

7. NATM工法の合理的施工に関する研究 —トンネル施工にともなう計測工と逆解析手法による施工管理—

村上 譲二
土岐 晃生

要 旨

NATM工法は、山岳トンネルの施工法として急速に普及し、すでに標準工法として定着しつつあり、今後都市トンネルおよび大規模地下空洞への適用事例が多くなっていくものと思われる。このような推移の中にあって、より長期にわたる安全性が求められており、これまでのように施工経験に基づいて行われてきたトンネル設計を定量的に解析していく技術が要求されるようになってきた。

本報告は、これまで研究を進めてきた逆解析手法を実際のトンネル現場に適用し、その妥当性について検討した結果を述べたものである。

キーワード

トンネル／NATM／計測管理／逆解析

目 次

- | | |
|-----------------|---------------------|
| 1. はじめに | 5. 解析手法2の概要 |
| 2. 適用現場の概要 | 6. 解析手法2の数値シュミレーション |
| 3. 解析手法1の概要 | 7. あとがき |
| 4. 解析手法1の現場への適用 | |

7. STUDY ON HIGHLY EFFICIENT CONSTRUCTION WITH NATM

Joji Murakami
Teruo Toki

Abstract

NATM has been rapidly spread as a mountain tunnel construction method, and is now becoming increasingly popular as a standard method. The construction method seems to apply to a wider variety of construction works including city tunnels and large-scale underground spaces. This requires safety ensured over long periods of time, and techniques for quantitative analysis of tunnel design that has been so far conducted on the basis of construction experiences. We report on the results of our examinations on the applicability of our long-studied back analysis method to actual tunnel construction sites.

1. はじめに

トンネルは基本的に、地山そのものによって構成される構造物である。したがって、トンネルの設計、施工を行っていくためには、構造材料としての地山の工学的特性と作用荷重としての初期地山応力を知ることがきわめて重要な課題となっている。しかし、どのように詳細に事前調査を施したとしても、地山の特性を的確に把握することは難しい。このため、トンネル解析手法は近年非常に発展したにもかかわらず、現実のトンネル設計に対する解析結果の信頼性はきわめて低くなっている。すなわち、解析精度を上げて、結果は必ずしも向上するとは限らず、むしろ解析に用いる入力値を、地山の構造特性を評価した形で決定する必要性が指摘されている。

そこで、近年、施工中の現場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、現場計測結果から地山の力学定数、初期応力などを推定し、それを用いて順解析を行い、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研究が発達してきた。

本報告では、一次覆工内面変位から覆工の安定性を評価する逆解析法、および地山初期応力を三次元逆解析する手法を述べ、次いで本手法を用いて、数値シミュレーションを行い、また実際のトンネル現場に適用して、その妥当性を検討したのでその結果を述べる。

