

最適化手法による山留め予測解析システムの開発

(株) システムエンジニアリング

○松本 正三

(株) 間 組

正会員 内田 雅博

1. まえがき

現在、大規模・大深度の山留め工事の設計計算は、事前調査等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行う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考えられる。そこで、山留め壁・支保工等に各種計測機器を設置し、各施工段階毎に計測したデータと解析結果をフィッティングさせることにより設計計算に必要な諸定数を求め(最適化)、その諸定数を用い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情報化施工が注目されている。山留め壁の最適化に用いられる非線形最適化手法は、数理計画法の最適化手法と確立論を用いた最適化手法の2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法等、後者には拡張カルマンフィルター法等、様々な手法が提案されている。本システムの最適化手法は未知数が多くかつ施工段階毎に山留め壁の構造条件が変化する問題を取り扱うため、次の2点を考慮して数理計画法の最急降下法を採用した。

① 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おり、探索手続きが発散しない
また、山留め壁の挙動をリアルタイムに把握する必要性から、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。そのシステム概要と、解析理論・解析事例を以下に述べる

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。点線枠の中が本システムの適用範囲である。

(2) 適用範囲

山留め壁の断面変化点数 (10)	計測点数 (100)	未知数 (50)
切梁の設置段数 (20)	施工段階数 (40)	
土層数 (20)	山留め壁の計算点数 (200)	

(3) 特徴

- ① スクリーンエディタ機能を有し、データの入出力が容易に行える
- ② 解析部はFortran言語を用いているため高速である。
- ③ 各施工段階の側圧・断面力・変位・計測値をブロックに出力でき用紙・図面サイズおよび用紙のとりしろを設定することにより、図面の自動配置が行える。また、図面を4つのブロックに分け、各ブロック毎に図化内容・線の種類・線の色・計算値の出力有無のセットが行えるため、各計算値の重ね合せ図化や各施工段階毎に側圧図を並べて図化するなど多彩な組合せ図化が可能である。
- ④ 各施工段階毎の側圧・断面力・変位・計測値を画面に描画できる。
- ⑤ 順解析・最適化・予測解析の各解析について、掘削時・プレロード時・盛替撤去時・埋め戻し時の計算が行える。

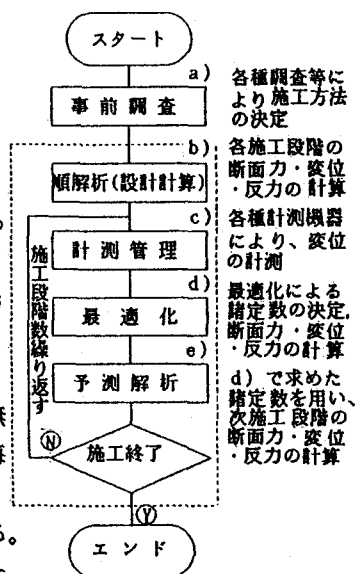


図-1 情報化施工の流れ図

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・変位、切梁反力を求めることである。各施工段階（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-2に解析モデルを示す。

