

# 拡張カルマンフィルタによる 地盤反力係数・山留め作用側圧の同時推定

小林範之<sup>1</sup>・斉藤悦郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 農修 株式会社フジタ 技術研究所 (〒224 横浜市都筑区大圃町74)

<sup>2</sup>正会員 工博 株式会社フジタ 技術研究所 (〒224 横浜市都筑区大圃町74)

近年、軟弱地盤や都市部での大規模山留め掘削工事など厳しい条件での施工が多くなり、山留め架構の安全性や近接構造物への影響を把握しながら施工を進める情報化施工の需要が急速に増加している。その情報化施工の中で、逆解析は重要な役割を果たしているが、実測データを用いた場合には、観測値との整合性、解の収束性、推定精度の問題など検討する課題は多い。本論文は、地盤反力係数と山留め作用側圧を同時に推定した場合の観測量へのフィッティングおよび収束性の改善を目的として、山留め壁の傾斜角を微分して得られるモーメントを観測量に、側圧を観測量および状態量として取扱った逆解析手法を提案し、その有効性を示した。また、推定結果を利用して、計測時における地盤の挙動を簡便に評価する手法も提案する。

**Key Words** : earth retaining wall, back analysis, extended Kalman filter, observation procedure

## 1. はじめに

山留め架構の設計には、単純梁法<sup>1)</sup>、仮想支点法<sup>2)</sup>のように山留め壁を単純梁として計算する方法や、弾塑性法<sup>3)</sup>などのように山留め壁を連続梁として計算する方法がある。前者は比較的簡単に手計算程度で山留め架構の挙動を算出することができ、中小規模の山留めの設計に用いられる。一方、弾塑性法は大規模な山留めの設計計算手法として広く用いられている。この解析手法は、掘削過程における変形を考慮したものであり、より現実的な山留め挙動を表現できるものである。しかしながら、地盤に対する入力値である山留め作用側圧および地盤反力係数の設定に不確定性が残されており、掘削工事中の山留め架構の挙動は、設計時の予測と異なる場合がある。

山留め掘削工事に対する現場計測<sup>4)</sup>は、こういった地盤特有の不確定性に対処する方法として、軟弱地盤上の盛土工事やNATMによるトンネル工事とともに広く適用されている。特に、山留め掘削工事では、大深度化、大規模化、軟弱地盤での工事、都市部での近接工事など厳しい条件での施工が多くなっているため、計測管理の需要がますます増加している。

また、この現場計測も現状の安全管理にとどまらず、事前把握が困難な設計パラメータを施工途中に推定し、事後設計を繰り返すことによって、最終工程までの安全性などを評価する情報化施工<sup>5)</sup>を実施する場合もでてきている。

逆解析は、このような現場計測データから不確定な物性値などのパラメータを推定するための解析手法として利用される。山留め掘削問題への逆解析の適用は、ここ15年程度である。1970年後半から1980代前半は逆解析手法<sup>6)</sup>そのものの研究や適用性に関する研究が中心であり、多くは情報化施工<sup>7)~12)</sup>への適用およびシステム化に向けての試みである。1980年代の後半になると、その事例研究などに一般的な解析手法として広く利用されるようになり、徐々に実用段階に入ってきたことがうかがわれる。しかしながら、実際の問題への適用に当たっては、計測項目・位置、計測値や逆解析結果の信頼性、計算時間などいくつかの課題がある。最近では、巢元ら<sup>13)</sup>が現場での利用を目的として逆定式化法を用いた山留め逆解析手法を提案し、計算時間の短縮と解の安定した収束を実現している。また、満尾ら<sup>14)</sup>は解の収束性を改善するために、多峰性関数問題や離散的最適化問題の解法であるGA(遺伝的アルゴリズム)を適用した

山留め逆解析手法を提案している。

著者<sup>12)</sup>は、解析モデルに弾塑性法を用い、拡張カルマンフィルタにより水平方向地盤反力係数あるいは山留め作用側圧を推定する逆解析手法を開発し、さまざまな現場の情報化施工に適用してきた。しかしながら、実測値を用いた場合には、①山留め壁の変形とモーメントを同時にフィッティングできない、②地盤反力係数と背面側側圧を同時に推定する場合には発散するなど解の収束が悪い、などいくつかの問題点がある。

本論文では、地盤反力係数と背面側側圧を同時に推定した場合の不安定性、すなわち壁体変位、モーメントおよび切梁軸力といった観測量へのフィッティングおよび解の収束性の改善を目的として、山留め壁の傾斜角を微分して得られるモーメントとランキン・レザール式に代表されるような理論側圧を擬似的な観測データとして採り入れた逆解析手法を提案し、その適用性を検討した。さらに、山留め壁傾斜角と切ばり軸力のみでの簡便な計測データから推定した地盤反力係数を用いて、地盤の塑性域および改良体の健全度を診断する方法を提案した。本論文の構成は、以下のものである。すなわち、2章において、提案する逆解析手法を示し、3章において、シミュレーションデータを用いて解析手法の妥当性を検証する。次に、4章において、逆解析により得られたパラメータを用いて地盤の挙動を評価する方法を提案する。さらに、5章において、軟弱地盤における大規模山留め掘削工事の実測データを用いて逆解析手法の適用性を示す。

