

簡便な計測データに基づく山留め工事の 情報化施工に関する研究

古賀重利

正会員 株式会社フジタ土木本部主席技師長 (〒201 東京都狛江市東野川3-15-4-316)

本論文は、山留め壁の傾斜角および支保工軸力のみで簡便な計測データに基づき、山留め架構の挙動を把握して計測管理する手法について研究し、山留め工事において実証研究したものである。

計測管理の手法は、計測データから山留め壁の壁体変形および曲げモーメントを推定する現状解析、側圧および水平方向地盤反力係数の未知パラメータを推定する逆解析および次期施工段階の山留め架構の挙動を予測する予測解析の3段階からなっている。現場計測に基づく情報化施工管理の実践結果によれば、これらの解析手法による現状解析値、逆解析値および予測解析値とも実測確認値と良い対応がみられ、山留め工事における施工管理への有用性が確認された。

Key Words: earth-retaining wall, excavation works, measurements, observational control

1. まえがき

大規模な地下掘削工事における山留め工事の施工管理は、施工中の山留め架構の挙動把握および安全管理のために数多くの計測を行って管理しているのが現状である。

その計測項目は、山留め壁の状態を知る壁体傾斜角および鉄筋応力(ひずみ)、山留め壁に作用する外力を知る土圧・水圧および支保工軸力、また周辺地盤の挙動を知る地盤沈下、地中側方変形および地下水位の変化などの計測である。

これらの計測項目に対して、計測機器を適切な位置に数多く配置して計測を行わねばならず、長時間の計測とかなりの費用を必要とするものである。

また、現場計測による多量の計測データの収集や演算処理を現場事務所にて迅速に処理して、現場技術者に情報提供して施工管理を支援することは、大変に困難なことである。

よって、これらに対して山留め壁の傾斜角および支保工軸力の簡便な計測データに基づき、山留め架構の現状挙動の把握、未知パラメータの推定および次期施工段階の挙動を予測解析する解析手法を確立すると共に、従来工事より安全で、しかも経済的に山留め工事の計測管理を可能にすることにある。

本計測管理における解析手法の特徴は、現状解析における計測データの多項式近似による関数微積分に対して、項数による影響の小さいスプライン関数¹⁾を用いた

ことである。

また、逆解析における未知パラメータの推定は、現場計測データを統計量としてとらえ確率論的非線形最適化手法である拡張カルマンフィルタ^{2),3)}を用いて定式化の工夫を行ったことである。

なお、次期施工段階の予測解析は、山留め架構の順解析における弾塑性解析⁴⁾において、その構造モデルを掘削底面下の塑性域について地盤反力のみが作用するとして、塑性域の釣り合い計算に必要とする計算上の解析ステップを無くしたことによりパーソナルコンピュータ(以下、パソコン)のレベルで現場事務所でも解析可能になったことである。

情報化施工管理システムは、現場計測、計測データの処理および理論解析、施工管理基準値による安全性の評価と、これらのデータを図表化してリアルタイムに現場技術者に情報提供して施工管理の支援をする一貫した計測管理のシステムである必要がある。

本論文は、これらの計測管理システムに対して、壁体傾斜角および支保工軸力の簡便な計測データに基づき、大規模掘削での山留め工事において、その適用性を実証研究したものである。

2. 情報化施工管理

簡便な計測データに基づく情報化施工管理の流れは、図-1に示すようである。

これによると、施工前の計画段階では、設計パラメー

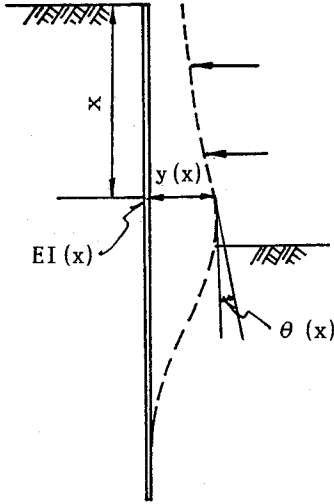


図-2 壁体の変数および位置

$\theta_{i,j}$: 計測位置 i 点の j 回目の補正值

次に、計測データに対する関数近似は、3次のスプライン関数を用いてカーブフィッティングする方法とした。

スプライン関数は、近似多項式に比較して項数による全体系への影響が少ないこと、および端部における振動現象がほとんどないこと、また低次数で良い近似ができることなどの特徴がある。

