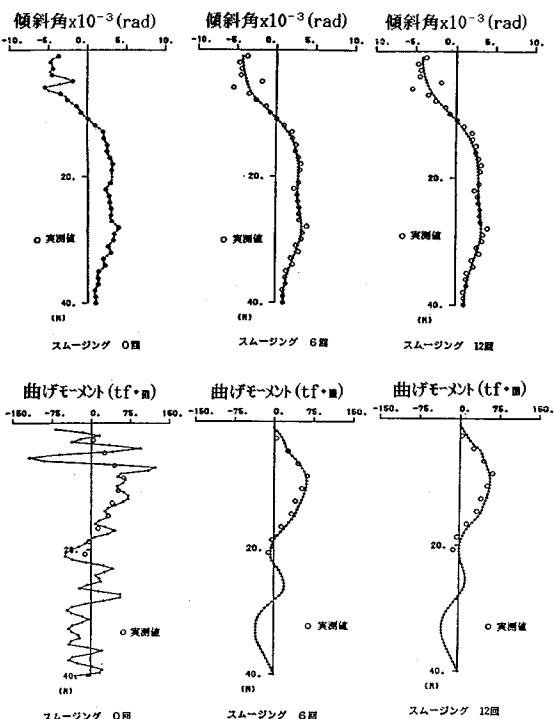


図-5 スムージング回数による推定曲げモーメントへの影響

イン関数は、安定したフィッティングが可能で、また傾斜角データが測定されていれば、鉄筋計より求めた曲げモーメント分布とほぼ同程度の分布が推定可能であることが明らかになった。

3. 現状解析 2（逆解析）

本章では、(2) に示す山留め架構の構造モデル（数学モデル）を基本とし、切ばり軸力および現状解析1によって求めた壁体変位・壁体曲げ剛性の入出力データから、確率論手法の拡張カルマンフィルターによる逆解析手法により背面側側圧および水平方向地盤反力係数の推定を行う。

(1) 逆 解 析

ブラックボックスであるシステム（ここでは、山留め架構）を通過した出力データおよび入力データより、そのシステムの状態を推定するシステム同定は、そのシステムの数学モデルの同定とその数学モデルを決めたことによって生ずる未知パラメーター同定とに分類できる。特に数学モデルがあらかじめ決められる場合にその未知パラメーターを推定する方法を逆解析と一般によばれている。

逆解析の方法は各種提案されているが、基本的には数理計画法の最適化手法により決定論的にデータを取り扱う方法と、ベイズ理論により確率論的にデータを取り扱う方法とに分類できる。またこれらの手法への数学モデルの定式化方法としては、直接定式化法と逆定式化法がある⁶⁾。

直接定式化法は、特別な定式化を必要とせず、対象とする構造系に対してその構造モデルが順解析可能なプログラム（FEM 等）が用意されていればよく、対象構造モデルの適用範囲が非常に広い特徴がある。ここで順解析とは、入力およびシステムの仮定のもとに、出力を求める解析を称するものとする。

一方、逆定式化法⁷⁾は、対象構造モデルの数学モデルを計測データの変数と未知パラメーターとの関係として定式化し直すもので、その定式化が可能であれば、直接定式化法に比べ数値計算時間がかなり短縮できる特徴がある。

以上のように、逆解析手法には、多くの方法があり、対象とする問題およびその使用目的に応じて適切な手法を選択または研究する必要がある。

なお、現場計測による計測データは、室内実験等のデータに比較して、そのばらつきが大きいものと考えられ、このデータを用いた逆解析法としては、確率論を基本においた方法が有効であるものと考えられる。

(2) 山留め架構の構造モデル⁸⁾

図-6 は、k 次掘削の山留め架構モデルを示したもの

である。はりモデルの山留め壁を節点により、要素分割したとき、その節点間の微分方程式は、

地表面～掘削面間にに対して

$$E_{k,i} I_{k,i} (d^4 y_k / dx^4) - (p_{k,i} + q_{k,i} x) = 0 \dots \dots \dots (3)$$