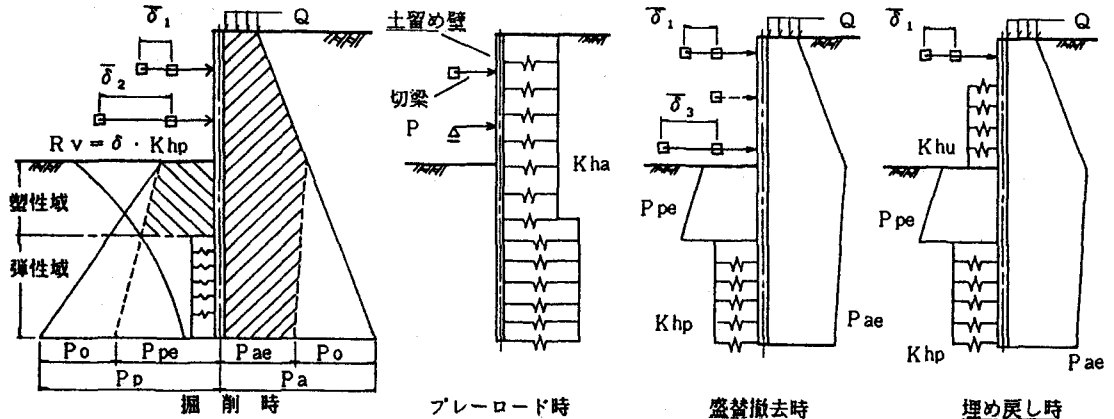


図-2 解析モデル

(2) 最適化

最適化とは初期パラメータベクトル $X^{(1)}$ からスタートし、探索方向を補正しながら目的関数 $F(X^{(i)})$ の最小値を求め、その時の X が最適化された諸定数である。以下に $F(X^{(i)})$ および $X^{(i)}$ を示す。

- 目的関数 $F(X^{(i)}) = \sum \{ \delta_j - \delta_j(X^{(i)}) \}^2$

$i = 1 \sim m$: 最適化収束回数 δ_j : 山留め壁の計測変位

$j = 1 \sim n$: 計測点数 $\delta_j(X^{(i)})$: 順解析による山留め壁の変位

- 未知パラメータベクトル $X^{(i)}$ — $E I \cdot K b \cdot r \cdot K a \cdot K p \cdot K o \cdot K h a \cdot K h p \cdot C a \cdot C p$

次に、二次元モデル（未知数二つ）を例にとり、図-3に従って最適化の流れを説明する。なお、図-4、5に収束過程を示す。

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

$$X^{(1)} = [X a^{(1)}, X b^{(1)}]$$

$$F(X^{(1)}) = F(X a^{(1)}, X b^{(1)})$$

$X^{(i)}$ をセットする時に、以下の2点について $X^{(i)}$ を補正する。

- 目的関数の形が複雑になるのを防ぐため、 $X^{(i)}$ と $F(X^{(i)})$ が比例関係となるよう補正する。

(例) $E I \rightarrow 1/E I$, $K o \rightarrow 1/K p$

- $X^{(i)}$ の成分を同一オーダーに補正しないと探索ステップ α を変化させても、ほとんど変化しない $X^{(i)}$ の成分がでてしまう。

$$X^{(i)} = A \cdot X^{(i)} = [A a \cdot X a^{(i)}, A b \cdot X b^{(i)}]$$

- ② 初期目的関数 $F(X^{(1)})$ が目的関数収束精度 ϵ_1 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。また、一次元探索ステップ α を初期化する。初期ステップ α は入力値である。

- ④ $X^{(i)}$ の勾配ベクトル $d l^{(i)}$ は数値微分により求め、その逆方向と

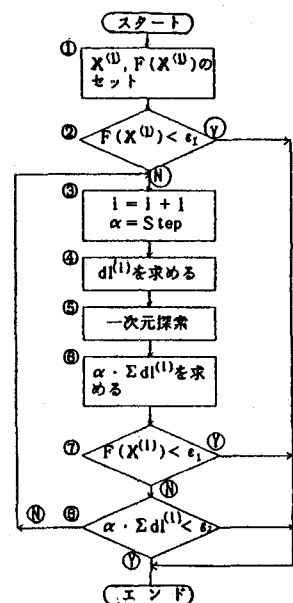


図-3 最適化の流れ

$$dI^{(i)} = \frac{dF(X^{(i)})}{dX}$$

$$d \mathbf{X}^{(i)} = \frac{\mathbf{X}^{(i)}}{D} = \left[\frac{X_{a(i)}}{D}, \frac{X_{b(i)}}{D} \right]$$

$$dF(\mathbf{X}^{(i)}) = F(\mathbf{X}^{(i)} + d\mathbf{X}^{(i)}) - F(\mathbf{X}^{(i)}) = \begin{bmatrix} F(\mathbf{X}^{(i)} + \frac{d\mathbf{a}^{(i)}}{D}, \mathbf{X}^{(i)}) - F(\mathbf{X}^{(i)}) \\ F(\mathbf{X}^{(i)}, \mathbf{X}^{(i)} + \frac{d\mathbf{b}^{(i)}}{D}) - F(\mathbf{X}^{(i)}) \end{bmatrix}$$

