

応用地質 編集 正会員 ○進士 正人
神戸大学工学部 正会員 桜井 春輔

1. はじめに

著者らは、先に、計測断面における現場変位計測結果から、最終の地山の変位状態を推定する方法を提案した¹⁾。本研究では、先に提案した方法に改良を加えると共に、計測断面における現場変位計測結果から、地山の最終ひずみ分布を推定する。ここで提案する方法は、著者らがすでに提案した「直接逆解析法」プログラム”DBA P/M(Direct Back Analysis Program for Micro computer)”²⁾を利用する。この逆解析プログラムを利用すれば、各計測日時毎のすべての変位計測値が利用できるため、各計測データに含まれる誤差の影響を最小にすることができる。それと同時に、変位計測結果から初期応力パラメータ（初期応力を弾性係数で除した値、すなわち、 σ_{x0}/E 、 σ_{y0}/E 、 τ_{xy0}/E ）を経時的に求めることができる²⁾。そして、これらの値を通常のFEM解析等のインプットデータとするならば、現時点でのトンネル周辺の地山のひずみ分布を容易に求めることができる。しかし、このようにして求められる地山のひずみ分布は、測定が行なわれた時点のものであり、ロックボルトや吹き付けコンクリートの妥当性を検討するには不十分である。すなわち、それらの妥当性は、最終のひずみ分布と著者のひとりが提案している「限界ひずみ」³⁾を比較することにより、はじめて可能となる。そのためには、ある時点で得られる初期応力パラメータから、常に、その最終状態のひずみ分布を予測する必要がある。

2. 直接逆解析法を用いた最終ひずみ分布の予測法

図1に示すように、ある時間 T における初期応力パラメータの速度 $\dot{\sigma}_r$ とある時間 T から最終状態までの初期応力パラメータの増加量 $\sigma_r - \sigma$ の間には、次のような関係が成り立つと仮定する。

$$\sigma_r - \sigma = C \dot{\sigma}_r \quad (1)$$

ここで、 σ 及び σ_r は、それぞれ時間 T における現在の初期応力パラメータ及び最終状態の初期応力パラメータを表わす。なお、ここでは簡単のために現在の初期応力パラメータ $\langle \sigma_{x0}/E, \sigma_{y0}/E, \tau_{xy0}/E \rangle$ 及び最終状態での初期応力パラメータ $\langle \sigma_{rx0}/E, \sigma_{ry0}/E, \tau_{rxy0}/E \rangle$ をそれぞれ “初期応力パラメータ”、“最終初期応力パラメータ” と呼び、単に σ 及び σ_r と表記する。また、 C は地質、支保工、トンネル形状等によって定まる時間の次元をもつ定数であり、“予知定数”と呼ぶ¹⁾。予知定数 C が得られれば、(1)式より最終初期応力パラメータを予測することができる。しかし、予知定数 C を推定することは難しい。そこで、予知定数を決めずに最終初期応力パラメータを求める方法を提案する。

ある時間 t_1, t_2 において初期応力パラメータの値 σ_{t1}, σ_{t2} とその速度 $\dot{\sigma}_{t1}, \dot{\sigma}_{t2}$ が得られたとする。これらを(1)式へ代入し、予知定数を仮定すると次式が得られる。

$$\sigma_{r1} = C (\dot{\sigma}_{t1}) + \sigma_{t1} \quad ; \quad \sigma_{r2} = C (\dot{\sigma}_{t2}) + \sigma_{t2} \quad (2)$$

ここで、 σ_{r1}, σ_{r2} は、それぞれ時間 t_1 と t_2 において予測した最終初期応力パラメータである。

いま、予知定数 C をうまく選べば σ_{r1}, σ_{r2} は一致するはずであるが、実際には C が不明であるため両者は異なる。従って、任意の時間 T における仮の最終初期応力パラメータ σ_{r^*} は、次のように表されるものとする(図2