## 2. 逆解析手法

### (1) 弾塑性法

本解析の計算モデルは、詳細な山留め設計計算法として一般に用いられる弾塑性法<sup>3)</sup>とした。図-1に弾塑性法の概念図を示す。弾塑性法は山留め壁を連続ばり、切ばりを弾性支承、掘削面以深の地盤を弾塑性バネとし、外力を主働側圧から掘削側の静止側圧を差し引いた有効主働側圧でモデル化する。山留め壁をはりモデルとして要素分割すると、その節点間の微分方程式は次式のように与えられる。

・掘削面以浅および塑性域

$$E_{k,i} I_{k,i} \frac{d^4 y_k}{dx^4} - (P_{k,i} + Q_{k,i} x) = 0 \quad (1)$$

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、

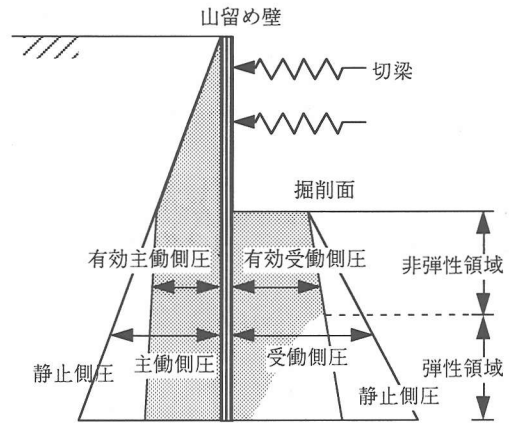


図-1 弾塑性法概念図

$P_{k,i}$  : k次掘削、i要素の $x=0$ 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  
・掘削面以深の弾性域

$$E_{k,j} I_{k,j} \frac{d^4 y_k}{dx^4} + K_{k,j} y_k = P_{k,j} + Q_{k,j} x \quad (2)$$

ここで、 $K_{k,j}$  : k次掘削、j要素の地盤反力係数、 $P_{k,j} + Q_{k,j} x$  : 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

### (2) 拡張カルマンフィルタによる定式化

現場での計測データは室内試験などに比べてばらつきが多いため、データを統計的に処理できる逆解析手法として拡張カルマンフィルタを用いた。

拡張カルマンフィルタの基本式<sup>15)</sup>は、次の式(3)、(4)に示した非線形の状態方程式および観測方程式である。

・状態方程式

$$dx_t / dt = f(x_t, t) + G_t w_t \quad (3)$$

・観測方程式

$$y_{tk} = h(x_{tk}, t_k) + v_{tk} \quad (4)$$

ただし、 $x_t$ 、 $x_{tk}$  : 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、 $\omega_t$  : 状態方程式に付加されるガウス性ホワイトノイズ、 $\nu_{tk}$  : 観測方程式に付加されるガウス性ホワイトノイズ、 $G_t$  : 変換行列式(3)、(4)より $y_{tk}$ の計測データを順次取り込み、カルマンフィルタアルゴリズムを反復すれば、状態ベクトル $x_t$ の最適推定値を求めていくことができる。

山留め逆解析に用いる場合<sup>16)</sup>には、状態方程式は、観測値が同時刻に収録されるため、地盤物性値であ

る状態量 $x_k$ が時間によって変化しないので、状態遷移マトリックス $F_k$ を単位マトリックス $I$ として式(5)で表す。また、式(5)の状態量 $x_k$ について誤差は混入しないものと考えて、ノイズは無視している。一方、観測方程式は荷重-変位関係からなる山留め架構の構造モデルを、状態量 $x_k$ を変数として観測ベクトル $y_k$ について展開し、ノイズを与えた式(6)となる。

・状態方程式

$$x_{k+1} = \begin{Bmatrix} E_{pi} \\ K_{hj} \end{Bmatrix} = I x_k \quad (5)$$

ただし、 $E_p$ : 未知パラメータとなる背面側側圧 ( $k \times 1$ )、 $K_h$ : 未知パラメータとなる水平方向地盤反力係数 ( $1 \times 1$ )、 $I$ : 単位行列

・観測方程式

$$y_k = \begin{Bmatrix} \delta_i \\ P_j \\ M_1 \\ E_{pm} \end{Bmatrix} = h(x)_k + v_k \quad (6)$$

ただし、 $\delta$ : 変位 ( $m \times 1$ )、 $P$ : 切ばり軸力 ( $n \times 1$ )、 $M$ : モーメント ( $o \times 1$ )、 $E_p$ : 背面側側圧 ( $k \times 1$ )

状態量は未知パラメータである地盤反力係数、背面側側圧をとった。通常山留め逆解析の観測量には、山留め壁の傾斜角を積分して得られる山留め壁の変位と切ばり軸力が採用されることが多いが、地盤反力係数と背面側側圧の同時推定が可能となるように、山留め壁のモーメントと背面側側圧を擬似的な観測データとして加えた。ここで用いる山留め壁のモーメントは、山留め壁の傾斜角を3次のスプライン関数で近似し、関数微分により曲率 $\phi_x$ を求めて、曲げ剛性をかけ合わせたものである<sup>12)</sup>。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ぎ手効率を考慮した値を用いることとし、RC連続壁の場合には $M-\phi_x$ 曲線を介して剛性低下を考慮したものである。また、背面側側圧は、設計に用いられるランキン・レザール式に代表されるような理論側圧とした。推定する地盤反力係数や背面側側圧の値は山留め壁の変形に依存し、特にその変曲点のフィッティング状況は推定精度に大きく影響する。したがって、変形の2階微分となる山留め壁モーメントを観測量とすることによって推定精度が向上することになる。また、地盤反力係数と背面側側圧の2つを未知パラメータとすると不安定な推定結果となることが多い。ベイズ推定は先験情報を導入し、解の唯一性や安定性などに対処できる。そこで理論側圧を観測量とし、山留め壁に作用する側圧が理論側圧の誤