なお、本研究については一部、土木学会第45回年次学術講演会にて発表を行っている。

2. 適用現場の概要

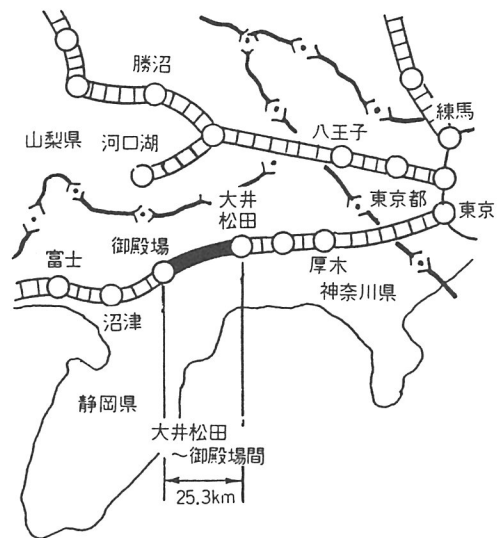
2.1 工事概要

工事名称	東名高速道路（改築）小山工事
工事箇所	静岡県駿東郡小山町小山
工事延長	土工延長 316m
規模	トンネル延長 472m
	トンネル断面積 131㎡

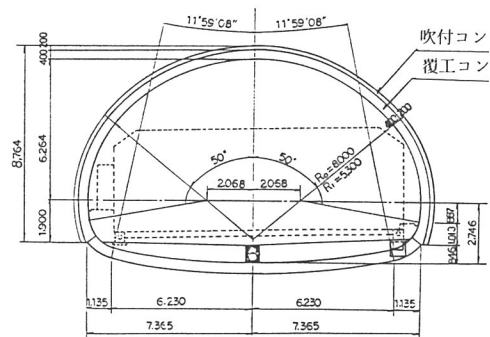
工 期 昭和63年6月～平成3年3月

これは東名高速自動車道の大井松田 I.C～御殿場 I.C の車線数を増大するための工事であり、現在施工中の桜平トンネルに本解析手法を適用した（図－1 参照）。このトンネルは、新生代新第三紀の足柄層群の軟岩地山に、NATM工法により仕上がり内空断面積約131㎡で施工されている三車線大断面トンネルで

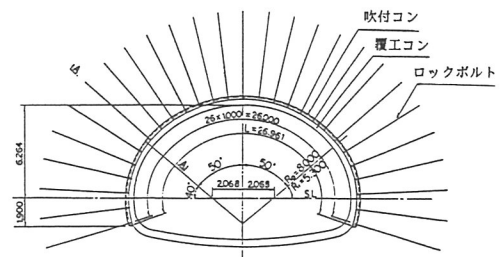
ある。このトンネルの標準断面、標準支保パターンをそれぞれ図－2、図－3に示す。



図－1 位置図



図－2 標準断面



図－3 標準支保工パターン

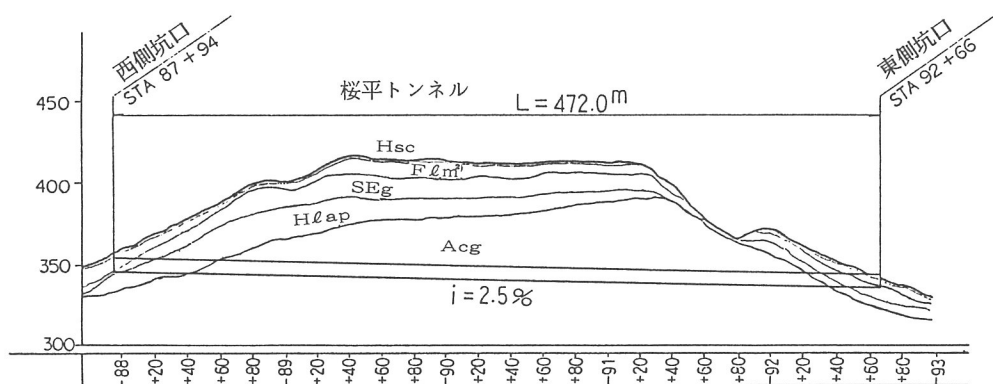


図-4 地質縦断図

2.2 トンネルの地質概要

桜平トンネルにおける地質は、基盤岩が新生代新第三紀の足柄層群であり、その上に不整合に被覆する第四紀系の火山噴出物、泥流堆積物、および火山堆積物からなっている。基盤岩である足柄層群は、地質的には礫岩に区分され固結度は低く、コアは棒状では採取されずほとんど砂礫状を呈する。

強風化部は弾性波速度0.6～1.5km/sec で礫や基質の一部が風化粘土化し、粘土質砂礫状を呈し、N値は7～39と小さい値を示している。

弱風化部は弾性波速度2.3～2.8km/sec でシルト、粘土はほとんど混入されておらずN値は70以上でほとんど測定不能であった。図-4にその地質縦断図、表-1に地質層序表を示す。

表-1 地質層序表

地質時代	地 層 名	層 相	記 号
第三紀	沖 積	宝永スコリア層	スコリア Hsc
		古富士ローム層	ローム Flm
	洪 積	正福寺巨礫層	砂 礫 SEg
		箱根火山礫層	凝 灰 岩 Hlap
新第三紀	足 柄 層 群	礫 岩	Acg

2.3 計測工

施工中の調査、計測の項目とその内容の例を表-2に示す。また標準計測工パターンを図-5に示す。

これらの項目は、計測A（日常の施工管理のために必ず実施すべき項目）と計測B（地山条件に応じ計測Aに追加して選定する項目）とに大きく二分される。

計測Aは、地山および支保構造が異常な挙動をしていないか、安定しつつあるかなどの判断資料を得るために、トンネル延長方向に一定の間隔で実施し、計測Bは、使用する支保部材や施工方法が妥当かどうかを判断し、以後のトンネルの設計・施工を合理的、経済的なものにするために実施するものである。