このような特徴から、スプライン関数による計測データの処理は、カーブフィッティングおよび関数微積分に対して有効な処理方法である。

計測データをスムージングし、その節点と計測位置とを等しく置き換え、式(2)で示す3次のスプライン関数により計測データの処理を行うものとする。

$$S(x_i) = f(x_i) + \sum C_{ij}(x - x_i)^j \quad (2)$$

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

(x_i, y_i) : 計測データの座標

$(y_i = f(x_i))$

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

傾斜角データからの壁体変形の推定は、壁体先端の境界条件の仮定のもとに数値積分により求めることができる。

また、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、曲げ剛性を評価して推定することができる。山留め架構の壁体を梁と仮定した場合に、微小変形による梁の理論により、壁体変形および曲げモーメントの算定式は、図-2 から次式で示される。

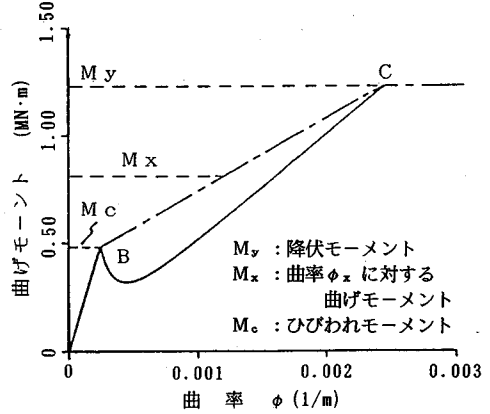


図-3 $M-\phi$ 曲線

$$y(x) = \int_0^x \theta(x) dx \quad (3)$$

$$EI(x) \cdot \frac{d\theta(x)}{dx} = EI(x) \cdot \phi(x) = -M(x) \quad (4)$$

ここに、 $y(x)$: x 点の変形

$\theta(x)$: x 点の傾斜角

$M(x)$: x 点の曲げモーメント

$EI(x)$: x 点の曲げ剛性

$\phi(x)$: x 点の曲率

連続地中壁工法における鉄筋コンクリート壁に対する壁体曲げモーメントは、図-3の $M-\phi$ 曲線を介し剛性低下を考慮して求めることができる。

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、Whitney⁹⁾の式を用いて推定するものとする。

4. 未知パラメータの逆解析

山留め架構の構造モデルは、壁体を梁としてモデル化し、切ばり支保工の弾性ばね支点、背面側の側圧および掘削側の地盤を弾性ばねとした外力が働くものとしている。

図-4は、 k 次掘削における山留め架構の構造モデルを示したもので、梁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、次のように与えられる。

○掘削面以浅に対して

$$E_{k,i} \cdot I_{k,i} \cdot \frac{d^4 y_k}{dx^4} - (p_{k,i} + q_{k,i} \cdot x) = 0 \quad (5)$$

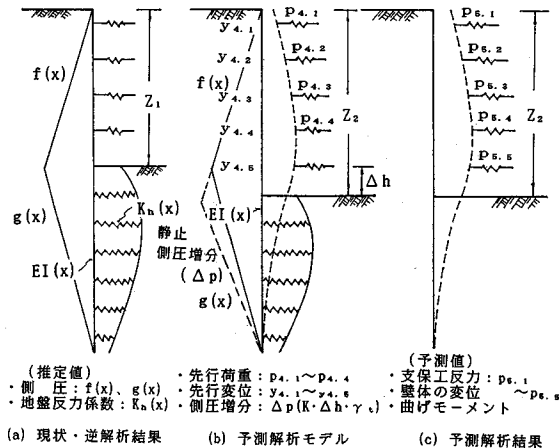
ここに、

$E_{k,i}$: k 次掘削, i 要素の山留め壁の弾性係数

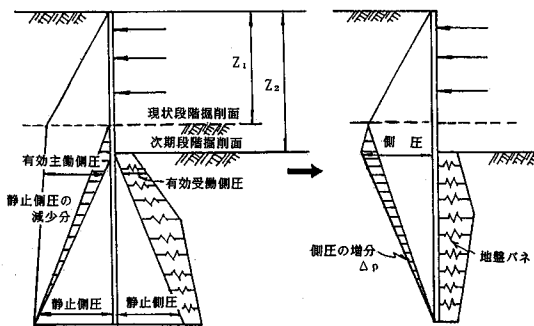
$I_{k,i}$: k 次掘削, i 要素の断面2次モーメント

x : 要素端から着眼点までの距離

y_k : k 次掘削の変形



図一六 次期掘削段階の予測解析過程



図一七 予測解析時の側圧の過程

なお、詳細な理論解析手法については、文献3)に掲載しているため、ここでは省略する。

5. 予測解析

山留め架構の予測解析は、現状の計測データから逆解析によって推定された側圧、水平方向地盤反力係数などのパラメータおよび以下に示す実測値に基づく条件、掘削による仮定条件を加味して、順解析プログラムを用いて次期の掘削段階の挙動を予測解析する。

