

山留め予測解析システム

Predictive Analysis System for Landslide Protection Wall

松本 正三*
Shozo MATSUMOTO

早川 貴俊*
Takatoshi HAYAKAWA

1. まえがき

現在、大規模で大深度の山留め工事の設計計算は、事前調査などにより施工区域の地盤の諸定数を仮定し、そのデータに基づき側圧分布、山留め壁の架構条件をモデル化し、変形法により弾塑性解析をする方法がとられている。この方法はあくまでも仮定値で、実際の山留め壁の挙動と異なる場合が多く、施工中に危険側に挙動することもある。そこで、情報化施工と呼ばれる方法が注目されている。これは、山留め壁、支保工などに計測機器を設置し、各施工段階ごとの計測データを解析結果にフィッティングさせ、計算に必要な諸定数を求め(最適化)、そのデータを用いた次の施工段階の山留め壁の挙動を予測し(予測解析)、その結果を施工にフィードバックさせるものである。

山留め壁の最適化に用いられる非線形最適化手法は多くの論文に発表されており、数理計画法の最適化手法と確率論を用いた最適化手法の二つに分類される。前者には、シンプレックス法・共役勾配法・DSC法などが、後者には、拡張カルマンフィルタ法などさまざまな手法が提案されている。本システムの最適化は未知数が多く、また施工段階により山留め壁の構造系が変化するため、目的関数の式が多数存在し、式も複雑になる。そこで、以下に示す理由により、数理計画法の最急降下法を採用した。

- ① 目的関数が複雑で多数存在するため、勾配ベクトルが微分により求められなくても差分近似で代用できる。
- ② 未知パラメータベクトルの進路が必ず降下に向くことが保証されているため、探索手続きが発散する

ことはない。

以上の理由から、山留め壁の挙動をリアルタイムに把握する必要があるとして、順解析、最適化、予測解析を連動させパソコンにより処理できるシステムの開発を行った。その概要について以下に報告する。

2. システムの概要

(1) システムの流れ

山留め壁の情報化施工の流れを図-1に示す。点線の枠の中が本システムの適用範囲である。

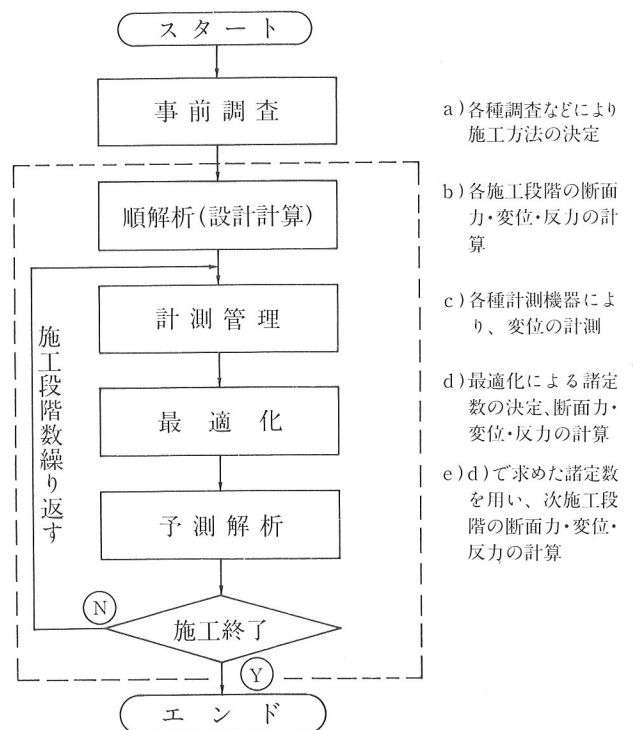


図-1 情報化施工の流れ図

* (株)システムエンジニアリング技術部技術二課

a) 事前調査

事前調査として、土質の諸定数、地下水の状態などを決定する自然条件の調査や、地下埋設物の位置・施工現場周辺の状況を調べる工事環境条件調査など、さまざまな調査が必要である。その調査結果から山留め工の工法を決定する。

b) 設計計算(順解析)