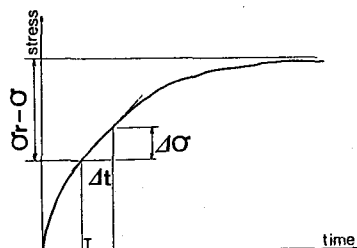


図1 ある時間 T における初期応力パラメータの速度と最終値までの増加量の関係

参照)。

$$\sigma_r \cdot (C) = \alpha T + \beta \quad (3)$$

$$\text{ここで、} \quad \alpha = \frac{1}{t_1 - t_2} \begin{bmatrix} CA_1 + A_2 \\ B_1 + B_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_1 = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right)_{t_1} - \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right)_{t_2} ; A_2 = \sigma_{t_1} - \sigma_{t_2} \\ B_1 = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right)_{t_2} t_1 - \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right)_{t_1} t_2 ; B_2 = \sigma_{t_2} t_1 - \sigma_{t_1} t_2$$

いま、任意に2個の予知定数 C_1, C_2 を仮定すると、(3) 式によって σ_r と T に関する二個の直線の式が得られる。真の最終初期応力パラメータ σ_r は、予知定数に関係なく一定値でなければならない。従って σ_r は、二直線の交点として次のように求められる。

$$\sigma_r = \frac{\alpha_1 \beta_1 (\beta_2 - \beta_1)}{\sigma_{t1} - \sigma_{t2}} \quad (5)$$

ここで、添字を持つ α, β は、それぞれの予知定数に対する値である。

結局、(5) 式に (4) 式を代入すると真の最終初期応力パラメータは、現在の初期応力パラメータの値とその速度によって次式のように表される。

$$\sigma_r = \frac{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right)_{t_1} \sigma_{t_2} - \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right)_{t_2} \sigma_{t_1}}{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right)_{t_1} - \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right)_{t_2}} \quad (6)$$

よって、任意の2回の計測によって初期応力パラメータとその速度が得られれば、(6) 式によって、最終初期応力パラメータを求めることができる。

次に、 n 回の計測 $t_i (i=1, n)$ が行なわれ、それぞれ初期応力パラメータ $\sigma_{t_i} (i=1, n)$ と、その速度 $\frac{\partial \sigma}{\partial t} (i=1, n)$ が求められたとする。この場合も、(3) 式と同様に、任意時間における仮の最終初期応力パラメータを直線で表わすことにする。しかし、係数 α, β を求めるためには、なんらかの最適化手法が必要となる。ここで、最小二乗法を用いるならば、 n 回の計測によって得られた最終初期応力パラメータの値と速度をもっともよく満足する (3) 式の係数 $\{\alpha_0\}$ は、次式ようになる。

$$\{\alpha_0\} = C \{ [A]^T [A] \}^{-1} [A]^T \{ \frac{\partial \sigma}{\partial t} \} + \{ [A]^T [A] \}^{-1} [A]^T \{ \sigma \} \quad (7)$$

$$\text{ここで、} [A] = \begin{bmatrix} t_1 & 1 \\ t_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ t_n & 1 \end{bmatrix} ; \{ \alpha_0 \} = \begin{bmatrix} \sigma \\ \beta \end{bmatrix} ; \{ \frac{\partial \sigma}{\partial t} \} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \sigma}{\partial t} \big|_{t_1} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial t} \big|_{t_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial \sigma}{\partial t} \big|_{t_n} \end{bmatrix} ; \{ \sigma \} = \begin{bmatrix} \sigma_{t_1} \\ \sigma_{t_2} \\ \vdots \\ \sigma_{t_n} \end{bmatrix}$$

よって、(7) 式を (5) 式へ代入することにより、2回だけ計測が行なわれた場合と同様に予知定数には関係なく真の最終初期応力パラメータ σ_r を求めることができる。