山留め架構の構造モデルは、図一四に示した逆解析と同様の梁モデルとし、図一六の予測解析過程に基づき解析する。その解析過程における各種の条件は、次のようである。

解析法は、各掘削段階での状態を独立したものとし、掘削過程は、前掘削段階での変形を壁体の初期不整として考慮し、支保工（切ばり）軸力についても先行荷重、すなわち初期荷重が作用しているとして取り扱う各次法によるものとする。山留め壁の曲げ剛性は、 $M-\phi$ 曲線を介して剛性低下を考慮した値とする。

次期掘削段階における支保工の先行荷重および支保工位置の先行変形は、現状掘削段階で計測データを初期状態として用いる。

背面側の側圧および掘削側の側圧は、図一七に示すように、逆解析で推定された側圧に静止側圧の増分を加えたものとする。また、掘削面以深の側圧は、掘削による山留め壁の変形に対して地盤のばねが作用するものとし、弾塑性法における塑性域は無視して地盤ばねが作用すると仮定する。その水平方向地盤反力係数は、逆解析で推定した値とする。以上の条件に基づく予測解析の過程は、図一六から各掘削段階における計測データをもとに(a)逆解析により各パラメータを求め、材料定数、境界条件および仮定条件を加味して(b)の予測解析モデルによる順解析により(c)予測解析結果が得られる。

なお、これらの予測解析モデルおよび解析条件は、現場における情報化施工を対象としてパソコンレベルによる解析可能なプログラムとする必要があり、すなわち山留め壁を梁モデルとした各次法により各掘削段階を独立した状態で解析すること、および掘削面以深の塑性域を考慮せず地盤の弾性ばねによる掘削側の支持機構としたことにより、膨大な大型 EDP プログラムがパソコンレベルで解析可能になったものである。

6. 情報化施工法の適用事例

(1) 工事概要

本工事は、下水処理場のポンプ場築造工事であり、掘削規模は、幅 61.0 m、長さ 87.5 m および掘削深さ 20.8 m である。山留め架構は、山留め壁に鉄筋コンクリート連続地中壁（幅 1.0 m、長さ 38.0 m）を採用し、切梁は第 1 段～第 3 段において鉄骨鉄筋コンクリート梁（SRC 梁）による逆打工法、第 4 段～第 6 段においてアースアンカーによるプレロード工法を採用したものである。

(2) 地質概要

地質構成は、上部沖積層、下部沖積層および洪積層からなっている。上部沖積層は、地表面より GL-11 m 付近まで埋立土および砂層からなり、その下部 GL-21.9 m 付近まで N 値 4 程度の非常に軟弱な粘土層が分布している。