土質の諸定数、各施工段階の山留め壁の構造系、地下水位、山留め壁の上下端の支点条件などを仮定し、弾塑性解析により山留め壁の断面力と変位・切梁反力を求め、山留め壁、支保工の施工計画を決定する。

c) 計測管理

各計測機器により山留め壁の水平変位を計測し、信頼のあるデータのみ保存する。

d) 最適化

求めたい諸定数を未知パラメータとしてセットし、未知パラメータを変化させて、計測変位と解析変位(弾塑性解析で求めた変位)が一致するまでトライアルを行う。トライアル後の未知パラメータが、実際の諸定数と考えられる。また、その時の山留め壁の断面力と変位・切梁反力も同時に計算される。

e) 予測解析

最適化で求めた諸定数を用い、次の施工段階の山留め壁の断面力と変位・切梁反力を求め、この結果から次の施工段階の安全性の検討を行い、施工にフィールドバックさせる。

以上、b)～e)を施工段階数だけ繰り返す。

(2) 適用範囲

① 山留め壁の断面変化点数	10断面
② 切梁設置段数	20段
③ 土層数	20層
④ 計測点数	100点
⑤ 山留め壁の断面力・変位の計算点数	200点
⑥ 施工段階数	40段階
⑦ 未知パラメータ数	50コ

(3) 特徴

- ① 1画面内のカーソル移動や各入出力データとファイルの複写・削除・挿入・追加が行えるスクリーンエディタ機能を有し、データの入出力およびデータファイルの管理が容易に行える。
- ② 各メニュー画面には各メニューのつながり(階層)を表示するため、現在どの位置の処理を行っているかが明らかで、常に全体の流れを把握できる。
- ③ 解析はFORTRAN言語を用いているため、高速である。
- ④ パソコンで稼働するため、現場でのリアルタイム処理が可能である。

- ⑤ 各施工段階の側圧、断面力、変位の各図をプロッタに出力可能である。その特徴を以下に示す。

- 用紙サイズ・図面サイズ・用紙のとりしるを指定することにより、図面の自動配置が行える。

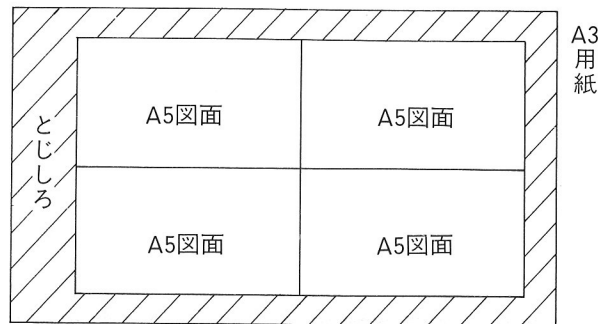


図-2 図面の自動配置

- 図面を四つのブロックに分け、各ブロックごとに図化内容・線の種類・線の色・計算値出力の有無のセットが行えるため、各計算値の重ね合わせ図化や各施工段階の側圧図を並べて図化するなど、多彩な組み合わせが可能である。