差範囲にあると考え、拘束条件を増やすことによって解の収束性を改善し、解の唯一性に対する効果を図った。

また非線型システムにおける状態推定問題の最適解を求めるためには、観測方程式の非線型関数 $h(x)_k$ を推定値 $x_{k/k-1}$ まわりで線型化し、システムを変換する必要がある。したがって、変換行列 $M$ は以下のようになる。

$$M = \left. \frac{\partial h_k}{\partial x_k} \right|_{x = \hat{x}_{k/k-1}} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial E_p} & \frac{\partial \delta}{\partial K_h} \\ \frac{\partial P}{\partial E_p} & \frac{\partial P}{\partial K_h} \\ \frac{\partial M}{\partial E_p} & \frac{\partial M}{\partial K_h} \\ \frac{\partial E_p}{\partial E_p} & \frac{\partial E_p}{\partial K_h} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

このとき変換行列 $M$ のサイズは  $(m+n+o+k) \times (k+1)$  となる。ただし、 $K_h$ の変化によって $E_p$ は影響を受けないので、変換行列の要素 $\partial E_p / \partial K_h$ は式(8)のように計算される。

$$\frac{\partial E_p}{\partial K_h} = (\frac{\partial \delta}{\partial E_p})^{-1} (\frac{\partial \delta}{\partial K_h}) \quad (8)$$

( $k \times 1$ )                      ( $k \times m$ )                      ( $m \times 1$ )

さらに、 $\partial \delta / \partial E_p$ は  $(m \times k)$  の非対称な行列となるため、ムーア・ペンローズの一般化逆行列<sup>17)</sup>を求めることとなる。

また、式(7)の変換行列は、以下に示す影響係数法<sup>18)</sup>により数値的に求める。

$$\frac{\partial h_i(x)}{\partial x_j} \equiv \frac{h_i(x + e_j \Delta x_j) - h_i(x)}{\Delta x_j} \quad (9)$$

ここで、 $\Delta x_j$ :  $x_j$ の微小増分 ( $x_j$ は $j$ 番目のパラメータベクトルの要素)、 $e_j$ :  $j$ 番目のみが1となるベクトル

### 3. シミュレーションデータによる検証

#### (1) 解析法の比較<sup>16)</sup>

##### a) 解析条件

シミュレーションデータを用いて逆解析を行い、提案手法(A手法)と観測値に山留め壁変位、切ばり軸力のみを用いる従来の逆解析法<sup>12)</sup>(B手法)との比較を行った。解析方法は以下の通りである。

- ① 山留め支保工構造寸法や土質定数など、弾塑性解析に用いるパラメータを仮定し、山留め架構の挙動を計算する。
- ② 計算結果の一部を模擬計測データとする。
- ③ 模擬計測データを用いて、背面側側圧および地盤反力係数を推定する。

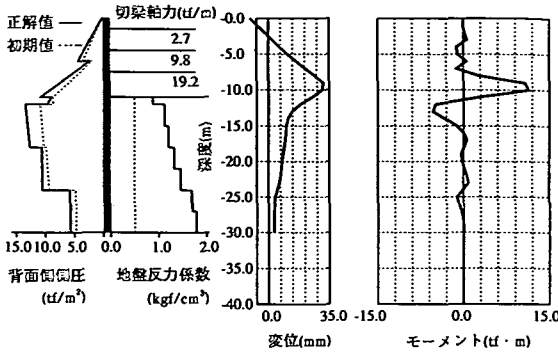


図-2 解析モデルおよび模擬計測データ

図-2に解析モデルおよび模擬計測データを示した。解析モデルは、4次掘削完了時を想定し、与えた背面側側圧と地盤反力係数を図中の実線で示す。また、切ばりバネ定数は、1～3段まで $1.0 \times 10^3 \text{tf/cm}$  ( $9.8 \times 10^2 \text{kN}$ )とし、切ばり位置の先行変位は、1段から順に $4.52 \times 10^{-3}$ 、 $7.63 \times 10^{-3}$ 、 $2.22 \times 10^{-2} \text{m}$ とする。以上の条件より解析した結果が図中の模擬計測データである。なお解析は掘削側の地盤を弾性体と仮定している。

逆解析に用いた模擬計測データは1mピッチの山留め壁変位と各段の切ばり軸力とし、A手法には1mピッチの山留め壁モーメントと図-2の破線で示した背面側側圧を加えた。推定パラメータは、背面側側圧の土層各層の上・下端の値と地盤反力係数の合計19個とする。また、図-2の破線は推定パラメータの初期仮定値である。

