

(15) トンネルA計測結果を用いた地山初期応力の推定

近畿大学 理工学部 正会員 久武 勝保
株式会社 地崎工業 ○ 須藤 敦史
株式会社 地崎工業 宮里 一

Estimation of Virgin stresses of the Ground by tunnel convergence data
by

Masayasu HISATAKE

(Kinki University, Department of Civil Engineering)

Atsushi SUTO and Hajime MIYASATO

(Chizaki Kogyo Co.,Ltd. Technical Reseach & Development Div.)

ABSTRACT

In order to evaluate virgin stresses of the ground around a tunnel, a new back analysis method is proposed, in which values of principal stresses and their directions in tunnel cross section are estimated by applying tunnel convergence data measured to results obtained by three dimensional finite element (FE) analysis.

Three times of sequence FE analysis are only necessary, so the method is very economical comparing to the other back analysis methods of three dimensions.

Validity and applicability of the method is confirmed through parametric study.

1. 緒 論

トンネルの設計、施工において地山の初期応力や力学特性を推定することは、非常に重要である。しかし従来のサンプリング手法により求められる力学特性は、地山の局所的な値を代表し、節理等を考慮した、地山のマクロ的な特性と大きく異なることが知られている。従って、サンプリングによる結果から地山の応力や力学特性を推定することは容易でない。

そこで近年、施工中の種々の計測結果を直接逆解析して施工管理を行ったり、あるいは逆解析から地山の平均的な力学特性などを推定し、それを用いて通常の解析（以後、順解析）を行い、実際の挙動と解析結果との比較を通して、以後の設計、施工を合理的に行う、いわゆる逆解析の研究が行われ始めた。^{1)~3)}

しかし、従来の逆解析法においては、最適化手法を用いる直接定式化法の場合には、計算時間、費用が大きく、特に三次元解析においては、これが大きな障害となる。一方、逆定式化法の場合においても計測数が多くないと駄目であり、また計測誤差が解析結果に影響しやすいという欠点がある。ところでA計測における測線のひずみ比とトンネル横断面内地山の二主応力及びそれらの方向の関係は、地山と覆工の弾性係数の比の影響を余り受けないことが知られている。⁴⁾

そこで、本研究では、三次元有限要素法による順解析と通常トンネル内で行われるA計測結果とを組み合わせた新しい逆解析法を提案し、トンネル横断面内地山の二主応力及び、それらの方向を容易に推定する手法を示し、その妥当性を種々検討する。

2. 新しい逆解析手法

2.1 A計測値と地山応力との関係

トンネル横断面内の地山の二主応力 (σ_1 と σ_3) と σ_1 の方向 (θ) (図-3 参照) を、最適化手法によって求めようとすると、未知量が多いために計算時間、費用が大となる問題がある。そのために、通常トンネル現場で行われる A 計測の結果を用いて、 σ_1 、 σ_3 、 θ を求める手法が、以下の様に開発された。⁴⁾

地山の鉛直方向の初期応力 σ_v を土被り圧 γh (γ 、 h はそれぞれ地山単位体積重量、トンネル深さ) と仮定し、図-2 に示す様に切羽 1 間掘削をシュミレートした三次元の有限要素解析から $K = \sigma_3 / \sigma_1$ 、 θ 及び、ひずみ比 $(\Delta b/b) / (\Delta a/a)$ 、 $(\Delta b/b) / (\Delta c/c)$ の関係を作成したのが図-1 である。ただし、測線断面は図-2 の A-A 断面である。また、 a 、 b 、 c は図-3 に示す測線であり、 Δa 、 Δb 、 Δc はそれらの変化量 (測線減少を正とする) である。図-1 において、現場計測ひずみ比 $(\Delta b/b) / (\Delta a/a)$ 及び $(\Delta b/b) / (\Delta c/c)$ を縦座標に適用し、これから両ひずみ比を同時に満足する K 、 θ を捜せば、これらの値が直ちに逆解析されたことになる。この手法は図さえ作成しておれば、現場で直ちに逆解析ができ、従来の手法に比べ非常に簡便な手法といえる。しかし、図を作成するに当たって順解析を繰り返し行わなければならない、したがって、計算時間、費用を減少さす余地がある。そこで、以下では上記手法をさらに発展させた新しい手法を示すことにする。