図面

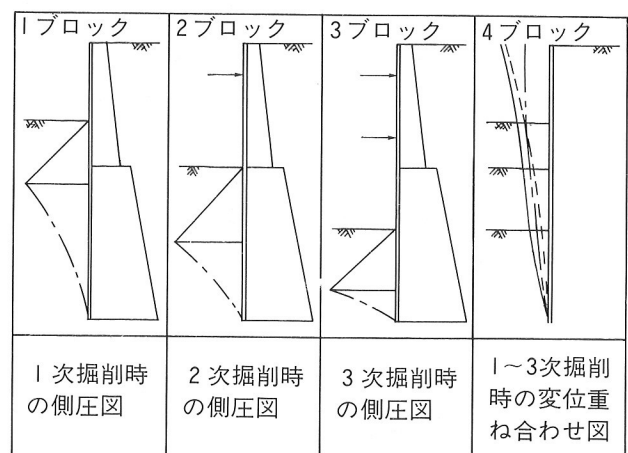


図-3 組み合わせ図化

- ⑥ 各施工段階ごとの側圧・断面力・変位の各図を画面に描画できる。

(4) 作動環境

- ① パソコン本体——PC-98シリーズ(ただし高速演算プロセッサが必要)。
- ② プリンタ——JDL850/GL(日本デジタル研究所) 本プリンタはプリンタとプロッタを兼用している。
- ③ ディスケット——プログラムディスク・入出力データ保存用ディスク(各1枚ずつ必要、MS-DOSでフォーマットしたもの)。
- ④ ケーブル——セントロニクスケーブル・RS232C

ケーブル(各1本ずつ必要)。

3. 解析理論

(1) 順解析

順解析とは、変形法により弾塑性解析を行い、各施工段階における山留め壁の断面力と変位・切梁反力を求めることである。解析モデルは各施工ステップ、解析の種類(掘削時・プレロード時・盛替撤去時・埋め戻し時)によって、側圧、先行変位、支点条件、弾塑性境界が異なる。図-4に各解析モデルを、以下にその説明を示す。

a) 掘削時のモデル

- ① 山留め壁の背面側は、有効主動側圧 P_{ae} を作用させる。
- ② 山留め壁の前面側は、有効受働側圧 P_{pe} と弾性反力 R_v が等しい位置を弾塑性境界とし、弾性域には分布バネを、塑性域には有効受働側圧を作用させる。
- ③ 切梁は弾性支承とし、地中先行変位 δ を考慮する。
- ④ 地中先行変位は、切梁を設置した時点(切梁が弾性圧縮を生じない時点)の山留め壁の切梁設置位置の変位である。
- ⑤ 山留め壁に設置していない側の切梁の支点は固定端とする。
- ⑥ 山留め壁の上下端の支点条件は、フリー、スライド、ヒンジ、固定のいずれかをセットする。
- ⑦ 山留め壁の背面側に等分布荷重 Q を作用させることが可能である。

b) プレロード時のモデル

- ① プレロードの効果は山留め壁の背面側に分布バネをセットし、切梁設置位置に集中荷重 P を作用させて単独に解き、前施工段階の断面力と変位・切梁反力と合成して評価する。

- ② 山留め壁に設置していない側の切梁の支点はスライドとする。
- ③ プレロード後の地中先行変位は、切梁設置位置の土留め壁の変位とする。

c) 盛替撤去時のモデル

- ① 掘削時と同様のモデルを用い、そのモデルから任意位置の切梁を撤去したモデルである。
- ② 前施工段階と同じ掘削深でなければならない。
- ③ 切梁を同時に2本以上撤去できない。

d) 埋め戻し時のモデル

- ① 掘削時と同様のモデルに埋め戻し分布バネをセットし、埋め戻した土を評価する。
- ② 埋め戻し時は前施工段階に埋め戻し分布バネをセットし、最下段の切梁を撤去した時に埋め戻し分布バネの効果が生じる。

e) 記号の説明

主動側圧： $P_a = (\Sigma \gamma h + Q) K_a - 2C \sqrt{K_a} > 0$

受働側圧： $P_p = \Sigma (\gamma Z) + K_p + 2C \sqrt{K_p}$

静止側圧： $P_o = \Sigma (\gamma Z) + K_o$

有効主動側圧： $P_{ae} = P_a - P_o > 0$

有効受働側圧： $P_{pe} = P_p - P_o > 0$

弾性反力： $R_v = \delta \cdot K_{hp}$

ここに、

山留め壁の変位： δ	背面側の分布バネ： K_{ha}
地中先行変位： $\bar{\delta}$	前面側の分布バネ： K_{hp}
プレロード荷重： P	埋め戻し分布バネ： K_{hu}
等分布荷重： Q	土の単位体積重量： γ
主動側圧係数： K_a	土の粘着力： C
受働側圧係数： K_p	背面側の層厚： h
静止側圧係数： K_o	前面側の層厚： Z