ここで

$E_{k,i}$: k 次掘削、 i 要素の山留め壁のヤング係数
 $I_{k,i}$: k 次掘削、 i 要素の山留め壁の断面 2 次モーメント

x : 要素端から着眼点までの距離

y_k : k 次掘削の変位

$p_{k,i}$: k 次掘削、 i 要素の $x=0.0$ における背面側側圧の大きさ

$q_{k,i}$: k 次掘削、 i 要素の背面側側圧の増加率

掘削面以深では、

$$E_{k,j} I_{k,j} (d^4 y_k / dx^4) + K_{k,j} y_k = p_{k,j} + q_{k,j} x \dots \dots \dots (4)$$

ここで

$K_{k,j}$: k 次掘削、 j 要素の水平方向地盤反力係数

$p_{k,j} + q_{k,j} x$: 背面側側圧から掘削側の静止側圧を差し引いた有効主働側圧

として示される。また、切ばり位置の節点においては切ばりばね ($H_{k,1}, \dots, H_{k,k-1}$) および前掘削時の影響として、 $k-1$ 次掘削の先行変位 ($Y_{k-1,1}, \dots, Y_{k-1,k-1}$)、先行荷重 ($P_{k-1,1}, \dots, P_{k-1,k-2}$) が作用するものとする。

以上のモデルに対して、背面側側圧、水平方向地盤反力係数、切ばりばね、先行変位、先行荷重、山留め壁の曲げ剛性および境界条件を与えることにより、 k 次掘削の切ばり反力、山留め壁の変位、回転角、曲げモーメントおよびせん断力を求めることができる。

なお、掘削側土圧が受働土圧を越えた場合に順解析では、弾塑性計算によりその影響を考慮するのが一般的である。

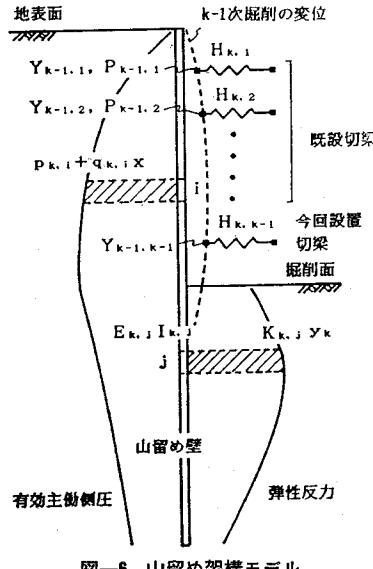


図-6 山留め架構モデル

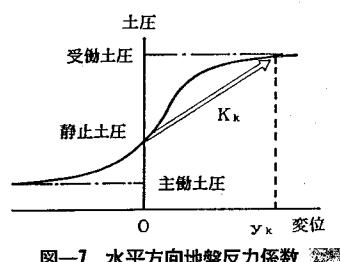


図-7 水平方向地盤反力係数

的であるが、ここでの逆解析用の構造モデルでは、図-7 に示したように等価の水平方向地盤反力係数として推定するものとした。

(3) 拡張カルマンフィルターへの定式化^{3),4)}

式(3)および(4)の山留め架構の構造モデルを

$$P = K\delta \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 P : 外力ベクトル、 K : 剛性マトリックス、 δ : 変位ベクトル

のように示し、式(5)の部分マトリックス、部分ベクトルを

$$\begin{Bmatrix} P_i \\ P_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{N1} & \cdots & K_{NN} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_N \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 P_i : P の部分ベクトル、 δ_i : δ の部分ベクトル K_{ij} : K の部分マトリックス

とする。

次に、計測データとして、任意位置の変位 δ_i 、および任意位置の外力 P_j (ここでは切ばり軸力) が得られるものとし、これらによって作られる観測ベクトルを $\{y\}$ とする。

$$\{y\} = \begin{Bmatrix} \delta_i \\ P_j \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (7)$$