3. 実際問題への適用

A トンネルにおいて、まずある時間 T における地中変位の計測結果から DBAP/M によって、初期応力パラメータを求め、その値と増加の速度、並びに予知定数 C を $C=2$ と $C=20$ と仮定して、(1) 式によってそれぞれの予知定数の仮の最終初期応力パラメータの予測を行なった。次に、それらの予測値から真の最終初期応力パラメータを求めた。なお、確認のために、 $C=6$ のケースも試みた。その結果を、図3(a)、(b)に示す。図(a)、(b)におい

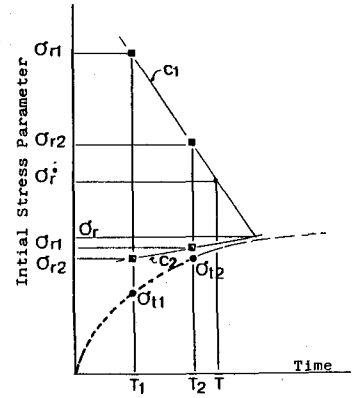


図2 予知定数を用いない場合の初期応力パラメータの予測法

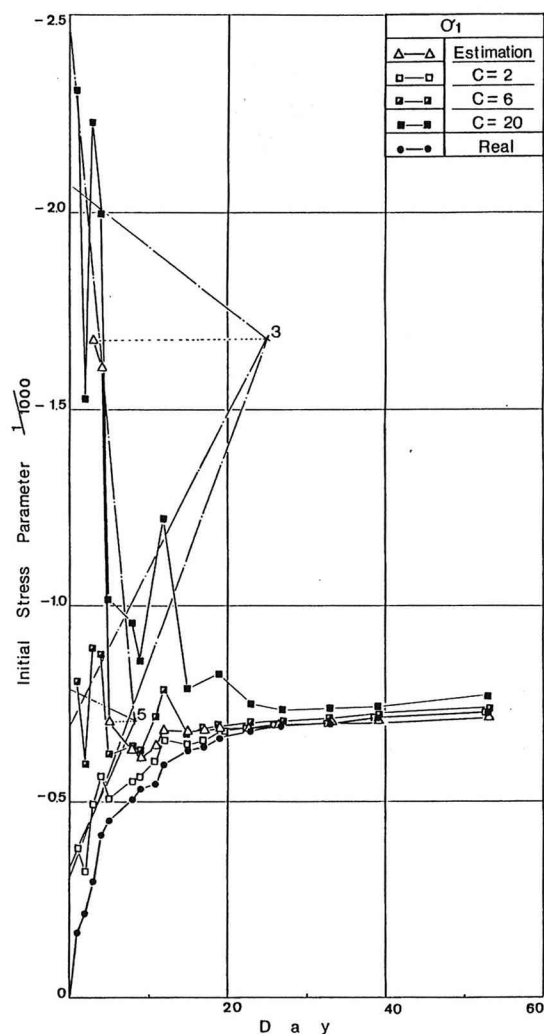


図3(a) 地中変位計測結果を用いた初期応力パラメータの予測(最大主値)

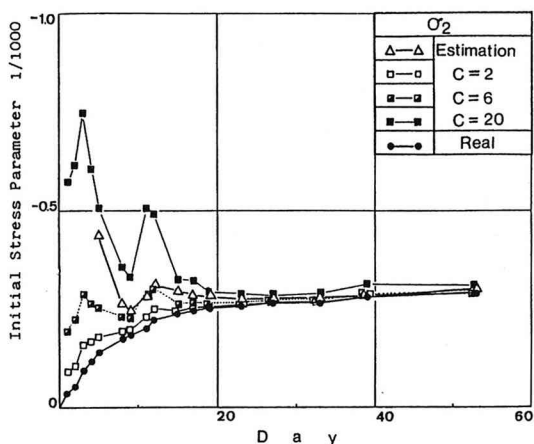


図3(b) 地中変位計測結果を用いた初期応力パラメータの予測(最小主値)