また、GL-21.9 m～GL-28.5 m 付近は、下部沖積層の粘土層と砂層の互層にて N 値は 12～30 と締まっている。

GL-28.5 m 以深は、洪積層の粘土層と砂層の互層および洪積粘土層が分布している。土質柱状図および土質諸定数は、後述する表一に示すものである。

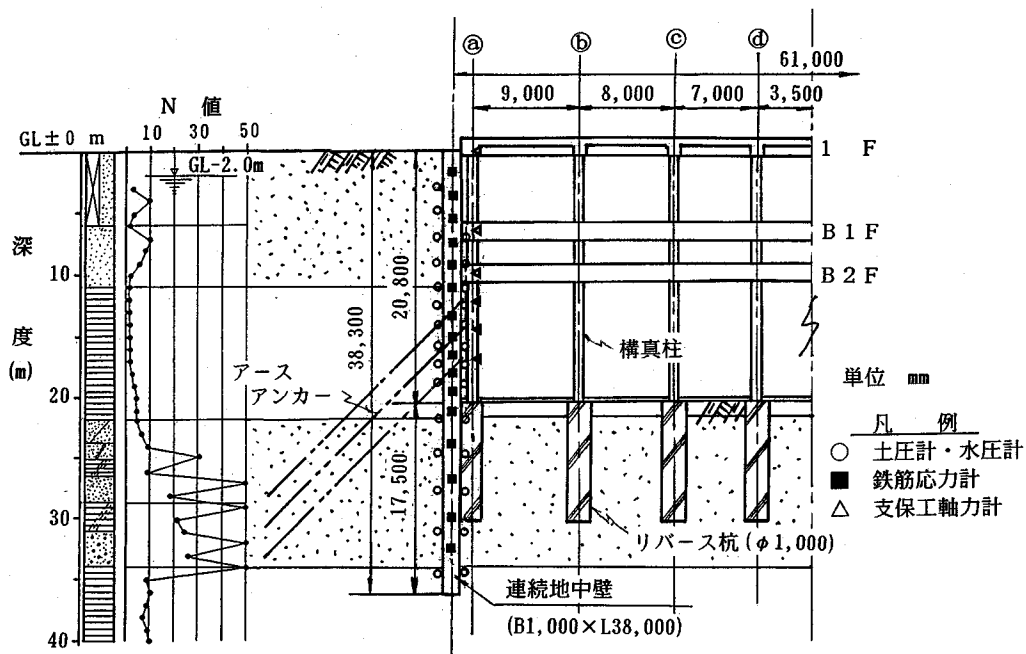


図-8 山留め架構断面図および計測位置

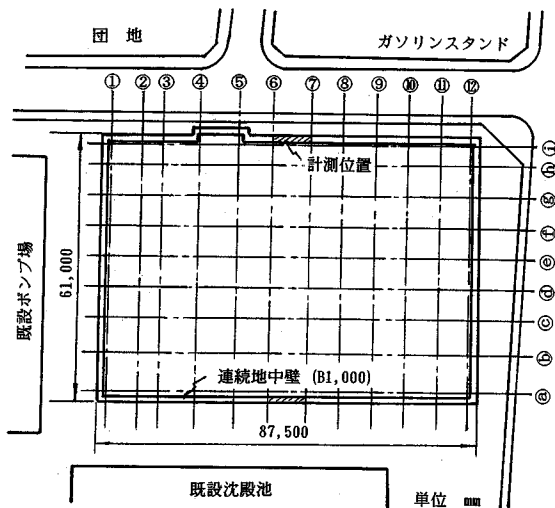


図-9 山留め架構平面図および計測位置

表-1 計測項目

計測項目	計測センサー
◇山留め壁に関する計測	
・側圧	土圧計、2m~3m間隔
・水圧	水圧計、2m~3m間隔
・鉄筋応力	鉄筋応力計、2m間隔
・傾斜角	固定式傾斜計、2m間隔
◇支保工に関する計測	
・支保工軸力	鉄筋応力計、ヒズミ計
・アンカー張力	荷重計
・支保工の温度	温度計
◇その他の計測	
基礎地盤のリバウンド、地下水位 周辺地盤の変形、周辺構造物の変形など	

(3) 計測および計測管理概要

計測管理の項目は、山留め架構の管理、リバウンド管理および周辺地盤管理について行ったが、本論文では山留め架構の管理についてのみ述べるものとする。その計測項目は、表-1に示すとおりであり、また、山留め架構の断面図および計測位置は図-8に示し、平面図は図-9に示した。

これらの計測項目の内、山留め壁の傾斜角および支保工(切ばり)軸力のみを計測値を用いて情報化施工管理

における理論解析(現状、逆解析および予測解析)の追求を行うものとし、壁体に作用する側圧、壁体の変形および鉄筋応力などの計測値は、理論解析における推定値の検証用の実測確認値として用いた。計測管理における施工管理基準値は、長期許容値の1.25倍とした中期許容値を一次管理基準値とし、短期許容値を二次管理基準値として管理するように設定した。

施工管理の手法は、前述した図-1の情報化施工管理の流れにそって行われ、判定結果が二次管理基準値を上廻ると予測された場合は、『何等かの対策を検討する必要がある』と判定する。