#### b) 逆解析結果

図-3に山留め壁の変位・モーメント、切ばり軸力のフィッティング状況および推定結果を示した。また、観測量および推定量における誤差共分散の初期値を表-1にまとめた。A、Bどちらの手法においても、変位・モーメント・切ばり軸力は模擬計測データと一致し、掘削面以浅の側圧は正解値に収束した。一方、背面側側圧と地盤反力係数を同時に推定することになる掘削面以深は、手法により推定結果が大きく異なった。B手法の推定値は、正解値に近い値となる土層もあるが、概して大きな誤差を含んだものとなった。A手法の場合は、初期仮定値を観測量として扱うため推定値がその値から大きく離れることはなく、正解値に比べやや小さな値をとるが、概ね良好な推定結果が得られた。また、推定結果の傾向を見ると、地盤反力係数が小さく推定された土層では背面側側圧も小さくなり、両方のバランスがとられているのがわかる。したがって、背面側側圧を観測量として考慮し拘束条件を増せば、正解値へ

の収束性が向上することがわかる。

## (2) 観測誤差による推定値への影響

### a) 解析条件

シミュレーションデータを用いて、計測データに含まれる観測ノイズが逆解析結果に対してどの程度の影響を及ぼすかを評価した。用いた計測データは、2. (1), a) ①で計算した山留め壁傾斜角に10%、30%のノイズを付加し、3次のスプライン関数近似したものを微積分した壁体変位および壁体モーメントである。ノイズを付加した計測データは、平均値1.0、標準偏差を0.1および0.3とした正規乱数を計測データ数だけ発生させ、3. の模擬計測データに掛け合わせたものである。また、乱数の初期値を変化させることによって、10%、30%のそれぞれに対して5ケースの計測データを作成した。図-4にケース1における10%および30%ノイズを付加した計測データを示す。なお、切ばり軸力の計測データにはノイズを付加せず、壁体傾斜角のみの影響を検討した。

### b) 解析結果

解析結果に対する推定誤差を次式で表す。

$$\text{Err} = \sum_{i=1}^N \frac{|x_{\text{cal}} - x^*| / x^*}{N} \quad (10)$$

ここで、 $x_{\text{cal}}$ ：背面側側圧または地盤反力係数の推定値、 $x^*$ ：背面側側圧または地盤反力係数の正解値、 $N$ ：推定パラメータの個数

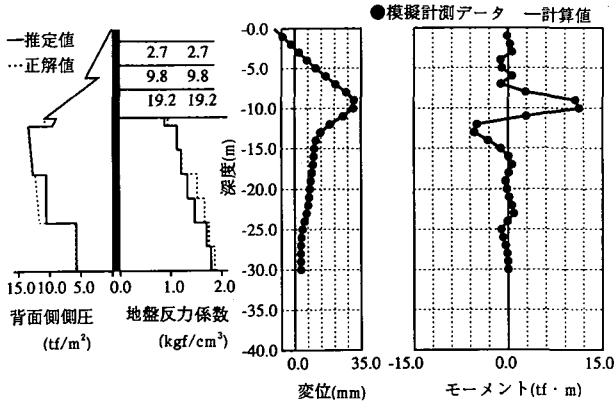
表-2に掘削以浅の背面側側圧、表-3に掘削以深の背面側側圧、表-4に地盤反力係数の推定誤差を示す。ノイズレベルが低いほど推定誤差が小さくなる傾向にある。掘削以浅の背面側側圧は、切ばり軸力と壁体変位とのバランスが推定精度に大きく影響するため、ノイズを付加したデータを用いた場合には、安定した推定値が得られず、観測ノイズ10%、30%のケースとも推定誤差が20%程度となった。掘削以深では背面側側圧と地盤反力係数のバランスがとられるため、背面側側圧の推定誤差と地盤反力係数の推定誤差が同程度の値となっている。また、掘削以深の推定値は、切ばり軸力の影響は少なく、壁体変位の観測誤差のみに影響されるため、掘削以浅の推定値にくらべて精度が良くなっている。また、掘削以深を見ると、ノイズを付加したA手法の結果は、ノイズを付加しないB手法の結果より精度良く推定できている。

## 4. 推定パラメータによる地盤挙動の評価

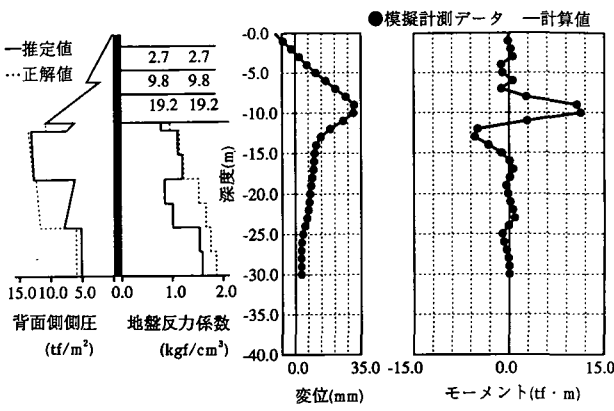
弾塑性法で得られる設計上の重要な情報には、切

表-1 誤差共分散の初期値

A手法	
計測値の誤差	
最大変位に対して	0.001
最大モーメントに対して	0.001
各切梁軸力に対して	0.001
側圧に対して	0.2
初期仮定値に対する誤差 (対角項以外は0)	
側圧に対して	0.25
地盤反力係数に対して	0.7
B手法	
計測値の誤差	
最大変位に対して	0.001
最大モーメントに対して	0.001
各切梁軸力に対して	0.001
初期仮定値に対する誤差 (対角項以外は0)	
地盤反力係数に対して	0.7