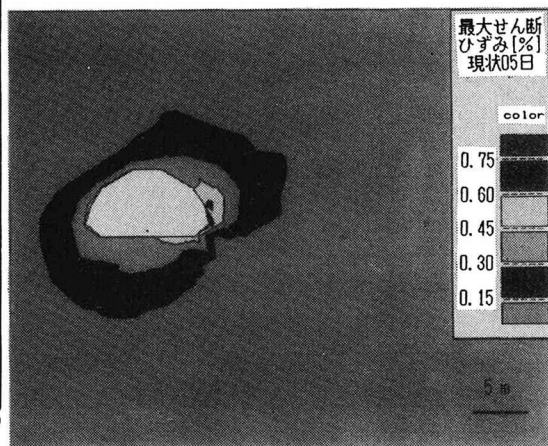


写真1(a) 計測開始5日目における現状の最大せん断ひずみ分布

て□、■、●印の実線は、予測定数を、それぞれC=2、C=6及びC=20とした時における最終初期応力パラメータの仮の予測結果である¹⁾。

次に、ここで提案した方法によって3回目以降の計測と同時に、真の最終初期応力パラメータを求めた。図3(a)、(b)において、△印は、真の最終初期応力パラメータであり、予知定数に関係なく求めることができる。また、参考までに、各測定時間における初期応力パラメータを●印実線で示した。なお、この適用例では、初期応力パラメータの主値の傾きは変化しないので、その主値 $\langle \sigma_1, \sigma_2 \rangle$ によって示してある。図から明らかのように、最終初期応力パラメータは、計測開始後約5日目以降から、かなりの精度でその最終値の予測が可能となることが明らかとなった。

写真1(a)、(b)、(c)に、計測開始後5日、11日及び最終日におけるトンネル周辺の、現状の最大せん断ひずみ分布を示す。また、写真2(a)、(b)に計測開始後5日及び11日におけるトンネル周辺の最大せん断ひずみ分布の予測結果である。これらの図から、掘削開始5日目には、現状ではトンネル周辺には0.45%以下のひずみ分布

