

神戸大工学部 正 清水剛一 同 正 櫻井春輔

1. はじめに

トンネルなど地下空洞の掘削時に得られる現場計測結果は速やかに解析され、施工にフィードバックされねばならない。筆者らは、既に、トンネル掘削時の変位計測結果から地山の初期応力とヤング係数を推定する方法(直接逆解析法-DBAP)を提案した。^{1), 2)}しかし、この方法では掘削過程を考慮しておらず、大規模な地下空洞掘削問題に、これを直接適用することは適当ではない。本文は、直接逆解析法を発展させ、掘削過程を考慮した、変位計測結果の逆解析法の提案を行うものである。

2. 基本方針

一般に、計器は各掘削段階終了後、設置されるため、計測開始は次掘削段階からとなる。つまり、図-1において、地中変位計と内空変位計種①は、i-1次掘削終了後設置され、i次掘削以降の変位の変化を測定することになる。この“計測遅れ”を考慮した逆解析法を提案することが本文の目的である。まず、次の仮定を設ける。

- (i) 地山の変位は連続、弾性的である。
- (ii) 掘削による周辺地山のゆきみは小さい。

上記仮定の下に、解析の基本方針を以下に示す(図-2参照)。解析モデルには、等方等質弾性体を用いる。

1. i-1次掘削終了後の応力分布よりi次掘削時の掘削面の解放応力を求める。この解放応力は初期応力と線形関係にある。
2. i次掘削によって生じる変位増分と掘削解放応力との関係式を誘導する。
3. 1)及び2)における得た関係式を組み合せて、i次掘削の変位増分と初期応力の関係式を求める。
4. これを变形して、変位増分～初期応力パラメータ(初期応力ヤング係数)の関係式を求める。
- 5) ポアソン比を仮定し、測定値と4)の関係式の残差の二乗和が最小となるよう各、初期応力パラメータを求める。

初期応力パラメータから初期応力とヤング係数を求める手順は[2]と同様である。

3. 定式化

2の方針に基づいた逆解析法の定式化を行う。定式化は、有限要素法、境界要素法を利用して、これに従って行う。また、本文では、後者についてのみ記述する。なお、以下、式は離散化した形で表示する。

1) i次掘削時の解放応力と初期応力の関係式

i-1次掘削終了時、成立する方程式を次のように表す。

$$[\mathbf{T}]_{i-1} \{\delta\}_{i-1} + [\mathbf{N}]_{i-1} \{\sigma^0\} = \{0\} \quad (1)$$

ただし、 $[\mathbf{T}]$ は応力ベクトルの基本特異解を積分して得られる影響係数、 $[\mathbf{N}]$ は空洞壁面の外法線ベクトルにより構成されるマトリックスである。また、 $\{\delta\}$ は未知ベクトル、 $\{\sigma^0\}$ は初期応力ベクトル $\{\sigma_1^0, \sigma_2^0, \sigma_3^0\}^T$ である。なお、添字 $i-1$ は掘削段階を表す。掘削面に作用する応力 $\{\sigma\}_{i-1}$ は $\{\delta\}_{i-1}$ を用いて次のように表される。

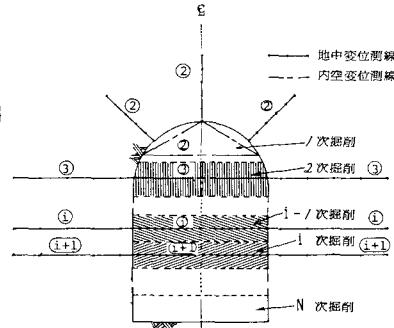


図-1 挖削モデル

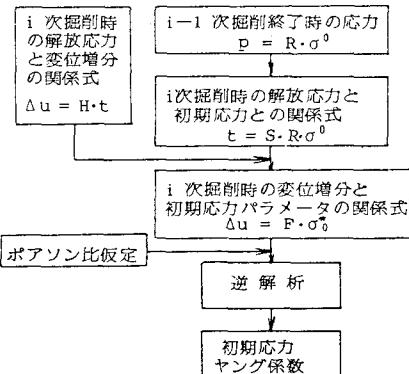


図-2 解析手順

$$\{P\}_{i-1} = [T_p]_{i-1} \{\varphi\}_{i-1} + [n_p]_{i-1} \{\sigma^o\} \quad (2)$$

ただし、 $[T_p]$, $[n_p]$ は、 $[T]$, $[n]$ と同じ意味を持つマトリックスである。式(1)及び(2)より次式を得る。

$$\{P\}_{i-1} = ([T_p]_{i-1} [T]_{i-1}^{-1} [n]_{i-1} + [n_p]) \{\sigma^o\} \equiv [R]_{i-1} \{\sigma^o\} \quad (3)$$