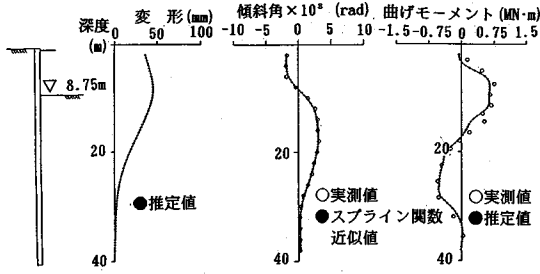
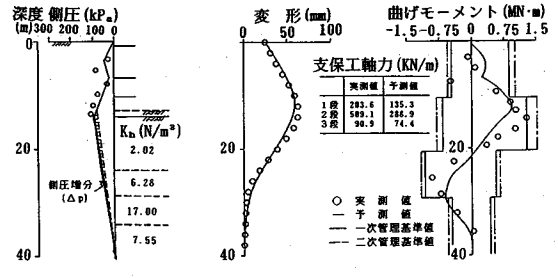
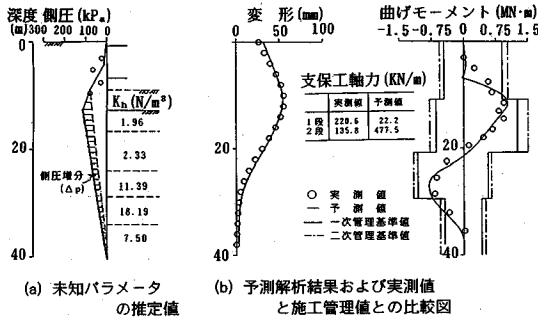


図-10 計測結果および現状解析結果 (2次)



(a) 未知パラメータの推定値 (b) 予測解析結果および実測値と施工管理値との比較図

図-13 計測結果, 逆解析・予測解析 (3次⇒4次)



(a) 未知パラメータの推定値 (b) 予測解析結果および実測値と施工管理値との比較図

図-11 計測結果, 逆解析・予測解析 (2次⇒3次)

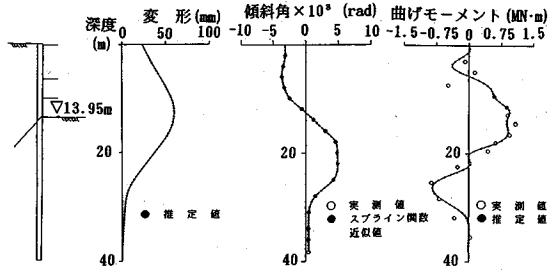


図-14 計測結果および現状解析結果 (4次)

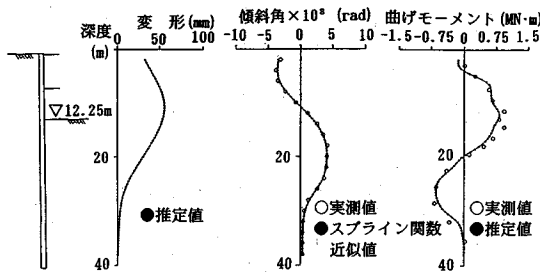
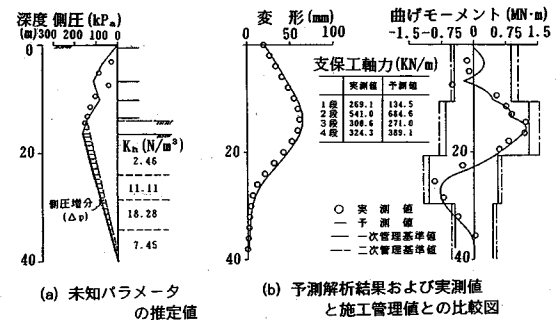


図-12 計測結果および現状解析結果 (3次)



(a) 未知パラメータの推定値 (b) 予測解析結果および実測値と施工管理値との比較図

図-15 計測結果, 逆解析・予測解析 (4次⇒5次)

これらの判定結果は、パソコン上に表示されると共に、計測結果の図表化と共にコメントとしてプリントアウトされ現場技術者に管理情報として提供される。

(4) 計測結果および理論解析結果

本山留め工事において、壁体の傾斜角および支保工軸力の計測を行い、前項の理論解析に基づいて計測管理を実践した。

現状解析値および予測解析値の信頼性の評価は、側圧の実測値 (○) および壁体の鉄筋応力実測値より求めた曲げモーメント (○) を確認値として、両者を比較して行った。