そして、未知パラメーター θ を変数とし、式(5)を $\{y\}$ について展開した式を次式のように示すものとする。

$$y = h(\theta) \dots \dots \dots (8)$$

拡張カルマンフィルターは、線形ダイナミックシステムに対する最適状態推定のカルマンフィルターに対して、より一般的に非線形システムへ適用できるように拡張されたものである。拡張カルマンフィルターの基本式である非線形の状態方程式および観測方程式は、それぞれ式(9)および式(10)のように示される。

$$dX_t/dt = f(X_t, t) + G_t w_t \dots \dots \dots (9)$$

$$y_{tk} = h(X_{tk}, t_k) + v_{tk} \dots \dots \dots (10)$$

ただし、

X_t, X_{tk} : それぞれ連続型、離散型の状態ベクトル

y_{tk} : t_k 時間での観測ベクトル

w_t : 状態方程式に付加されるガウス性ホワイトノイズ $E[w_t w_t^T] = Q_t(t-t)$

v_{tk} : 観測方程式に付加されるガウス性ホワイトノイズ $E[v_{tk} v_{tk}^T] = R_{tk} \delta_{kj} (\delta_{kj}; \text{クロネッカデルタ関数})$

G_t : 換換行列

この基本式に対する最適状態推定の漸化的アルゴリズムは、非線形の状態方程式および観測方程式を非確率関数である規準軌跡のまわりで線形化し、カルマンフィルターのアルゴリズムに代入して構成したものである。すなわち

$$\hat{X}(t_{k+1}|t_k) = \hat{X}(t_k|t_k) + \int_k^{k+1} f[\hat{X}(t|t_k), t] dt \dots \dots \dots (11)$$

本直接定式化法の逆解析によって得られる未知パラメータの推定結果の検証は、以下に示す方法により行った。まず、山留め壁の応力計算に必要な山留め架構モデルおよび作用外力等を仮定し、順解析によって山留め壁の変位および切ばり軸力を求める。この計算結果を仮の計測データとみなし、本手法により山留め壁に作用する背面側側圧および水平方向地盤反力係数の推定を行う。そして求められた推定結果と、仮定した背面側側圧および水平方向地盤反力係数との数値比較により、推定結果の検証を行った。

山留め架構モデルは、図-8(a)に示す4次掘削終了時とした。また、仮定した背面側側圧および水平方向地盤反力係数値は、図-8(a)に示したように、切ばりばね定数は、 $H_{4,1} \sim H_{4,3} = 1.0 \times 10^3 \text{ tf/cm}$ また切ばり位置の先行変位 $Y_{3,1}, Y_{3,2}, Y_{3,3}$ は、それぞれ $6.684 \times 10^{-2} \text{ m}, 1.405 \times 10^{-2} \text{ m}$ および $1.889 \times 10^{-2} \text{ m}$ とした。

図-8(b)は、順解析によって求めた山留め壁の変位および切ばり軸力値を示したもので、図中の2mピッチに○印で示した変位の値を逆解析に用いる変位計測データとした。また切ばり軸力値の計測データは、図中に示した値を用いた。

図-9～図-11は、計測データに含まれるノイズを0.5%と仮定した場合の各繰返し時の未知パラメーターの収束過程および変位計測データ、切ばり軸力計測データとのフィッティング過程を示したものである。5回程度の繰返し計算を行うことにより未知パラメーターは正解値に収束しまた変位・切ばり軸力および曲げモーメントも順次正解値に近づくことがわかる。以上より拡張カルマンフィルターのアルゴリズムのみ(繰返し1回)では、未知パラメーターの推定結果は正解値とかなり離れた値として推定され、また計測データとのフィッティング程度もよくないことがわかる。繰返し拡張カルマンフィルターを用いれば、数回の繰返しにより未知パラメ