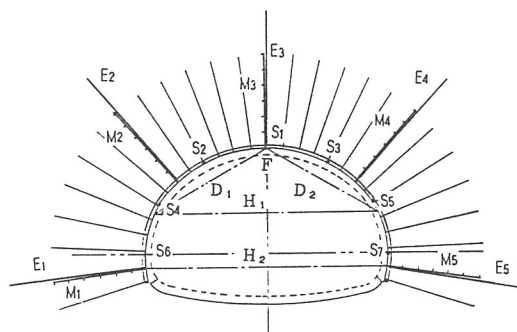
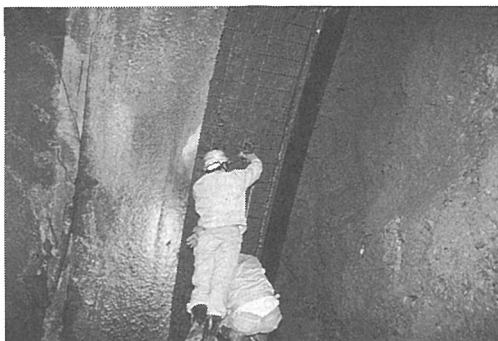


図-5 標準計測工パターン

表-2 計測測定項目

計 測	坑 内 観 察 調 査	
A	内空変位測定	水平コンバージェンス H ₁ H ₂ 対角線コンバージェンス D ₁ D ₂
	天 端 沈 下 測 定	F
B	覆 工 応 力 測 定	
	地 中 変 位 測 定	E ₁ ～ E ₅
B	ロックボルト軸力測定	M ₁ ～ M ₅
	支 保 工 応 力 測 定	S ₁ ～ S ₇



写真－１ 計測器設置状況

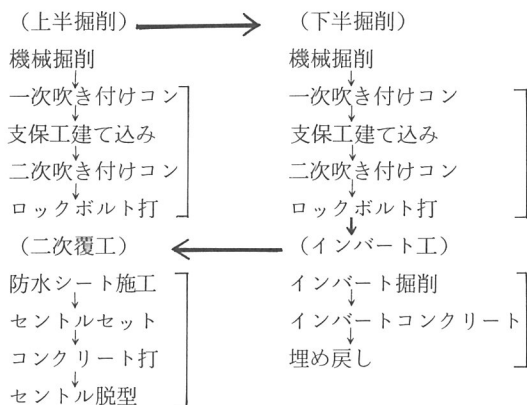


写真－３ H鋼支保工建て込み状況

2.4 トンネル作業フロー

本トンネル工事の標準作業フローを図－６に示す。

(写真２～５ 参照)



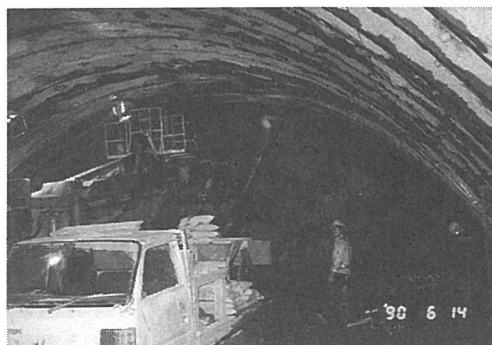
図－６ 標準作業フロー



写真－４ 吹き付けコンクリート
打設状況



写真－２ 機械掘削状況



写真－５ ロックボルト打ち込み状況

3. 解析手法1（覆工応力の推定）の概要

本手法は、通常求められるトンネルA計測変位から覆工の応力、ひずみ等の力学量を逆解析するものである。この手法は、覆工計測変位を生じさせる無数の外力組合せの中から、覆工に蓄えられるエネルギーが最小である外力組合せを見つけ出す方法である。

3.1 概説

覆工内面節点の測点変位数 N_u と覆工外面節点に作用する外力 F の成分数 N_f が $N_u \geq N_f$ という条件下では、 F および未知節点変位の解を一意的に求めることができる。しかし、この条件を満足させるのは現実的でなく、たとえこの条件を満たしていなくとも、工学的に十分な精度の近似解が得られる方法を定式化したものをここに述べることにする。