A手法



B手法

図-3 フィッティング状況および推定結果

表-2 推定誤差 (掘削以浅の側圧)

ケース	計測ノイズ			
	A手法			B手法
	0%	10%	30%	0%
1	0.001	0.169	0.145	0.001
2		0.151	0.108	
3		0.238	0.275	
4		0.214	0.348	
5		0.174	0.208	
平均	0.001	0.189	0.217	0.001

表-3 推定誤差 (掘削以深の側圧)

ケース	計測ノイズ			
	A手法			B手法
	0%	10%	30%	0%
1	0.077	0.122	0.166	0.423
2		0.136	0.189	
3		0.118	0.270	
4		0.145	0.115	
5		0.172	0.298	
平均	0.077	0.139	0.208	0.423

表-4 推定誤差 (地盤反力係数)

ケース	計測ノイズ			
	A手法			B手法
	0%	10%	30%	0%
1	0.056	0.155	0.169	0.487
2		0.137	0.190	
3		0.141	0.341	
4		0.209	0.120	
5		0.138	0.190	
平均	0.056	0.139	0.202	0.487

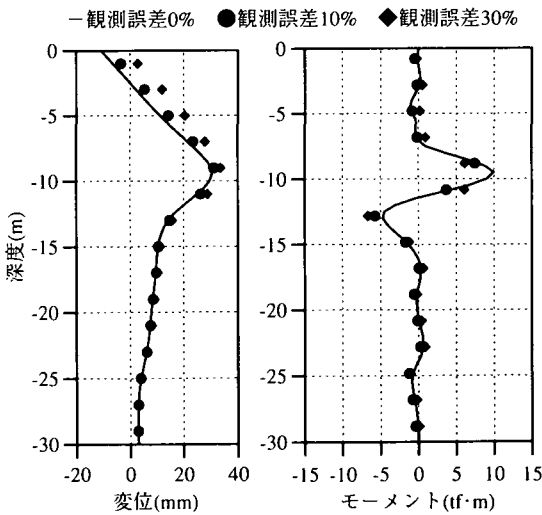


図-4 ノイズを付加した計測データ

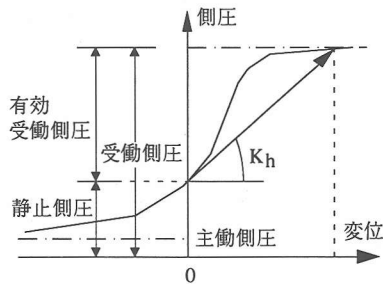


図-5 逆解析で推定する地盤反力係数

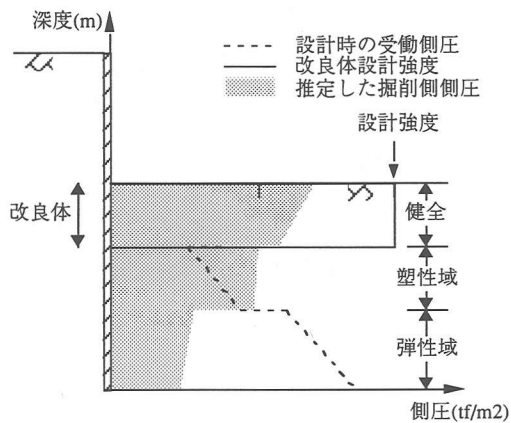


図-6 地盤挙動の評価方法

ばり軸力、山留め壁の変位、傾斜角、曲げモーメント、せん断力のほか、塑性域の判定がある。

一方、逆解析で推定される地盤反力係数は、図-5に示すように地盤の変位に依存して変化する等価な地盤反力係数であり、推定された地盤反力係数と計測変位を掛け合わせて求められた地盤反力は、有効受働側圧となる。したがって、この有効受働側圧に静止側圧を足し合わせた掘削側側圧と設計の段階で設定していた受働側圧を比較すれば、簡便な塑性域の判定方法となる。また、掘削面以深が改良されているような場合、求められる地盤反力は、設計強度と直接比較ができ、改良体の健全度を診断することができる。ただし、側圧を静止状態で計測することや「掘削中の静止側圧」という考え方から静止側圧を設定することは非常に困難である。ここでは設計の段階で設定した静止側圧を用いることとする。(図-6参照)