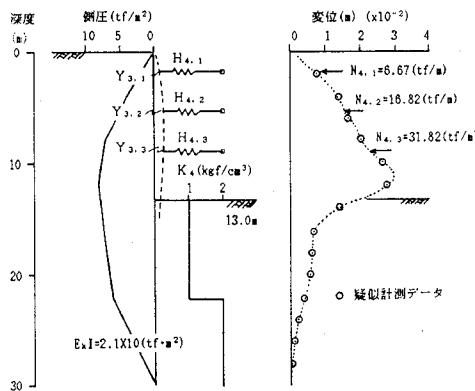


図-8 シミュレーションモデルおよび疑似計測データ

ーターは正解値に収束し、また計測データとのフィッティング程度も非常によいことが明らかになった。

なお、これらの計算における初期の誤差の共分散行列 P_0 は、100(対角項のみ)の値を用いた。

b) 実測データによる検証

1. で示した事例に対する未知パラメーターの初期値は次のように仮定した。掘削面以浅の側圧は、側圧係数0.5とし、掘削面以深では、壁体先端を0.0とした逆三角形分布とした。また水平方向地盤反力係数は、粘性土

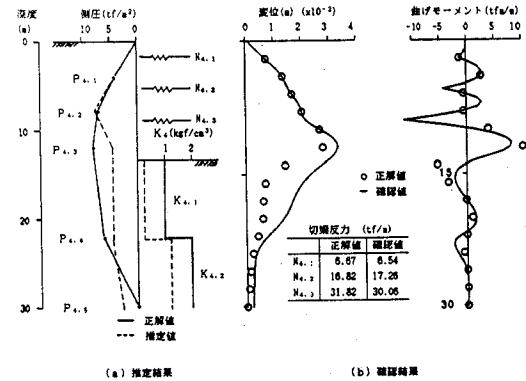


図-9 収束過程(繰返し0回)

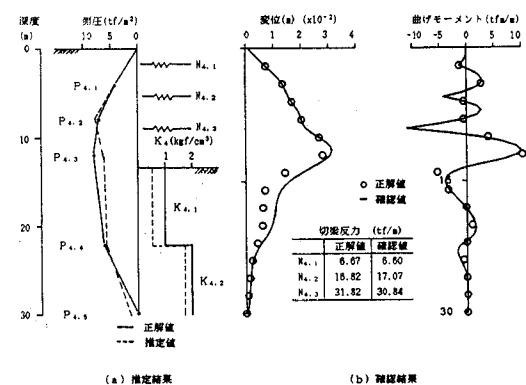


図-10 収束過程(繰返し2回)

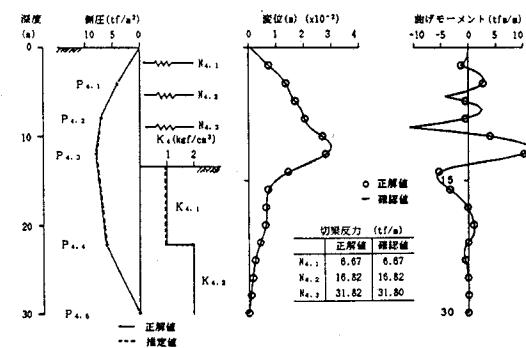


図-11 収束過程(繰返し4回)

に対して $K_h = 0.32 q_u (\text{kgf/cm}^3)$, 砂質土に対して $K_h = (1/16)N (\text{kgf/cm}^3)$ を用いた。計測データに含まれるノイズは、最大変位に対して 10%, 切ばり軸力に対しておのの 10% と仮定し、また未知パラメーターの初期仮定値に対する誤差は、50% と仮定した。これらの値は、本方法の多くの実測事例への適用により経験的に求めたものである。

図-12 は初期仮定値の側圧および水平方向地盤反力係数を用いた場合の、壁体変位、曲げモーメントおよび切ばり軸力を示したものである。また図-13 は、逆解析によって推定した側圧および水平方向地盤反力係数およびこれらの値を用いて計算した壁体変位、曲げモーメントおよび切ばり軸力を示したものである。推定した側圧は、実測側圧とかなりよい一致を示すことがわかる。また、確認値として計算した壁体変位、曲げモーメントおよび切ばり軸力は、初期に仮定した未知パラメーターを用いた場合に比べかなりよく実測値と対応することがわかる。水平方向地盤反力係数値は、粘性土に対して $K_h = 0.32 q_u \times 1/2$ 程度、また砂質土に対して $K_h = (1/16) \sim (1/20)N$ 程度と推定された。