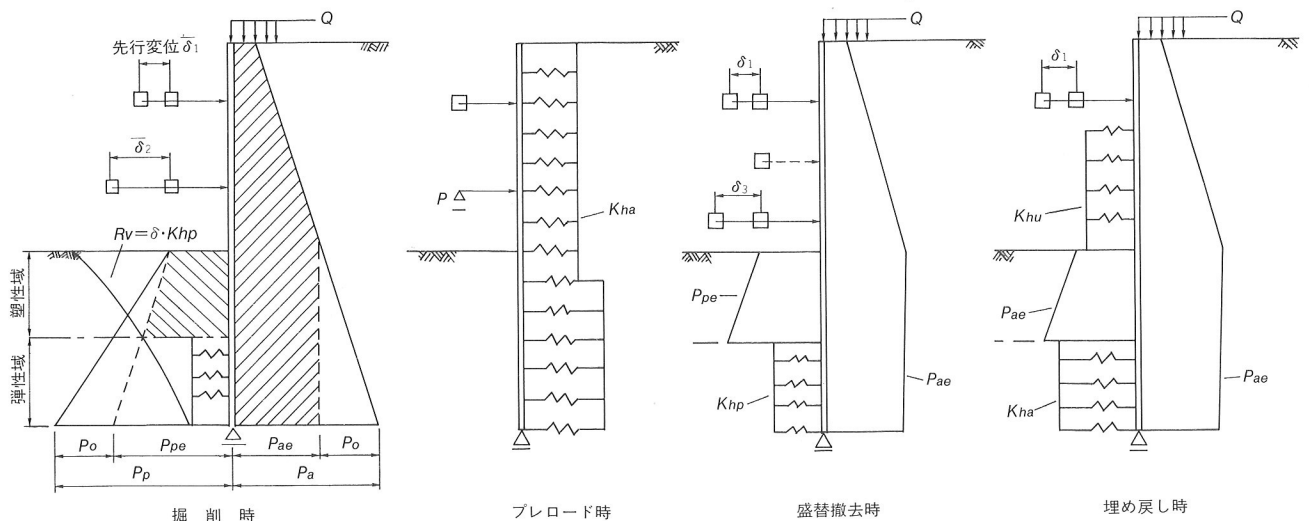


図-4 解析モデル

(2) 最適化

最適化とは、初期パラメータベクトル $\mathbf{X}^{(1)}$ からスタートし、探索方向を補正しながら目的関数 $F(\mathbf{X}^{(i)})$ の最小値を求めることである。目的関数と未知パラメータベクトルを以下に示す。

● 目的関数 $F(\mathbf{X}^{(i)})$

$$F(\mathbf{X}^{(i)}) = \sum \left\{ \delta_j - \delta_j(\mathbf{X}^{(i)}) \right\}^2$$

$i=1 \sim m$: 最適化収束回数

$j=1 \sim n$: 計測点数

δ_j : 山留め壁の計測変位

$\delta_j(\mathbf{X}^{(i)})$: 山留め壁の弾塑性解析で求めた変位

● 未知パラメータベクトル $\mathbf{X}^{(i)}$

山留め壁の剛性(EI)、主働側圧係数(K_a)

切梁のバネ定数(K_b)、受働側圧係数(K_p)

土の単位体積重量(γ)、静止側圧係数(K_0)

背面側分布バネ定数(K_{ha})

前面側分布バネ定数(K_{hb})

背面側の土の粘着力(C_a)

前面側の土の粘着力(C_p)