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。

$$\alpha \cdot dl^{(i)} = | (X^{a(i+1)} - X^{a(i)}) | + | (X^{b(i+1)} - X^{b(i)}) |$$

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

③～⑥を繰り返す、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 $X^{(i)}$ の補正值の逆数を $X^{(i)}$ に乘じ、パラメータを求める。

予測解析とは最適化で求めたパラメータ（諸定数）を用い、順解析により次の施工段階の山留め壁の断面力・変位、切梁反力を求めることである。この結果から次施工段階の安全性の検討（管理基準値との比較）を行い、必要に応じて施工計画の見直しや対策工をなす施工にフィードバックさせる。

(1) 工事概要および施工条件

当地の地盤は、表層部約0～6mにN値1～2を示す軟弱地盤が、約6～19mにN値10～20前後の層があり、約19m以深に支持層として期待できる砂礫地盤および岩盤が分布す

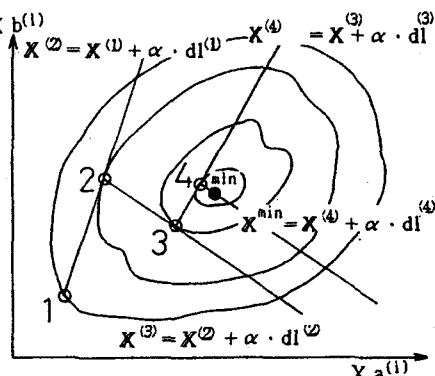


図-4 最適化の収束過程

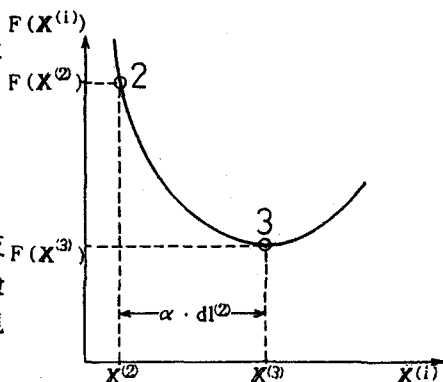


図-5 2ステップ目の一次元探索

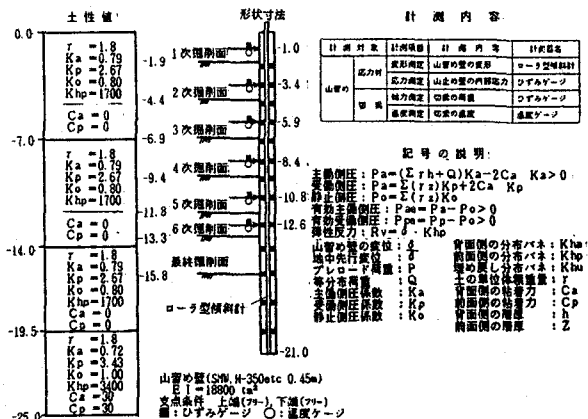


圖-6 施工条件

るといった性状を示している。このような軟弱地盤の掘削工事は危険性が伴うため、図-6に示す施工条件を基に情報化施工を行い、その解析結果を以下に示す。

(2) 解析結果

山留め壁の計測変位を用い、第5次施工時（掘削深GL-11.8m）の最適化により諸定数を求め、その諸定数を用い、次施工段階の予測解析を行った例を次に示す。

表-1より、未知パラメータは6種類（合計15個）を選び、最適化を行った。その結果、図-7より最適化で求めた変位と計測変位はほぼ一致しており、最適化が精度良く行われたことがわかる。また、最適化には計測変位のみしか用いていないが、最適化で求めたモーメント値と計測したひずみ値より得られるモーメント値には良い相関が得られていることがわかる。