4. 予測解析

拡張カルマンフィルターによる逆解析によって推定する未知パラメーターは、背面側側圧および水平方向地盤

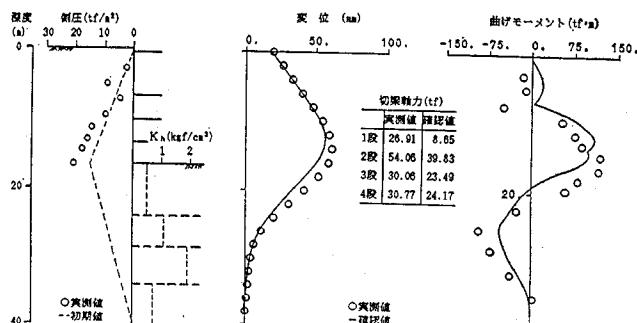


図-12 初期条件を用いた場合の計測データとのフィッティング程度

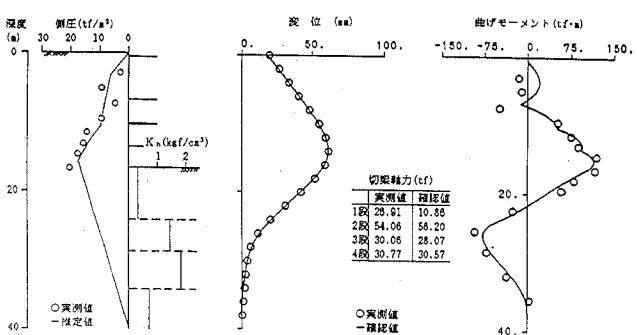


図-13 推定結果および計測データとのフィッティング程度

反力係数である。ここでは、これらの値および以下に示した実測値に基づく条件、掘削による仮定条件を加味して次段階予測解析を行うもので、本来の意味での予測解析とは異なるものである。

山留め壁の曲げ剛性：RC 連続地中壁の場合には 2. で推定した曲げ剛性を用いる。鋼矢板等の場合には、2. で用いた曲げ剛性を用いる。

切ばりばね定数：計算 $[(AE/L)]$, A : 切ばりの断面積, E : 弹性係数, L : 有効長さ] によって求められる切ばりばね定数を用いる。ただし、最下段切ばりの架設時に先行荷重を作成させない場合には、架設による諸条件の影響を理論ばね定数の低下として考慮し用いる¹⁰⁾。

切ばりの先行荷重および切ばり位置の壁体先行変位：両値とも現掘削段階の計測データを用いる。切ばり位置の壁体変位が計測されていない場合には、2. の方法により推定する。

背面側側圧および水平方向地盤反力係数：図-14 は、深度 z_1 から z_2 に掘削した場合の背面側側圧の変化を模式的に示したものである。掘削により変位が δ_1 から δ_2 に変化すると、背面側の側圧は、 p_{1ea} から p_{2ea} と変化するが、 $p_{2ea} = p_{1ea} + k_{0i} r_t (z_2 - z_1)$ (k_{0i} : i 点の静止側圧係数) と仮定した。水平方向地盤反力係数は、 k_{h1} から k_{h2} へと変化するが、 $k_{h1} = k_{h2}$ と仮定した。以上より掘削面以浅の背面側側圧は、3. で推定した値を用い、掘削面以深では、3. で推定した値に掘削による静止側圧の増分を加えて用いる。また、水平方向地盤反力係数は、3. で推定した値を用いる。

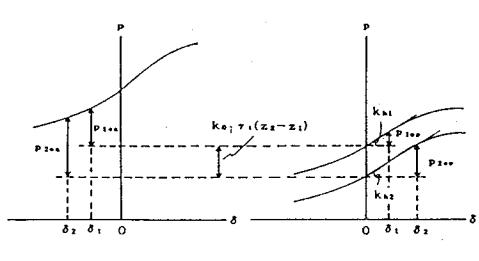
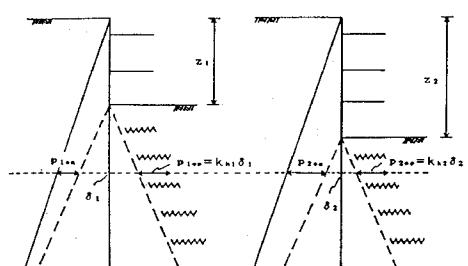