二次元モデル(未知数二つ)を例にとり、最適化の流れを説明する。なお、図-5に最適化の流れを示す。

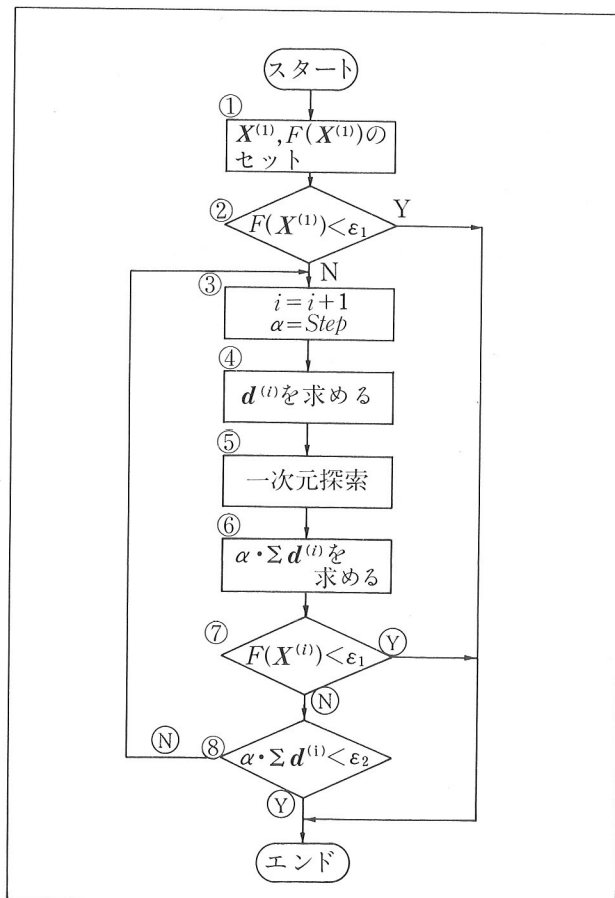


図-5 最適化の流れ

- ① 初期未知パラメータ $\mathbf{X}^{(1)}$ 、初期目的関数 $F(\mathbf{X}^{(1)})$ を求める。

$$\mathbf{X}^{(1)} = [X_a^{(1)}, X_b^{(1)}]$$

$$F(\mathbf{X}^{(1)}) = F(X_a^{(1)}, X_b^{(1)})$$

$\mathbf{X}^{(i)}$ をセットする場合、以下の2点について $\mathbf{X}^{(i)}$ を補正する必要がある。

- 目的関数の形が複雑になるのを防ぐため、 $\mathbf{X}^{(i)}$ と $F(\mathbf{X}^{(i)})$ を比例関係になるようにする。

$$(\text{例}) \quad EI \rightarrow 1/EI$$

$$K_p \rightarrow 1/K_p$$

- $\mathbf{X}^{(i)}$ の成分を同一オーダーに補正しないと、探索ステップ幅 α を変化させても、 $\mathbf{X}^{(i)}$ の成分が変化するものとしにくいものである。

$$\mathbf{X}^{(i)} = A \times \mathbf{X}^{(i)} = [A_a \cdot X_a^{(i)}, A_b \cdot X_b^{(i)}]$$

- ② 初期目的関数 $F(\mathbf{X}^{(1)})$ が目的関数収束精度 ε_1 をより小さければ、最適化を終了する。

- ③ 最適化収束回数 i をカウントする($i=i+1$)。また、一次元探索ステップ幅 α を初期化する。初期ステップ幅 $Step$ は入力値である($\alpha=Step$)。