3.2 手法の定式化

切羽に近接した位置での覆工応力は、三次元的に分布するが、トンネル横断面内の覆工応力、地圧はその横断面内を平面歪状態と仮定した二次元逆解析により工学上十分な精度で求められることが示されている。

そこで以下では、二次元平面歪状態下の弾性覆工を対象にする。トンネルA計測では N_u は、 N_f よりもはるかに少ないが、このような場合でも、拘束条件を与えることにより唯一解を得ることができる。

いま、二次元FEMにおいて、 u を変位ベクトルとすれば、これは次のように既知計測変位ベクトル u_A^* と未知変位ベクトル u_B に分けることができる。

$$u = (u_A^* \ u_B)^T \quad (T: \text{転置}) \quad (1)$$

$$\text{次に節点力 } F \text{ と } u \text{ の間には } F = K u \quad (2)$$

という関係がある。但し K は剛性マトリックスで次のように表す。

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{AA} & K_{BA} \\ K_{AB} & K_{BB} \end{bmatrix} \quad (3)$$

外力により覆工に蓄えられるエネルギーの総和 E は

$$E = \frac{1}{2} F^T u = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} u_A^* \\ u_B \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} K_{AA} & K_{BA} \\ K_{AB} & K_{BB} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_A^* \\ u_B \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで E を最小となす変位ベクトル u_B は、次式を満足しなければならない。

$$\partial E / \partial u_B = 0 \quad (5)$$

式(4)、式(5)より u_B について解くと次式を得る。

$$u_B = -K_{BB}^{-1} \cdot K_{AB} \cdot u_A^* \quad (6)$$

式(6)より、 u_B の成分数に関係なく、 u_A^* のみから u_B の近似値を求めることができる。したがって、それを、変位・ひずみ関係式、応力・ひずみ関係式に適

要することにより、覆工の力学量が決定される。

4. 解析手法1の現場への適用

本手法を桜平トンネルに適用し、トンネルA計測値（内空変位測定、沈下測定）から吹付けコンクリート応力、支保工応力を推定し、実測値との比較検討を行った。この手法は、各測点の相対変位を入力することにより、応力、変位等の逆解析を行うものであり、そのために通常のA計測値に、2点の沈下測定を加えることにした。（図-8参照）

本トンネルの施工条件を表-3に示す。

表-3 施工条件

トンネル高さ	8.564 m
トンネル幅	15.536 m
鋼製支保工(H-200)の弾性係数	21000000 tf/m ²
支保工間隔	1.0 m
吹き付け厚	20 cm
ロックボルトの弾性係数	21000000 tf/m ²
1断面当りのロックボルト本数	27本
ロックボルト長	6.0 m
1間掘削長	1.0 m

吹付けコンクリートの弾性係数 E は、経過時間と共に増大するはずであり、本解析では、コンクリートの経時圧縮強度の実測値から下式を用いて、 E 値を求めた。その結果を表-4に示す。

$$Ec(t) = 1.53 \times 10^4 \times \sqrt{\sigma_c(t)}$$

表-4 吹付けコンクリートの弾性係数

1日	E_1	=	1,601,800	tf/m ²
3日	E_3	=	1,619,200	tf/m ²
5日	E_5	=	1,861,300	tf/m ²
8日	E_8	=	2,029,800	tf/m ²
16日	E_{16}	=	2,243,400	tf/m ²