図-14 掘削による側圧および地盤反力係数の変化

(1) 計算例

図-15は、1.で示した事例に対し、2.および3.での推定値とともに、掘削深度 GL -19.0 m の6次掘削終了時の予測結果を示したものである。予測した山留め壁の変位および曲げモーメントは、実測値とよい対応を示すことがわかる。第1段目の切ばり軸力は、実測値と比較してかなり小さな値として予測された。これは、実測データの傾斜角が2mピッチで、山留め壁頂部の計測がなされていないため、仮定値として2.により外挿したデータを用いたことによるものと考えられる。2段目以深の切ばり軸力では、実測データとよい対応を示すことがわかる。

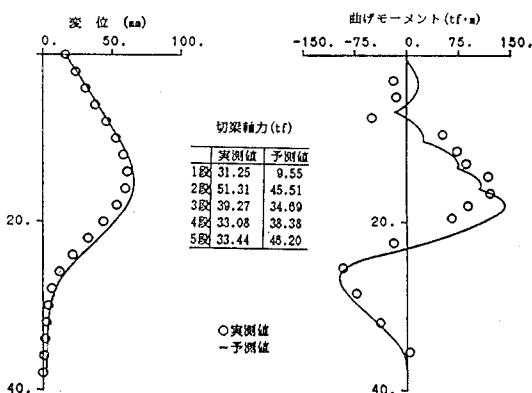


図-15 予測結果と実測値との比較

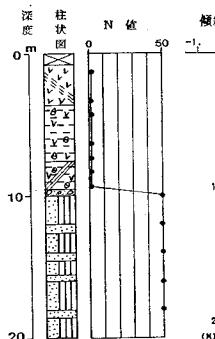


図-16 柱状図

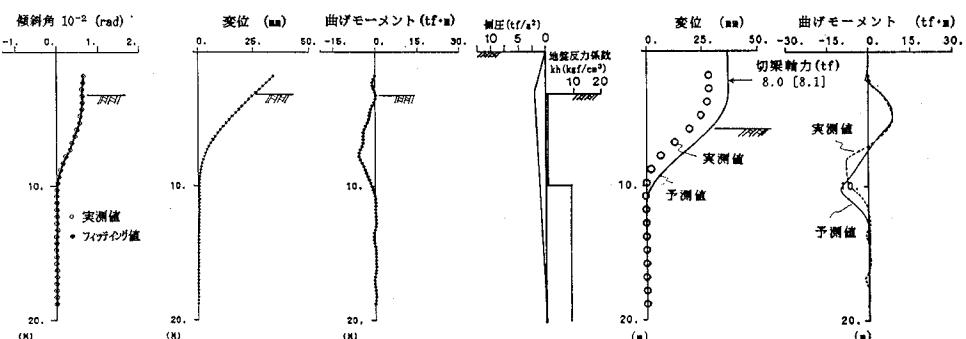
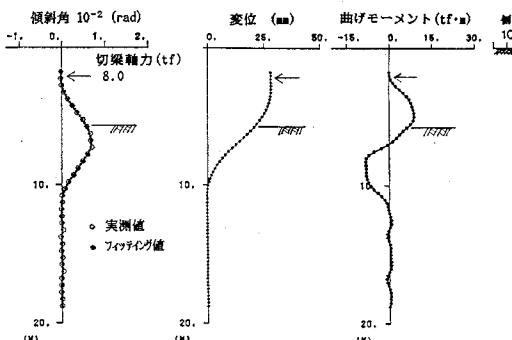