また、計測管理図には、壁体曲げモーメントに対して、一次管理基準値 (—) および二次管理基準値 (---) を示して、施工の安全性を評価した。

図-10, 図-12, 図-14, および図-16 は、2次掘削、

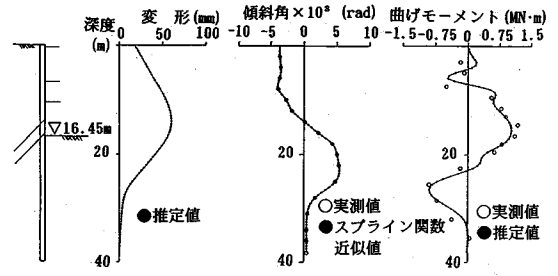


図-16 計測結果および現状解析結果 (5次)

3次掘削, 4次掘削および5次掘削終了時の壁体の実測傾斜角および実測鉄筋応力より求めた曲げモーメントを图示したものである。

また、図中には、実測傾斜角を用いて現状解析した壁

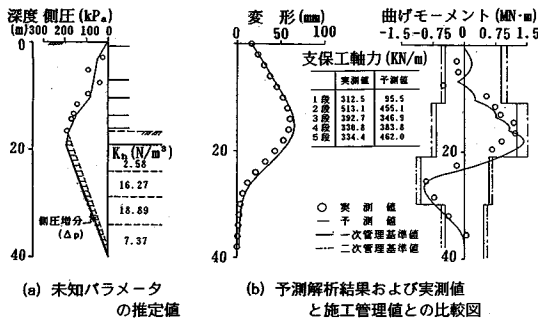


図-17 計測結果，逆解析・予測解析（5次⇒6次）

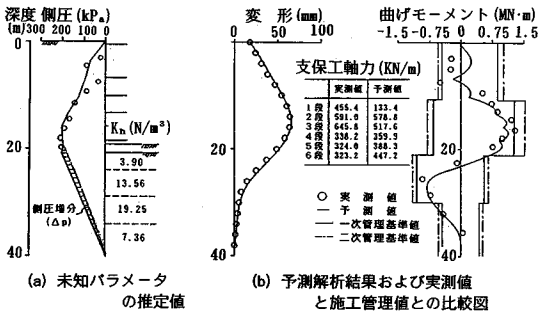


図-18 計測結果，逆解析・予測解析（6次⇒7次）

体変形および曲げモーメントを併記している。

現状解析では，実測値に対するスムージング回数は1回とした。

現状解析の結果によれば，実測傾斜角に対するスプライン関数によるカーブフィッティングは良好であり，これより求めた曲げモーメント解析値(―)は，実測値(○)と良い一致を示した。

図-11，図-13，図-15，図-17および図-18は，逆解析による未知パラメータの推定値および次期掘削段階の予測解析値を図示すると共に，実測変形および実測鉄筋応力より求めた曲げモーメントの確認値を併記した。

実測値に基づく未知パラメータの逆解析は，各未知パラメータの初期値を次の値と仮定して，前述した順解析プログラムと繰返し拡張カルマンフィルターにより繰返し計算を行った。

掘削面以浅の側圧は，側圧係数を0.5とし，掘削面以深では，壁体先端の値を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，粘性土に対して $K_h = 3.2q_u$ (N/cm³)，砂質土に対して $K_h = 2.0N$ (Nは，N値を示す)を用いた。計測データに含まれるノイズは，最大変形に対して10%，支保工軸力に対して10～20%と仮定した。未知パラメータの初期値に対する誤差は，50%と仮定した。

まず，逆解析による未知パラメータの推定結果は，繰返し拡張カルマンフィルターによる計算から，初期値よ

表-2 土質諸定数および水平方向地盤反力係数

往状図	γ (t/m ³)	N 値	φ (度)	C (t/m ²)	地盤反力係数	地盤反力係数・逆解析推定値 K_h (kgf/cm ²)								
						1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次		
埋立土	1.82	3	20	0	0.18									
砂	1.83	8	28	0	0.50	0.349								
粘土	1.80	4	0	4.8	0.26	0.290	0.200							
粘土	1.78	4	0	6.4	0.26	0.45	0.330	0.200	0.200	0.251				
粘土	1.72	4	0	7.5	0.25	0.48	0.330	0.238	0.206	0.251	0.263			
砂	1.85	18	30	0	1.13	1.131	1.161	0.641	1.133	1.659	1.382	1.382		
砂	1.82	30	45	0	1.86	1.884	1.854	1.733	1.863	1.926	1.962	1.962		
粘土	1.73	10	0	11.8	0.63	0.75	0.765	0.765	0.770	0.759	0.751	0.750	0.750	