以上の方法を用いれば、掘削施工中に計測した山留め壁傾斜角および切ばり軸力のみから地盤挙動の評価が可能となる。

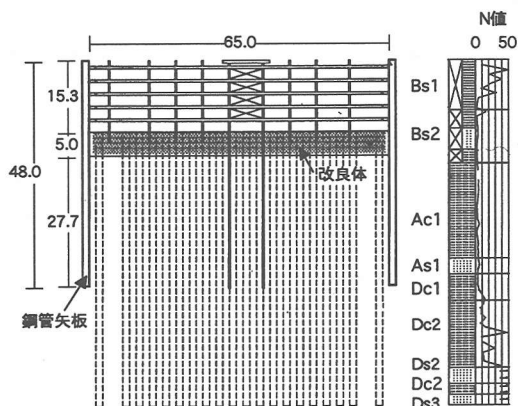


図-7 横断図

## 5. 軟弱地盤における掘削工事での適用事例<sup>19)</sup>

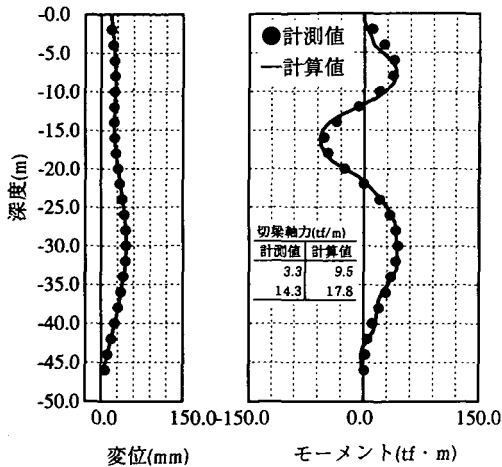
軟弱地盤における大規模掘削工事の実測データを用い、提案した逆解析手法の適用性について示す。

### (1) 工事概要

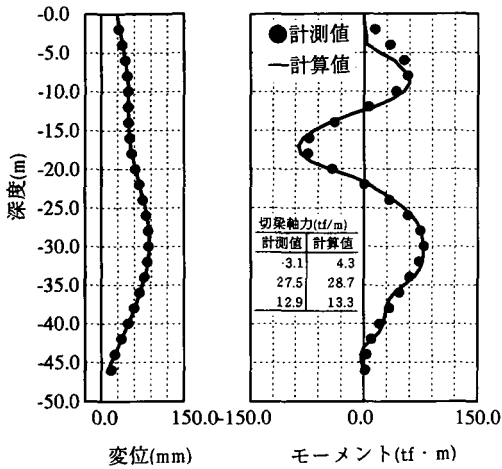
この工事は埋立地における掘削道路の建設である。地層構成は、GL.-10mまでがBs1層（建設残土）、GL-10m～GL-20mがBs2層（埋土層）、GL-20m～GL-43mまでがAc1およびAs1層（沖積層）であり、GL-43m以深が洪積層である。掘削規模は図-7のように幅約65m、深さ16mおよび延長75m、また山留め壁は直径1.1m、長さ46mの鋼管矢板で、先行地中ばりとなる改良体は改良厚5mである。当地区は埋立て直後であり、圧密進行中のヘドロ層の超軟弱地盤が存在すること、近接してサンドドレーン工事や埋立工事などが計画されていることから、情報化施工に基づいた施工管理支援を実施することになった。計測機器は壁体にひずみ計（3mピッチ）および挿入式傾斜計（1mピッチ）、背面側と掘削側に土圧計および間隙水圧計（4mピッチ）、また切ばりにはひずみ計および温度計、さらに掘削側地盤に層別沈下計である。

### (2) 逆解析結果

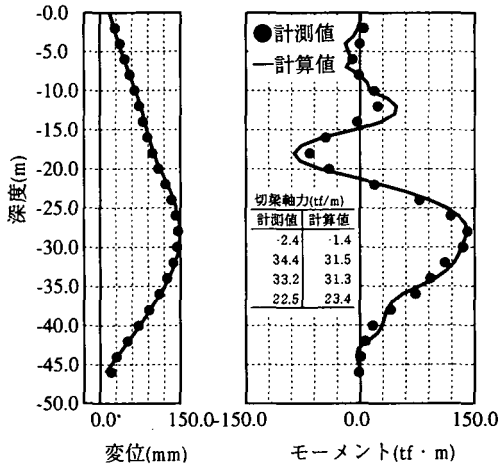
逆解析は、2次掘削終了時、3次掘削終了時および5次掘削終了時の3ケースで行った。逆解析に用いた計測項目は、ランキン・レザール式で仮定した背面側側圧、計測傾斜角を3次のスプライン関数で近似し、関数微積分した壁体変位、壁体モーメントおよび切ばり軸力であり、推定するパラメータは背面側側圧と地盤反力係数とした。推定パラメータの個数は、2次で21（背面側側圧7×2、地盤反力係数7）、3次で25（背面側側圧8×2、地盤反力係数9）、5次で23



(a) 2次掘削完了時



(b) 3次掘削完了時



(c) 5次掘削完了時

図-8 フィッティング状況

表-5 推定値および誤差共分散の初期値

推定値	設計値
計測値の誤差	%
最大変位に対して	1
最大モーメントに対して	1
各切梁軸力に対して	10
側圧に対して	5
初期仮定値に対する誤差 (対角項以外は0)	
側圧に対して	5
地盤反力係数に対して	30