- ④ $\mathbf{X}^{(i)}$ の勾配ベクトル $\mathbf{d}^{(i)}$ は数値微分により求め、その逆方向とする。 $\mathbf{d}^{(i)}$ は一次元探索($\mathbf{d}^{(i)}$ の方向に $F(\mathbf{X}^{(i)})$ の最小値を探索すること)の過程で、次の探索ステップの未知パラメータ $\mathbf{X}^{(i+1)}$ を算定する時に用いられる。

$$\mathbf{d}^{(i)} = - \frac{dF(\mathbf{X}^{(i)})}{d\mathbf{X}^{(i)}} \quad D \text{ は数値微分に用いるパラメータ分割数である。}$$

$$d\mathbf{X}^{(i)} = \frac{\mathbf{X}^{(i)}}{D} = \left[\frac{X_a^{(i)}}{D}, \frac{X_b^{(i)}}{D} \right]^T$$

$$dF(\mathbf{X}^{(i)}) = F(\mathbf{X}^{(i)} + d\mathbf{X}^{(i)}) - F(\mathbf{X}^{(i)})$$

$$= \begin{bmatrix} F\left(X_a^{(i)} + \frac{X_a^{(i)}}{D}, X_b^{(i)}\right) - F(\mathbf{X}^{(i)}) \\ F\left(X_a^{(i)}, X_b^{(i)} + \frac{X_b^{(i)}}{D}\right) - F(\mathbf{X}^{(i)}) \end{bmatrix}$$

- ⑤ 一次元探索とは、 $\mathbf{X}^{(i)}$ からスタートし $\mathbf{d}^{(i)}$ の方向に α を変化させ、 $\mathbf{X}^{(i+1)} = \mathbf{X}^{(i)} + \alpha \mathbf{d}^{(i)}$ 、 $F(\mathbf{X}^{(i+1)})$ を求め、 $F(\mathbf{X}^{(i+1)})$ が最小となるまで繰り返すことである。求められた $\mathbf{X}^{(i+1)}$ 、 $F(\mathbf{X}^{(i+1)})$ は、次の探索ステップ($i+1$)の探索開始位置となる。また、一次元探索の手法は、Rosen Brockの方法を用いる。

- ⑥ 未知パラメータベクトルの増分の絶対値の和を求める。

$$\alpha \cdot \mathbf{d}^{(i)} = |(X_a^{(i+1)} - X_a^{(i)})| + |(X_b^{(i+1)} - X_b^{(i)})|$$

- ⑦ 一次元探索で求められた $F(\mathbf{X}^{(i+1)})$ が ε_1 より小さければ、最適化を終了する。

- ⑧ $\alpha \cdot \mathbf{d}^{(i)}$ が ε_2 より小さければ、最適化を終了する。

③～⑧を繰り返し、②、⑦、⑧のいずれかの条件を満たした時に最適化を終了し、①に示す $\mathbf{X}^{(i)}$ の補正値の逆数を $\mathbf{X}^{(i)}$ に乘じ、未知パラメータを求める。図-6に最適