図-7は、本解析で用いた二次元有限要素分割図である。

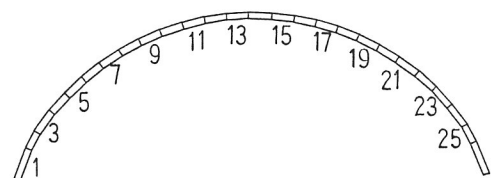


図-7 有限要素分割図

4.1 結果

図-9、図-10にそれぞれ内空変位測定結果、沈下測定結果を示す。次にこの測定結果から、d点を基準としたe、f点の相対変位を求めた。その結果を表-5に示す。

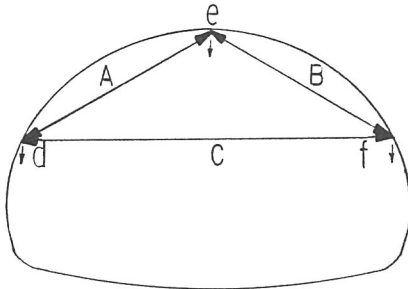


図-8 トンネルA計測

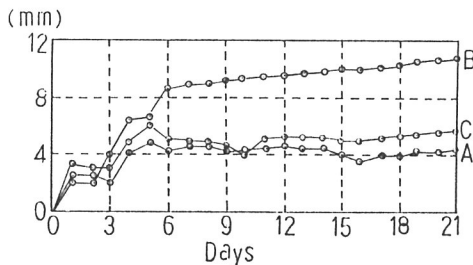


図-9 内空変位測定結果

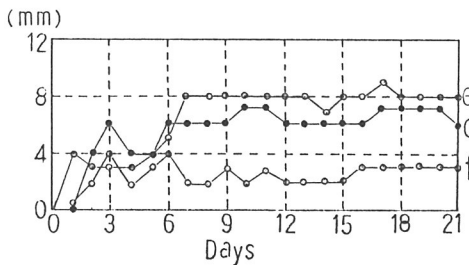


図-10 沈下測定結果

表-5 点 e,f での相対変位 (v:鉛直 h:水平)

	1 day	3 days	5 days	8 days	16days
Ue.v	-4.0	3.0	0	-2.0	-2.0
Ue.h	-0.4	-1.0	-4.2	-3.9	-3.1
Uf.v	0	2.0	1.0	4.0	3.0
Uf.h	-3.3	-3.0	-6.0	-4.8	-5.1

(Unit:mm)

以上の解析データから、逆解析して求めた吹付けコンクリート応力、支保工応力とB計測にて求められた

実測値とを比較したものを図-11、図-12に示す。

なお、支保工応力(軸力)Nは、各要素重心点のひずみ ϵ_x を逆解析から求め次式に代入して算出した。

$$N = \epsilon_x \times A \times E \quad (A: \text{鋼製支保工の断面積})$$

また、吹付けコンクリートの接線方向応力 σ_θ については吹付けコンクリートの弾性係数が経時的に変化するるので、経過日数の弾性係数と相対変位の増分 ΔU から応力増分 $\Delta \sigma_\theta$ を求め

式 $\sigma_{\theta t} = \sigma_{\theta 1} + \Delta \sigma_{\theta 2} + \dots + \Delta \sigma_{\theta t}$ により求めた。

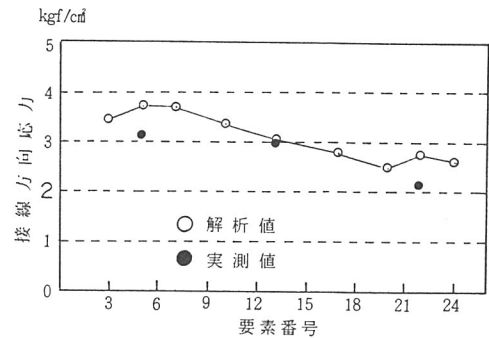


図-11 吹付けコンクリート応力の実測値と解析値との比較

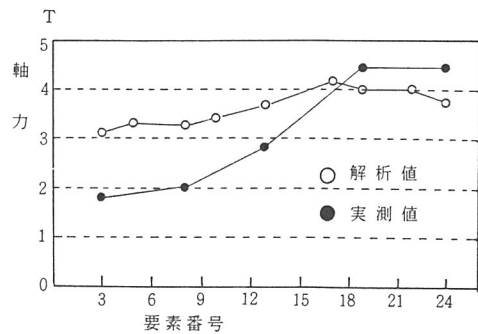


図-12 支保工応力の実測値と解析値との比較

4.2 結論

上図から明らかなように、支保工応力、吹付けコンクリート応力共、解析値は実測値とほぼ一致しており工学上十分な精度で得られることが分かった。

このことより、地山の初期応力や力学定数を用いなくても、覆工内面変位を測定して覆工応力を逆解析する手法を用いれば十分妥当な値を得られることが確認できた。

5. 解析手法2（地山初期応力の推定）の概要

本手法はトンネル掘削位置付近の幾何学条件を考慮し、三次元弾性解析を行うことにより、地山の初期応力を求める手法である。地山の鉛直応力 σ_v が土被り圧 γh （ γ ：地山の単位体積重量 h ：トンネル深さ）に一致するとすれば、

$$\sigma_h = K_h \cdot \sigma_v \quad \sigma_{vh} = K_{vh} \cdot \sigma_v \quad (1)$$