表-6 推定した地盤反力係数

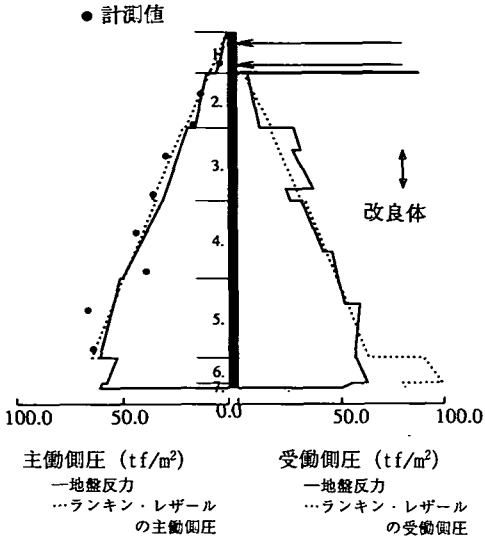
	設計値 (kgf/cm <sup>3</sup> )	推定値 (kgf/cm <sup>3</sup> )		
		2次掘削	3次掘削	5次掘削
Ac1-a	0.13	0.23	0.14	0.12
Ac1-b	0.13	0.32	0.18	0.17
Ac1-c	0.24	0.51	0.36	0.34
Asc	0.40	1.22	0.78	0.87

(背面側側圧 $8 \times 2$ , 地盤反力係数7)である。また、表-5に推定値および推定誤差共分散の初期値を示す。

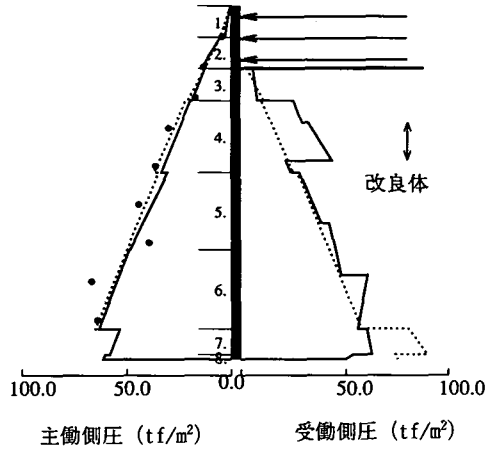
図-8, の(a), (b), (c)に計測データとのフィッティング状況を示す。壁体変位, 壁体モーメントの計算値と計測値とは全体的に良い対応を示している。一方, 切ばり軸力に関しては, 計測値との整合性があまり良くなかった。これは, 温度や拘束条件さらに施工条件などの影響により, 計測値の信頼性が十分でなく, 壁体変位とのバランスが悪かったことによると考えられる。逆解析により求めた地盤反力係数を表-6に示す。各掘削回数での推定値は, 粘性土で設計値の1~2倍, 砂質土で2~3倍程度の大きなものとなった。また, 2次掘削終了時と3次掘削終了時の推定地盤反力係数を比較すると1/2倍程度に劣化しており, 掘削深さが小さいにもかかわらず非常に大きな壁体変位を引き起こす原因となっているのがわかる。一方, 3次掘削終了時と5次掘削終了時では推定地盤反力係数の値がほぼ同じで, 極限(塑性状態)に達していることが予想される。また, 改良体の地盤反力係数は,  $0.5 \text{ kgf/cm}^3$  ( $4.9 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ )で, 設計値の $10.0 \text{ kgf/cm}^3$  ( $9.8 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ )を大きく下回った。

### (3) 山留め作用側圧

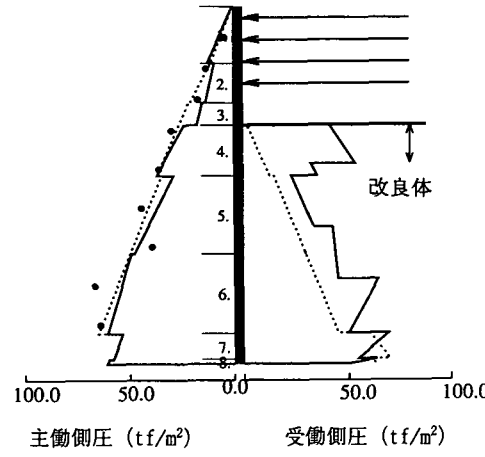
図-9の(a), (b), (c)に, 推定した背面側有効側圧と静止側圧の和から求めた背面側側圧および4章の考え方に基づき推定した掘削側側圧とランキン・レザール式による側圧を比較したものを示した。背面側側圧



(a) 2次掘削完了時



(b) 3次掘削完了時



(c) 5次掘削完了時

図-9 地盤挙動の評価

は、Ac層でやや小さめの値をとるが、事前の土質試験による $c$ 、 $\phi$ から求めたランキン・レザール式の主働土圧とほぼ同程度の値として推定された。また、山留め壁に設置した土圧計の計測値とよく対応している。2次掘削終了時の掘削側の地盤状態は、推定側圧とランキン・レザール式の受働側圧とを比較した結果、改良体上層3.2mのBs2層(埋立層)以外は弾性状態にあることがわかる。また、3次掘削終了時では、GL-42.1m以深のAs1層(沖積砂層)、Dc1層(洪積粘土層)以外は塑性に近い状態にあることがわかる。さらに、5次掘削終了時には、As1層(沖積砂層)、Dc1層(洪積粘土層)以外の85%程度が完全に塑性化しているのがわかる。一方、改良体は $4.0\sim 5.0\text{kgf/cm}^2$ ( $3.9\times 10^4\sim 4.9\times 10^4\text{MPa}$ )程度の力を受けているが、設計強度 $10.0\text{kgf/cm}^2$ ( $9.8\times 10^4\text{MPa}$ )に対して十分余裕があり、健全な状態にある。これより改良体は先行地中ばりとして、山留め架構の安定性に有効に働いているのがわかる。