化の収束過程を、図-7に2ステップ目の一次元探索過程を示す。

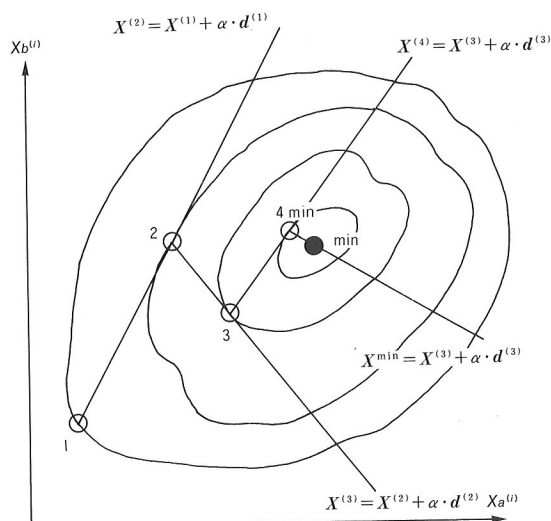


図-6 最適化収束過程

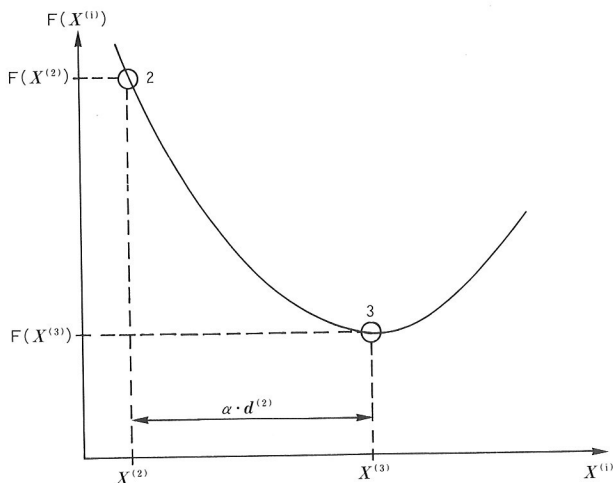


図-7 2ステップ目の一次元探索

最適化で求めた変位と計測変位を比較し、その精度を検討する必要がある。また、諸定数および変位について最適化の結果と設計計算の結果を比較検討することも重要である。

(3) 予測解析

予測解析とは、最適化で求めたパラメータ(諸定数)を用い、弾塑性解析により次の施工段階の山留め壁の断面力および変位を求めることである。この結果から、次の施工段階の安全性の検討を行い、必要に応じて施工計画の見直しや対策工を考え施工にフィードバックさせる。また、次の施工段階での計測変位と本施工段階の予測解析で求めた変位を比較検討し、相違していれば、その原因を検討する必要がある。

4. 出力例

施工ステップ1～4の計測変位と最適化で求められた

変位を重ね合わせた図を図-8に示す。この結果より、計測値と解析値がほぼ一致していることがわかる。

施工名: B浄化センター
データ名: E杭-2
最適化 STEP1-4

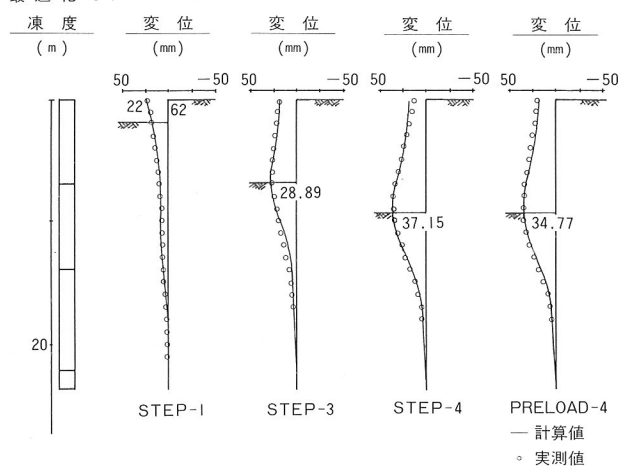


図-8 計測変位と解析変位の重ね合わせ図化

5. まとめ

以上、本システムの概要について述べた。近年、大規模で大深度の山留め工事が多くなり、設計計算だけでは信頼性に欠けるため、計測しながら施工する情報化施工が不可欠なものとなっている。本システムを使用することにより、設計施工業務の軽減を図ることができれば幸いである。

今後、施工実績を重ねることにより、計測値の評価方法、解析精度、および手法の改良など、システム全体の信頼性の向上が必要である。また、最適化の探索過程の二次元・三次元図化を行い、未知パラメータの組み合わせによる収束状態や目的関数の形状の把握を行うことも重要な課題である。

最後に、本システムの開発にあたってご指導をいただいた(株)間組土木本部・内田氏に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本道路協会：共同溝設計指針，1986。
- 2) 建設省土木研究所：掘削土留工設計指針，1982。
- 3) 土木学会：トンネル標準示方書，1986。
- 4) 建築学会：建築基礎構造物設計基準・同解説，1974。
- 5) 町田東一・小島紀男：BASIC数値計算II，1981。
- 6) L.W.C.ディクソン：非線形最適化計算法，昭和49年5月。
- 7) J.コワリック・M.R.オスボーン：非線形最適化問題，昭和45年12月。