上式に負符号を付いたものが解放応力である（掘削面の法線ベクトルの向きに注意・図-3参照）。

2. 一次掘削による変位増分と初期応力との関係式

一次掘削終了時に成立する方程式を次のようになります。

$$[T]_i \{\varphi\}_i = \{t\}_i \quad (4)$$

ただし、 $\{t\}_i$ は解放応力であり $\{u\}_i$ とは、次の関係にある。

$$\{t\}_i = [S]_i \{P\}_{i-1} \quad (5)$$

ただし、 $[S]_i$ は、 $0 \leq i \leq 1$ により構成されるマトリックスである。一方、

変位増分は $\{\varphi\}_i^i$ を用いて、次のようになります。

$$\Delta u = \frac{1}{E} \{U\}_i^T \{\varphi\}_i^i = \frac{1}{E} \{U\}_i^T [T]_i^{-1} \{t\}_i \quad (6)$$

ただし、 $\{U\}$ は変位基本特異解を積分して得られる影響係数ベクトルである。また、 E はヤング係数である。式(3)及び(6)を式(6)に代入する。

$$\Delta u = \frac{1}{E} \{U\}_i^T [T]_i^{-1} [S]_i [R]_{i-1} \{\sigma^o\} \quad (7)$$

初期応力とヤング係数の比をパラメータ α で表すと上式は次のようになります。

$$\Delta u = \{F\}_i^T \{\sigma^o\} \quad (8)$$

$$\{\sigma^o\} = [\sigma_{11}/E \ \sigma_{22}/E \ \sigma_{12}/E]$$

上式より、地中変位、内空変位及び天端沈下に対する変位式を求め、さらにポアソン比を仮定して、最小二乗法によりパラメータを求める手順及びパラメータより初期応力及びヤング係数の推定法は[2]と同様である。

4. 解析例

図-4は、ミニミレーション結果の一例である。図中・は弾性解を平均値として正規化数を発生させた計算変位、点線は逆解析により推定される変位である。合併、地中変位は壁面からの相対変位としている。表-1は、出・入力の変動係数の比である。これは、入力値のばらつきの出力値のそれに対する影響を表すもので、解析法の安定性の指標となる。図-4及び表-1より提案する方法は安定した良い結果を与える事がわかる。

5. まとめ

本文では、掘削過程を考慮した逆解析法を提案し、解析例を示した。これより、提案する方法の安定性と解の収束性が示された。

参考文献 1) 横井武内、工学論集、投稿中
2) 清水樹井、ISRM 土盤シニボ、pp.175~179, 1983

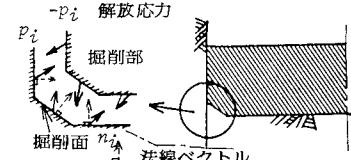
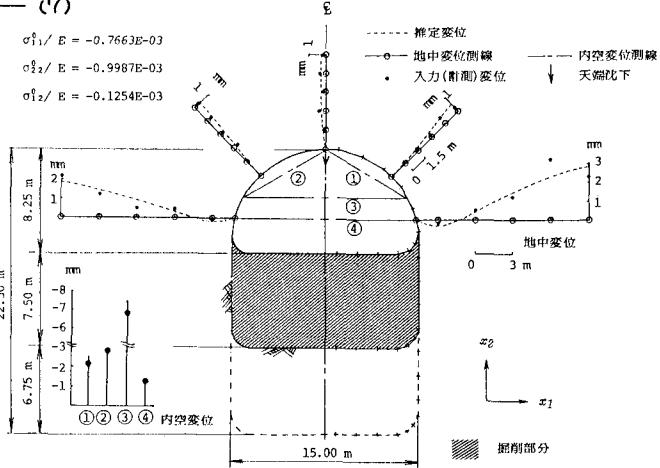


図-3 掘削面と解放応力

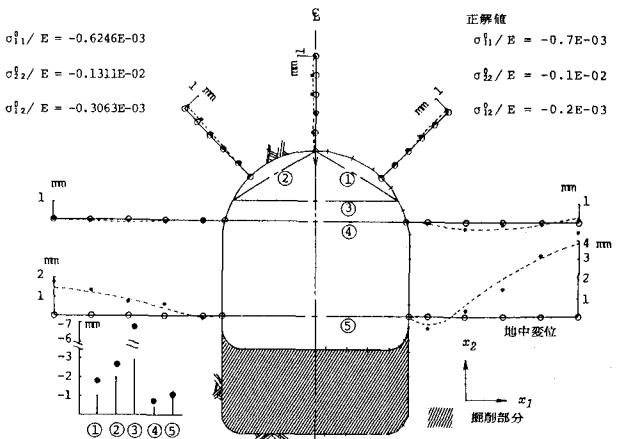
表-1 初期応力パラメータと入力変位の変動係数の比

	二次掘削	三次掘削
S_{11}/C_V	0.6294	0.6468
S_{22}/C_V	0.9497	1.7962
S_{12}/C_V	1.2845	1.4717

S_{11}, S_{22}, S_{12} : パラメータの変動係数
 C_V : 入力変位の変動係数



(a) 二次掘削



(b) 三次掘削

図-4 解析例 (入力変位の変動係数 0.3 の場合)