図-17 1次掘削終了時の計測データによる現状解析1・現状解析2および予測解析

5. 適用例⁽¹⁾

山留め工事は、平面規模 11×8 m、掘削深度 GL -16 m である。山留め壁は、鋼矢板IV型で、その立て込みは、先行ボーリングを伴う圧入工法である。当工事場所の地盤は、GL -9.5 m までが腐食物～砂混りシルトの沖積層で、その下には、40 cm 厚程度の洪積砂疊層があり、それ以深は、第三紀の土丹と砂の互層となっている(図-16)。計測項目は、壁体傾斜角および切ばり軸力で、傾斜角の計測は、深さ方向に 0.5 m ピッチとし插入式傾斜計を用いた。

図-17～図-20は、1次掘削終了時～4次掘削終了時における傾斜角および切ばり軸力の計測データを用いて、現状解析 1→現状解析 2→予測解析の一連の解析結果を示したものである。現状解析 1 では、計測データとの近似度を高めても、近似関数の両端部の振動現象は生じないこと、また推定曲げモーメント分布は、切ばり設置位置において一次導関数が不連続となる分布形状すなわちたわみ性山留め壁の連續ばり効果が明確に示されることがわかる。掘削面以浅の側圧分布は、掘削の進行に伴い台形分布に近い形状となり、また水平方向地盤反力係数は、計画時 (GL -9.5 m 以浅で $K_h=0.1 \sim 0.2$ kg/cm³, GL -9.5 m 以深で $K_h=5 \sim 10$ kg/cm³) に近い値が推定された。各図の次段階掘削終了時の予測結果は、次段階の切ばり軸力の実測値および現状解析 1 によ