り4～5回の繰返し計算をすることにより，確認値へ収束した。表-2は，その水平方向地盤反力係数の推定値を示すもので，初期値に対して粘性土は $K_h = 1.60q_u$ ，砂質土に対して $K_h = 0.50N \sim 0.62N$ と推定された。

図-11(b)は，2次掘削から3次掘削時の挙動を予測解析した結果であり，これによると予測結果は一次管理値124.65 tf·m (1.22 MN·m) 以内であったことから，3次掘削は計画通りに行った。その結果，3次掘削後の実測鉄筋応力より求めた曲げモーメントは図中の実測値(○)であり，2次掘削時に予測した値(―)と実測値は良い一致がみられた。

図-13は，3次掘削から4次掘削時の挙動を予測したものであり，図-15は，4次掘削から5次掘削時の挙動を予測したものである。これによると，同様に4次掘削および5次掘削とも一次管理値以内で施工可能であることが予測されたことから，計画通りに掘削工事を実施した。

その結果，最大曲げモーメントは一次管理基準値以内にとどまり安全に施工することができ，各掘削後の予測解析値と実測確認値は良い一致がみられた。図-17は，5次掘削から6次掘削を予測したものである。

6次掘削時の予測結果によれば，最大曲げモーメント $M_{max} = 142.50$ tf·m (1.40 MN·m) が山留め壁の第二ブロックで発生することが予測され，この値は一次管理基準値を越え二次管理基準値149.50 tf·m (1.46 MN·m) 以内にあるため重大な危険には至らないものの事象発生の可能性も予測されることから対策を行った。

すなわち，5段支保工(アースアンカー)の架設において，プレロード荷重を設計荷重の120%を導入して山留め壁の変形を抑制する対策工を行った。その結果，図-17の6次掘削時の実測値(○)は一次管理基準値以内にとどまり，安全に施工することができた。更に，6次掘削終了後の6段支保工にもプレロードを導入して，7次掘削を行い安全に山留め工事を終了することができ

た。

なお、これらから掘削底面下地盤の塑性域を考慮しない場合の予測解析値と実測値との比較検討結果から、両者の対応は良い一致がみられ、その解析手法は実用的には十分に適用可能であることが確認された。

支保工軸力については、床版逆打工法等の施工条件や温度応力等の不確定な要因により、初期段階でややばらつきが生じた。

6. あとがき

本論文は、山留め架構の壁体の傾斜角および支保工軸力のみを簡便な計測データに基づく山留め工事の計測管理について述べたものである。

以上の様に山留め工事における実証研究の結果から、現場計測、理論解析（現状解析、逆解析、予測解析）および評価までの一貫した計測管理の手法は、情報化施工管理システムとして、管理情報をリアルタイムに提供で

き、その情報に基づき現場技術者は施工状況を判断して意志決定をすることができ、その有用性が確認された。

今後は、更に多くの施工現場に適用して、計測管理手法の信頼性を確立することにより、益々情報化施工法が普及するものと思われる。

参考文献

- 1) 桜井明：スプライン関数入門，東京電気大学出版。
- 2) Hosiya, M. and Saito, E.: Structural identification by extended kalman filter, *Jour. of Eng. Mech.*, ASCE, Vol. 110, No. 12, pp.1757-1770, 1984.
- 3) 斉藤悦郎，古賀重利：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，土木学会論文集，第 391 号，VI-8，pp.115-124，1988.
- 4) 中村兵次，中沢章：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, pp.95-103, 1972.
- 5) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店。
- 6) 水野高明：鉄筋コンクリート工学，森北出版。

(1995.7.24 受付)

STUDY ON OBSERVATIONAL CONSTRUCTION CONTROL FOR AN EARTH-RETAINING WORKS BASED ON MINIMUM MEASURED DATA

Shigetoshi KOGA

This paper is a study on the observational construction of earth-retaining works used on the basis of minimum measured data on the inclination of wall and axial forces of the struts.

The observational construction procedure consists of 3 stages; analysis under present condition to determine wall deformation and bending moment, back analysis for estimating the lateral pressure and the coefficient of horizontal subgrade reaction used the extended Kalman filter, and predictive analysis involves predicting the behavior of the earth-retaining wall. Thus, the method based on field measurement proved to be effective in construction control.