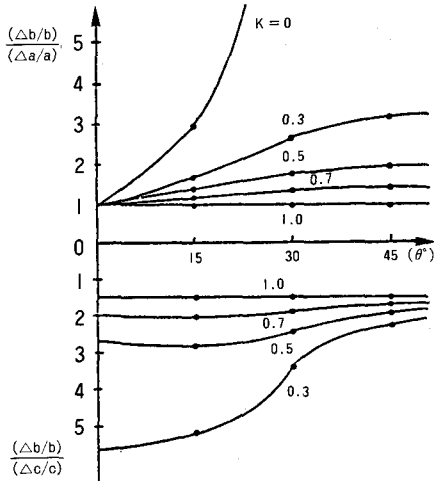


図-1 主応力比 K 、最大主応力の方向 θ 及びひずみ比の関係

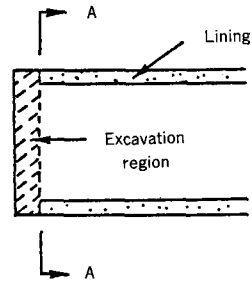


図-2 計測断面 A-A

2.2 本手法の定式化

地山の水平応力 σ_h 、せん断応力 σ_{vh} は、未知量を K_h 、 K_{vh} として以下のように表すことができる。

$$\sigma_h = K_h \cdot \sigma_v$$

$$\sigma_{vh} = K_{vh} \cdot \sigma_v$$

(1)

ここに、 $\sigma_v = \gamma h$

トンネル内では、通常 A 計測が行われるので、図-3 の A 計測値から直接 K_h 、 K_{vh} を求めることができれば式(1)より σ_h 、 σ_{vh} を求めることができ、好都合である。そこで、以下では K_h 、 K_{vh} を求める手法について述べる。

さて、地山の初期応力が図-4 のように作用していると仮定し、切羽掘削に起因する実測 A 計測結果を

$$A^* = \Delta a^* / a^*$$

$$B^* = \Delta b^* / b^*$$

(2)

$$C^* = \Delta c^* / c^*$$

とする。

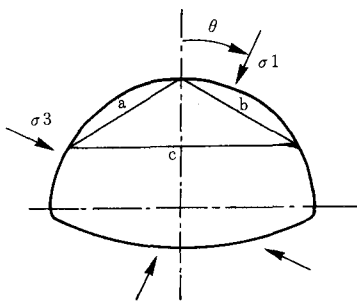


図-3 測線a,b,c及び最大(σ_1)、最小(σ_3)主応力とその方向(θ)

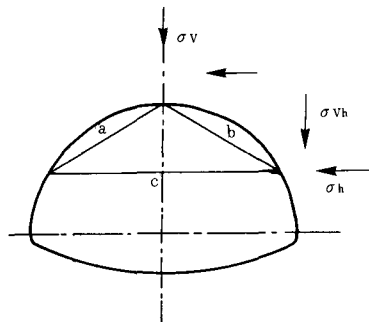


図-4 初期応力状態

これらは、 σ_v 、 σ_h 、 σ_{vh} がそれぞれ単独に、 γ_h だけ作用している地山に対するA計測解析結果を重ね合わせることで、次式で近似的に表現することができる。

$$\begin{aligned} \frac{B^*}{A^*} &= \frac{bv + K_h \cdot bh + K_{vh} \cdot bv_h}{av + K_h \cdot ah + K_{vh} \cdot av_h} \\ \frac{B^*}{C^*} &= \frac{bv + K_h \cdot bh + K_{vh} \cdot bv_h}{cv + K_h \cdot ch + K_{vh} \cdot cv_h} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $av = \Delta a / a$ 、 $bv = \Delta b / b$ 、 $cv = \Delta c / c$ であり、これらは σ_v のみが γ_h だけ作用している地山において、切羽1間掘削から解析される無次元測線変化量である。また(ah 、 bh 、 ch)及び、(av_h 、 bv_h 、 cv_h)についても同様、 σ_h 及び σ_{vh} がそれぞれ γ_h だけ作用している地山から求められる。