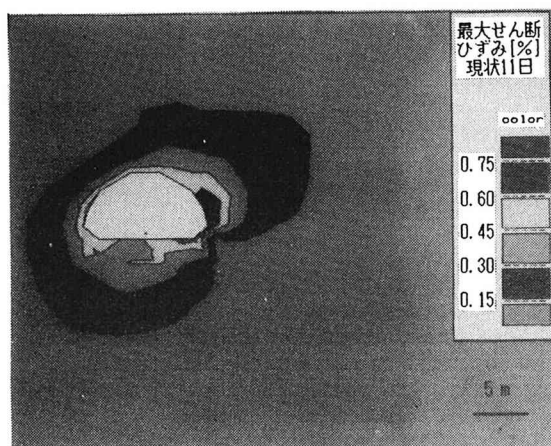


写真 1 (b) 計測開始 1 1 日目における現状
の最大せん断ひずみ分布

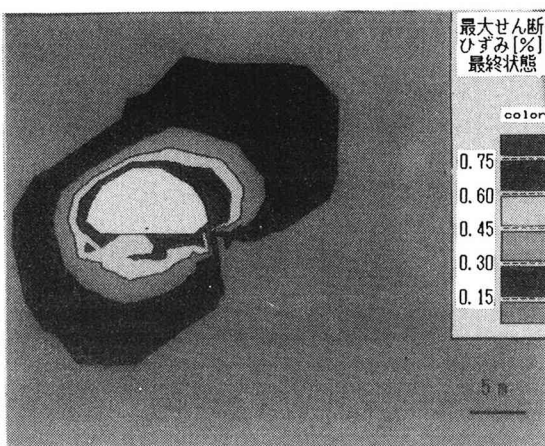


写真 1 (c) 最終状態における現状の最大せん断ひずみ分布

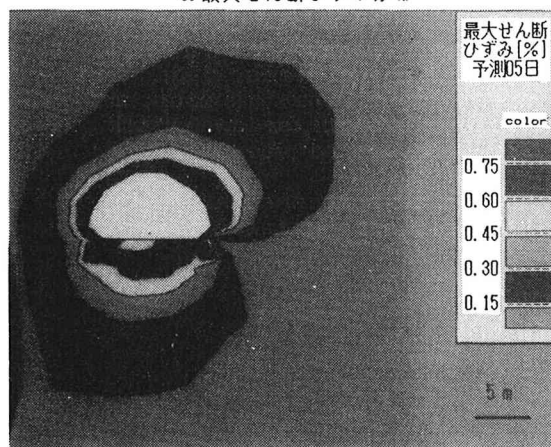


写真 2 (a) 計測開始 5 日目において予測し
た最大せん断ひずみ分布

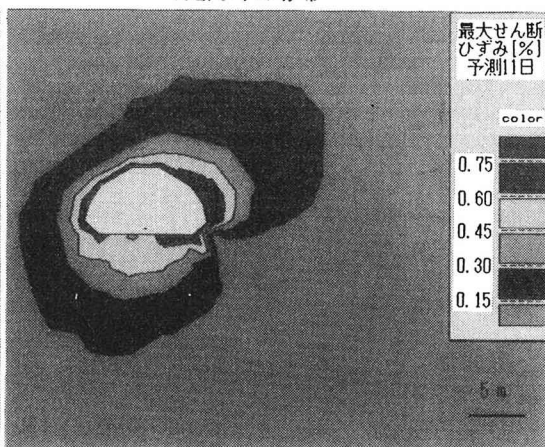


写真 2 (b) 計測開始 1 1 日目において予測
した最大せん断ひずみ分布

しか生じていないのにも係わらず、最終状態では約0.75%のひずみが生じると予測している。しかし、1 1 日目には、最終状態で若干小さい0.65-0.75%のひずみを予測している。なお、5日目の予測と最終状態でのひずみ分布を比較すれば、比較的良好一致を示していることがわかる。

4. 結論

本研究では、任意の時間における2回以上の変位計測のデータから、DBAP/Mを用いて最終初期応力パラメータを予測し、その結果を用いて最終のひずみ分布を求める方法を提案した。そして、適用例によって、最終のひずみ分布が十分推定できることを示した。

参考文献

- 1) 進士 正人、桜井 春輔 「トンネル掘削時の現場計測結果に基づく最終変位の予測法」第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.301-305、1985。
- 2) 桜井 春輔、進士 正人 「マイクロコンピュータによる変位計測結果の評価法」、土木学会論文報告集、第358号、pp.37-46、1985。
- 3) 桜井 春輔 「トンネル工事における変位計測結果の評価法」、土木学会論文報告集、第317号、pp.93-100、1982。

- (7) A method of forecasting ultimate strain distributions around a tunnel from field measurements carried out in an early stage of excavation

by M. Shinji^{*}
and S. Sakurai^{**}

Summary

At the construction of tunnels by NATM, it must be emphasized that the feedback of field measurement data to the design and execution of the structures is of primarily importance. Especially, the need of forecasting ultimate status of tunnel must be stressed.

This paper deals with a method of forecasting ultimate strain distributions around underground openings from field measurements carried out in an early stage of excavation. The method consists of three phases. The first is a back analysis of measured displacements in which the value called "Normalized Initial Stress" is obtained. The second phase is to forecast the ultimate value of the normalized initial stress the value of the present time by using a proposed technique. The last phase is to show the ultimate maximum strain distribution around openings by using computer graphics. This strain distribution is compared with the critical strain.

A case study shows that the proposed method has a good accuracy for forecasting the ultimate strain distribution.

* OYO Corporation

** Department of Civil engineering Kobe University