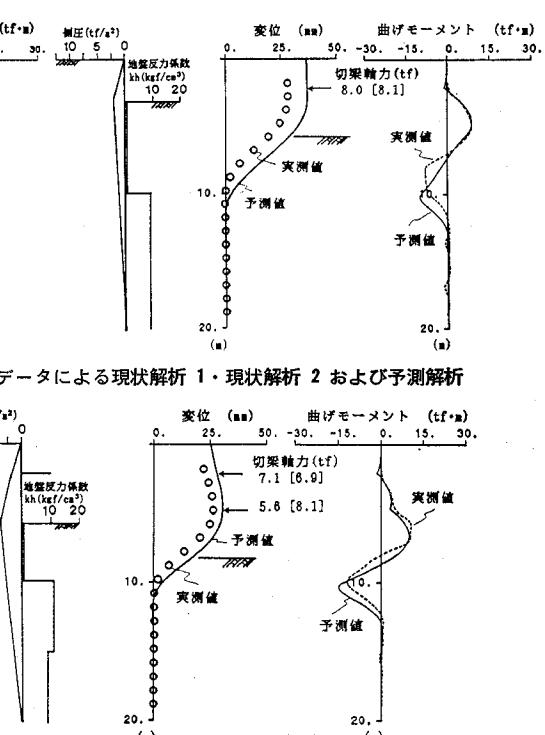


図-18 2次掘削終了時の計測データによる現状解析1・現状解析2および予測解析

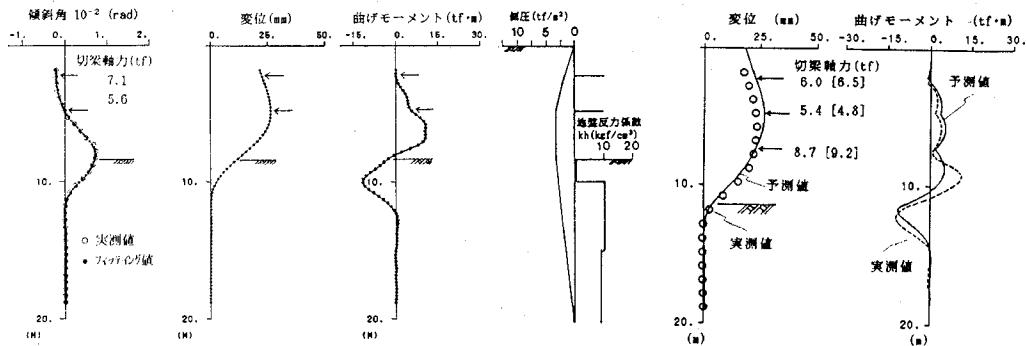


図-19 3次掘削終了時の計測データによる現状解析1・現状解析2および予測解析

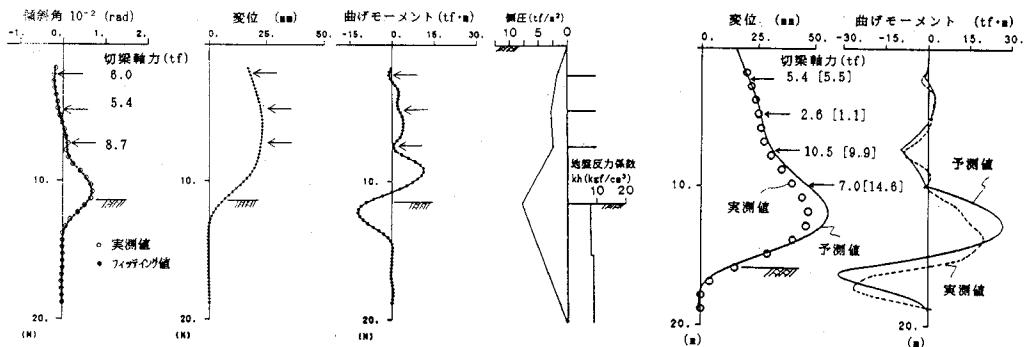


図-20 4次掘削終了時の計測データによる現状解析1・現状解析2および予測解析

って推定した変位、曲げモーメント分布を比較のため併せて示した。変位、曲げモーメントおよび切ばり軸力の予測値は、各掘削時ともほぼよい値として推定されているものと思われる。しかしながら、最下段切ばりの軸力に関しては、切ばり設置時の諸条件等により実測値に対して大きめの値として推定される場合がある。なお、鋼矢板の曲げ剛性は、カタログ値に対して0.45倍¹²⁾を用いた。

6. おわりに

本論文は、上述の山留め壁の傾斜角および切ばり軸力のみの簡便な計測データをもとに壁体変位および曲げモーメントの推定（現状解析1）、背面側側圧および水平方向地盤反力係数の推定〔現状解析2（逆解析）〕および次期掘削段階の切ばり軸力・壁体変位および曲げモーメントの予測（予測解析）を施工現場において迅速にかつ安定に解析する方法を示したものである。これらの解析法および一連のシステム（SOCS）はパソコンレベルで処理できるように開発しており、現在この簡易計測による山留め架構の情報化施工システムを用いて、各種施工現場への適用を試み、解析法の安定性とともにデータベース化を計っている。またこれらのデータベースおよび過去のデータベースをもとに山留め架構の安全性評価法についての検討を行っている。

参考文献

- Terzaghi, K. and Peck, R.B.: Soil mechanics in engineering practice, John Wiley & Sons, 1948.
- 吉本・市田：スプライン関数とその応用，教育出版。
- Jazwinski, A.H.: Stochastic processes and filtering theory, Academic Press, 1970.
- Hoshiya, M. and Saito, E.: Structural identification by extended Kalman filter, Jour. of Eng. Mech., ASCE, Vol. 110, No. 12, 1984.
- 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店。
- Gioda, G.: Some remarks on back analysis and characterization problems in geomechanics, Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, April, 1985.
- EK-WGI法による山留め壁の作用外力の同定，土木学会論文集，第380号／I-7，1984.4。
- 中村・中沢：掘削工事における土留め壁応力解析，土質工学会論文集，Vol. 12, No. 4, Dec., 1972.
- William W-G. Yen : Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology : The inverse problem, Water Resources Research Vol. 22, No. 2, Feb. 1986.
- 斎藤・古賀ほか：拡張カルマンフィルター支援による山留め架構の次段階挙動予測，土質工学研究発表会，1987。
- 斎藤・古賀ほか：拡張カルマンフィルター支援による山留め工事の情報化施工，土木学会第42回年次学術講演会，1987。
- 鴻池：鋼矢板壁体の断面剛性に関する実験的研究，土木学会論文集，第373号／VI-5，1986年9月。

(1987.10.5・受付)