6. まとめ

本論文では、拡張カルマンフィルタによる逆解析手法とその推定パラメータによる地盤挙動の評価方法を提案し、実測データを用いてその適用性を示した。結論は次のようにまとめることができる。

- ①山留め壁の傾斜角を微分して得られるモーメントと、設計に用いられるランキン・レザール式に代表されるような理論側圧を擬似的な観測量として取扱った逆解析手法を示し、シミュレーションデータを用いて逆解析結果の検討を行った。本逆解析手法によれば、従来の逆解析に比べ計測データとのフィッティング状況もよく、地盤反力係数および背面側側圧を同時に推定した場合にも安定した結果が得られた。
- ②観測誤差と推定誤差との関係を調べた。観測量の精度は逆解析によって得られた推定値に大きく影響し、所定の推定精度を得るためには十分な観測精度が必要ことがわかった。
- ③逆解析により得られたパラメータを用いて地盤の挙動を評価する方法を提案した。本方法により、計測した山留め壁傾斜角と切ばり軸力を用いて地盤の塑性域、改良体の健全度を診断することができる。
- ④軟弱地盤における大規模山留め掘削工事の実測データを用いて逆解析手法の適用性を示し、壁体傾斜角および切ばり軸力のみ簡易な計測データを用いて、山留め掘削段階の地盤挙動を評価できることが明らかになった。



## 参考文献

- 1) 例えば, トンネル標準示方書[開削工法編]・同解説, 土木学会, 1996.
- 2) 野尻明美: 掘削工事における山留め架構の構造計算-山留め計算新法の提案-, 第7回土質工学研究発表会, pp. 635-638, 1972.
- 3) 中村兵次, 中沢 章: 掘削工事における山留め壁応力解析, 土質工学会論文報告集, Vol. 12, No. 4, pp.95-103, 1972.
- 4) 幾田悠康: 講座 土を測る-現場計測と施工管理- 3. 現場計測による施工管理の実施例, 土と基礎, Vol. 32, No. 4, pp. 79-87, 1984.
- 5) 土質工学における情報化施工研究報告書, 土木学会, 1988.
- 6) 星谷 勝, 斉藤悦郎: 建設技術者のためのデータ解析と応用 カルマンフィルタを中心として, 鹿島出版会, 1991.
- 7) 富永真生, 越後勇吉ほか: RCCシステムの開発について(第2報), 第12回土質工学研究発表会, pp.1121-1124, 1977.
- 8) 内山英夫, 越後勇吉, 小関楯志: 深い掘削工事における現場計測とそのシステム化, 土と基礎, 30-7 (294), pp.25-30, 1982.
- 9) 井畔端人, 中沢亨ほか: 最適化手法(山登り法)を用いた3因子実験プログラム, 第9回電算機利用に関するシンポジウム講演概要集, pp.89-92, 1984.
- 10) 丸岡正夫, 青木雅路ほか: 山留め観測施工法に関する研究(その1, その2), 第19回土質工学研究発表会, pp.1097-1104, 1984.
- 11) 斉藤悦郎, 古賀重利: 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, pp.459-465, 1984.
- 12) 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の計測管理手法, 土木学会論文集, 第391号/VI-8, pp.115-124, 1988.
- 13) 巢元利博, 森 嘉仁, 中尾安行: 逆定式化による土留め逆解析法, 土木学会論文集, 第469号/III-23, pp.35-44, 1993.
- 14) 満尾 淳, 渋谷重彦, 酒井邦登, 杉本博之, 森 一功: GAを用いた弾塑性土留逆解析手法の提案, 第3回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp. 111-116, 1993.
- 15) 片山 徹: 応用カルマンフィルター, 朝倉書店, 1983.
- 16) 斉藤悦郎, 小林範之: 拡張カルマンフィルタによる山留め逆解析の側圧・地盤反力係数同時推定(その1) - シミュレーションデータによる推定法の検証 -, 第30回土質工学研究発表会, pp.1655-1656, 1995.
- 17) Penrose, R. : A Generalized Inverse for Matrices, *Proc. Cambridge Philos. Soc.* 51, 1955.
- 18) William W-G. Yen : Review of parameter identification procedures in ground water hydrology; The inverse problem, *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 2, pp. 95-108, 1986.
- 19) 新津敬治, 吉川清元, 崎濱秀仁, 小林範之, 斉藤悦郎: 拡張カルマンフィルタによる山留め逆解析の側圧・地盤反力係数同時推定(その2) - 軟弱地盤における大規模掘削工事での事例 -, 第30回土質工学研究発表会, pp.1657-1658, 1995.

(1996.3.14 受付)

## BACK ANALYSIS BY EK-FILTER FOR COEFFICIENT OF SUBGRADE REACTION AND EARTH PRESSURE IN EXCAVATION WORK

Noriyuki KOBAYASHI and Etsuro SAITO

The authors had proposed the back analysis method for the estimation of earth pressure or coefficient of subgrade reaction in excavation work, using the extended Kalman filter of control theory. In case of simultaneous estimation of earth pressure and coefficient of subgrade reaction, this procedure is unstable.

This paper describes the new back analysis considering moment of retaining wall and the external forces as the observation vector for the observation equation. Using this method, earth pressure and coefficient of subgrade reaction can be easily identified and the convergence is developed.