表-1に示す予測値を用い予測解析を行った結果、図-8より予測解析より計測値の方が下回っており施工管理上問題なく工事が行われたことが確認できる。

表-1 パラメータの初期値および最適値

深 度 (m)	$r(t/m^2)$		K_a		K_p		K_o		$K_{ha}(t/m^2)$		$K_{hp}(t/m^2)$		$C_a(t/m^2)$		$C_p(t/m^2)$		切梁バネ定数 $K_b(t/m^2)$		
	初期値	SW	初期値	SW	初期値	SW	初期値	SW	初期値	SW	初期値	SW	初期値	SW	初期値	SW	初期値	最適値	SW
	最適値		最適値		最適値		最適値		最適値		最適値		最適値		最適値		最適値		
7.00	0.80		0.720	*	2.670		0.800		1700		1700		0.000		0.000		6900	18023	*
			0.775														10000	1615	*
																	12700	20896	*
																	12700	13145	*
14.00	0.80		0.720	*	2.670	*	0.800	*	1700		1700	*	0.000		0.000		剛 性 $EI(t \cdot m^2)$		
			0.728				0.798				1536								
19.50	0.80		0.720	*	2.670	*	0.800	*	1700		1700	*	0.000		0.000		初期値	最適値	SW
			0.707		2.325		0.315				2784						18800	16437	*
21.00	0.80		0.720	*	3.430		0.000		3400		3400	*	30.000		30.000				
			0.600								3839								

SW：*マークは最適化を示す

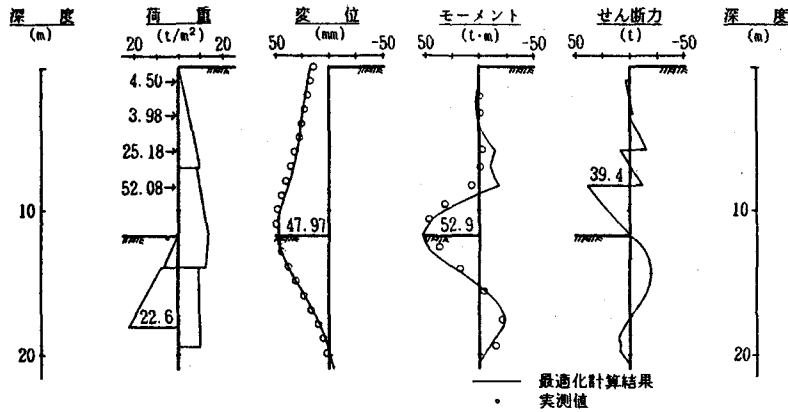


図-7 最適化結果

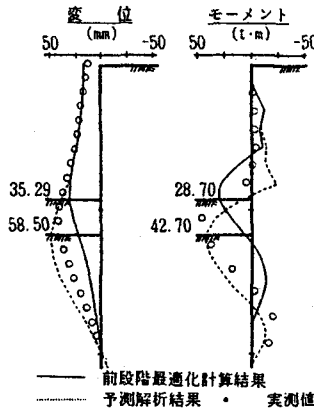


図-8 予測解析結果

5. まとめ

以上、本システムの概要について述べた。土木技術の発達により大規模山留め工事が多くなり、設計計算だけでは危険性が伴ない情報化施工が不可欠なものとなってきている。本システムを使用することにより設計施工業務の軽減がはかれれば幸いである。今後、施工実績を重ねることにより、計測値の評価方法や解析精度・解析手法の改良等システム全体の向上が必要である。また、最適化探索過程の二次元・三次元図化により、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御協力を頂いた法政大学・大地教授に心より感謝致します。