と表すことができる。ここに σ_h 、 σ_{vh} はそれぞれ水平応力、せん断応力であり、 K_h 、 K_{vh} は共に未知数である。トンネル内では、通常A計測が行われるので、図-13のA計測値（測線 a,b,c）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。

地山の初期応力を図-14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計測ひずみを $A = \Delta a/a$ 、 $B = \Delta b/b$ 、 $C = \Delta c/c$ とする。これらの実測値は、 σ_v 、 σ_h 、 σ_{vh} がそれぞれ単独に、単位初期応力だけ作用している地山において、切羽掘削によって生じるA計測解析ひずみを重ね合わせることにより、以下のように近似的に表現できる。

$$\begin{aligned} A &= a_v \cdot \sigma_v + a_h \cdot K_h \cdot \sigma_v + a_{vh} \cdot K_{vh} \cdot \sigma_v \\ B &= b_v \cdot \sigma_v + b_h \cdot K_h \cdot \sigma_v + b_{vh} \cdot K_{vh} \cdot \sigma_v \\ C &= c_v \cdot \sigma_v + c_h \cdot K_h \cdot \sigma_v + c_{vh} \cdot K_{vh} \cdot \sigma_v \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{B}{A} &= \frac{b_v + K_h \cdot b_h + K_{vh} \cdot b_{vh}}{a_v + K_h \cdot a_h + K_{vh} \cdot a_{vh}} \\ \frac{B}{C} &= \frac{b_v + K_h \cdot b_h + K_{vh} \cdot b_{vh}}{c_v + K_h \cdot c_h + K_{vh} \cdot c_{vh}} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで a_v 、 b_v 、 c_v 、 a_h 、 b_h 、 c_h 、 a_{vh} 、 b_{vh} 、 c_{vh} はそれぞれ σ_v 、 σ_h 、 σ_{vh} が単独に、単位初期応力だけ作用している地山において、切羽掘削によって生じるA計測解析ひずみである。

式(2)を K_h 、 K_{vh} について解き、式(1)に適用すると、地山の初期応力が推定できる。

以上により求められた初期応力の値から、地山の最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_3 およびその方向 θ の値は式(3)により容易に求められる。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_v - \sigma_h)^2 + 4 \sigma_{vh}^2} \\ \sigma_3 &= \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_v - \sigma_h)^2 + 4 \sigma_{vh}^2} \\ \theta &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2 \sigma_{vh}}{\sigma_v - \sigma_h} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

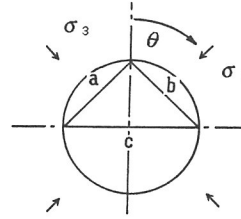


図-13 測線 a,b,cおよび最大(σ_1)最小主応力(σ_3)とその方向

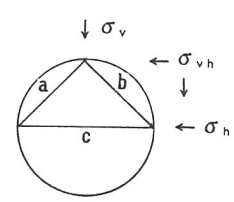


図-14 初期応力状態

6. 解析手法2の数値シュミレーション

解析手法の妥当性を検証するために、地山を弾性体と仮定し、数値シュミレーションを行った。

まず、表-6の条件の下で、地山の弾性係数を大きめ（ $E = 500000.0 \text{ tf/m}^2$ ）に仮定して順解析を行い σ_v 、 σ_h 、 σ_{vh} がそれぞれ単独に単位初期応力だけ作用している地山の、A計測ひずみを求める。（これを影響係数とする。）次に同じく表-6の解析条件で表-7に示す初期応力が作用している地山のA計測ひずみを求め、これを現場で計測された実測A計測ひずみ（A、B、C）とする。この値と影響係数から地山の最大、最小主応力（ σ_1 、 σ_3 ）およびその方向 θ を求める。そしてこの逆解析された（ σ_1 、 σ_3 、 θ ）の値と真の値を比較検討する。また切羽掘削と覆工の建設という施工手順を考慮した場合と考慮しない場合についても精度の検討を行った。なお順解析は図-15に示す要素分割にて行った。