式(3)を K_h 、 K_{vh} について解き、解析された K_h 、 K_{vh} を式(1)に適用することにより、地山の初期応力を推定することができるが、式(3)は $\Delta a / a = \Delta b / b$ の場合において、 K_{vh} は特異性を示すことから、この場合には上記と同様にして、次式が導かれる。

$$K_h = \frac{bv - (B^* / C^*) \cdot cv}{(B^* / C^*) / cv_h - bh} \quad (4)$$

以上より求められた初期応力の値から地山の σ_1 、 σ_3 及び θ は次式により容易に求められる。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \left\{ \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{((\sigma_v - \sigma_h)^2 + 4\sigma_{vh}^2)} \right\} \\ \sigma_3 &= \left\{ \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{((\sigma_v - \sigma_h)^2 + 4\sigma_{vh}^2)} \right\} \\ \theta &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2\sigma_{vh}}{\sigma_v - \sigma_h} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

3. 提案法の妥当性の検証

本提案法の妥当性を検討するために地山を弾性体と仮定し、トンネル切羽の1間掘削に起因するA計測ひずみから、地山の σ_1 、 σ_3 、 θ を逆解析する数値シミュレーションを以下の条件の下で行う。

表-1 解析条件

地山の弾性係数	$E_r = 50,000 \text{tf/m}^2$	ロックボルトの直径	0.025 m
地山のポアソン比	$\nu = 0.3$	鋼製支保工	H-150
吹き付けコンクリートの弾性係数	$E_1 = 800,000 \text{tf/m}^2$	トンネル高さ	4.0 m
吹き付けコンクリートのポアソン比	$\nu_1 = 0.15$	トンネル幅	6.3 m
吹き付け厚	0.2 m	1間掘削長	1.0 m
ロックボルトの弾性係数	$E_b = 21,000,000 \text{tf/m}^2$	地山の初期鉛直応力	$\sigma_v = 100 \text{tf/m}^2$
ロックボルト長	4.0 m	地山の初期水平応力	$\sigma_h = 50 \text{tf/m}^2$
一断面当りのロックボルト本数	6本	地山の初期せん断応力	$\sigma_{vh} = 0$ 及び 50tf/m^2

まず、図-4のような初期応力状態下の地山において、表-1の解析条件のもとで切羽を1間掘削し、これによる各測線のA計測ひずみ比を順解析で求め、これを現場で実測されたひずみ(式(2)の A^* 、 B^* 、 C^*)とする。次に、地山の弾性係数 E の値を仮定し、 σ_v 、 σ_h 、 σ_{vh} が単独に、 γ_h だけ作用している地山での各測線のひずみ(a_v 、 b_v 、 c_v 、 a_h 、 b_h 、 c_h 、 a_{vh} 、 b_{vh} 、 c_{vh})をあらかじめ求めた後、それらの値を式(3)に適用して K_h 、 K_v を解析し、式(1)より地山の初期応力を推定する。さらに、式(5)により最大、最小主応力(σ_1 、 σ_3)及びその方向(θ)を求める。そして逆解析された(σ_1 、 σ_3 、 θ)と真のそれらとを比較、検討することとする。

さて、図-5は、 $\sigma_v=100\text{tf/m}^2$ 、 $\sigma_h=50\text{tf/m}^2$ 、 $\sigma_{vh}=0$ になる場合について、逆解析結果に及ぼす E 値の影響を見るために、仮定した E と真の E_r との比を変えて地山応力を推定したものである。この場合には、 E が真の値の10倍及び1/10倍でも相当精度良く地山応力及び θ の推定ができることがわかる。

次に図-6は、せん断応力が作用している場合について、同様の推定を行なった結果である。これより、応力の推定については、仮定 E 値の影響はあまり受けないが、 θ の推定については、仮定 E 値が、実際の E_r 値の1/10倍の場合よりも10倍の場合において、精度が高いことが理解できる。

種々のシュミレーション結果をまとめると、図-5、6に示すCase1の場合の逆解析結果は、初期応力状態の影響を受けやすいが、しかし、Case3での逆解析結果はどの場合においても高い精度が保たれた。また、Case2の結果は真値に一致した。このことから、本手法を現場に適用する場合、逆解析で用いる地山の弾性係数 E は、想定される実際の現場地山の弾性係数より大きめの値を用いることにより、 σ_1 、 σ_3 、 θ が工学上十分な精度で求められることがわかった。

以上より、本提案法は、あらかじめ3回の3次元順解析を行ってひずみを求めておけば、これと現場A計測結果から直ちに地山応力が推定でき、非常に経済的かつ、簡便な逆解析手法と言えよう。

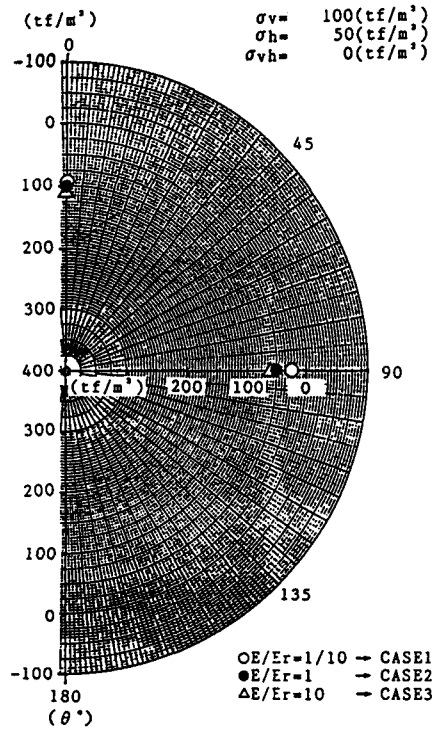


図-5 仮定した E 値と真の E_r 値との比による逆解析結果の精度

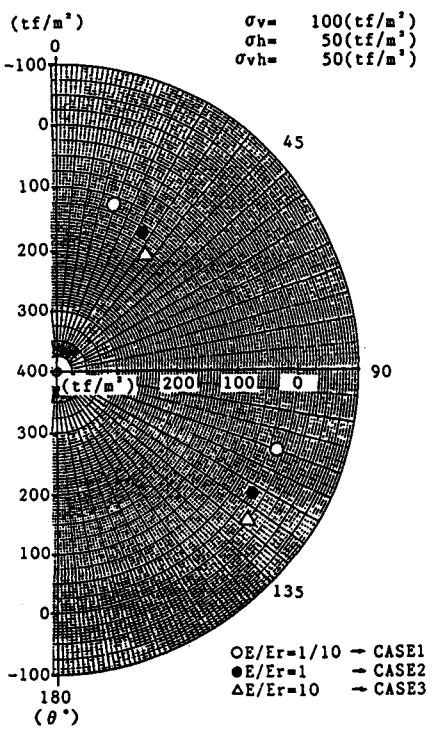


図-6 仮定した E 値と真の E_r 値との比による逆解析結果の精度

4. 結 論

本研究により、下記に示す成果が得られた。

- 1) 三次元順解析を3回行って求めたトンネルA計測ひずみと、現場A計測ひずみからトンネル横断面内の二主応力及びそれらの方向を逆解析する手法が提案された。本解析では、地山の弾性係数をあらかじめ仮定する必要があるが、現場の弾性係数よりも大きめの値を仮定することにより、工学上十分な精度で結果が得られることが示された。
- 2) 本手法によれば、実際のトンネル断面形状について、三次元解析によりA計測ひずみをあらかじめ求めておけば、現場のA計測結果から直ちに、地山の応力状態を求めることができ、トンネルの施工法の設定、及び施工管理に大いに役立つものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 久武 勝保：トンネルにおける三次元逆解析法の開発、土木学会論文集、第376号／Ⅲ-6、pp. 259-265, 1986
- 2) 久武 勝保：トンネルにおける三次元逆解析法と最適断面形状の決定、昭和62年度土木学会関西支部研修会テキスト、pp. 75-91, 1987
- 3) 久武、稲葉、平田：三次元逆解析に基づく最適なトンネル断面形状及び施工条件の決定、第7回岩の国内シンポジウム講演論文集、pp. 373-378, 1987
- 4) 久武、稲葉、平田：三次元逆解析法のトンネル現場への適用、第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 291-295, 1987