表-6 解析条件

地山の弾性係数	$E_r = 50000.0$	tf/m ²
地山のポアソン比	$\nu_r = 0.3$	
覆工の弾性係数	$E_1 = 800000.0$	tf/m ²
覆工のポアソン比	$\nu_1 = 0.15$	
吹き付け厚	0.2 m	
トンネル高さ	5.6 m	
トンネル幅	5.6 m	
一間掘削長	1.5 m	

表-7 地山初期応力

地山の初期鉛直応力	$\sigma_v = 100$	tf/m ²
地山の初期水平応力	$\sigma_h = 150$	tf/m ²
地山の初期せん断応力	$\sigma_{vh} = 100$	tf/m ²

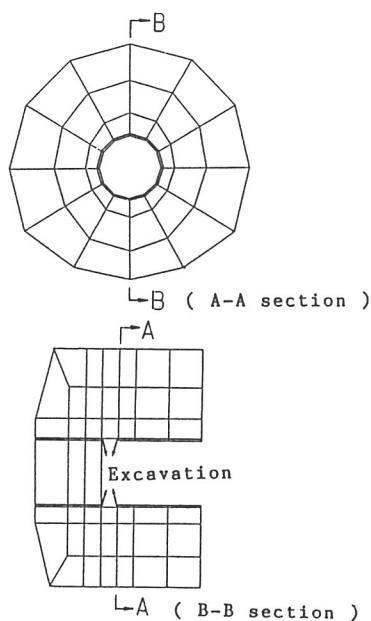


図-15 要素分割図

6.1 結果および考察

図-16に σ_1 、 σ_3 、 θ の真の値と、1回掘削の影響係数と1回掘削の実測A計測ひずみとで逆解析したもの(1-1)、1回掘削の影響係数と3回掘削の実測A計測ひずみとで逆解析したもの(1-3)、3回掘削の影響係数と3回掘削の実測A計測ひずみとで逆解析したもの(3-3)を表す。

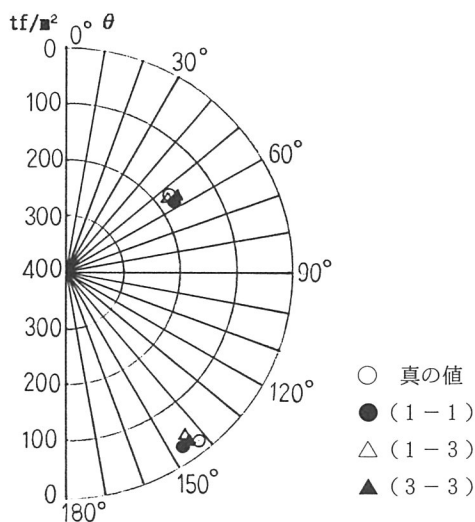


図-16 真値と逆解析結果の比較

順解析を行う際に仮定した地山の弾性係数は実際の弾性係数の10倍としたが、図-16の結果からあきらかのように、逆解析から求められた最大、最小主応力、およびその方向は真の値と比較して、精度良く求められている。また逆解析を行う際に組み合わせる影響係数については、本来、切羽進行を考慮して求めるべきであるが、この手順を考慮せずに求めた影響係数を用いた場合でも結果は、ほぼ同じであり精度良く求められていた。したがって影響係数は切羽進行を考慮していない値を用いても工学的に十分な精度が得られることがわかった。

6.2 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計測解析ひずみと、現場A計測実測ひずみからトンネル横断面内の二主応力およびそれらの方向を逆解析する手法が開発され、工学的に十分な精度で結果が得られることが示された。
- 2) 影響係数を求めるに当たっては、地山の弾性係数をあらかじめ仮定しておくことが必要であるが、実際の弾性係数よりも大きい値を仮定しておけば、良い結果が得られることが示された。
- 3) 本逆解析において、施工手順を考慮せずに求めた影響係数を用いても十分満足な解が得られることが検証された。

以上により、実際のトンネル施工において、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、実測A計温ひずみから、現場で直ちに、地山の応力状態が求められ、施工管理を行っていく上で大いに役立つものと思われる。

7. あとがき

NATM工法の逆解析について（解析手法1）では覆工応力の推定、（解析手法2）では地山初期応力の推定について報告した。

覆工応力の推定についての妥当性は、実際のトンネル現場に適用してみて、予想以上の精度で解析できることが検証された。この研究の結果、通常現場で行われている計測結果から、覆工のすべてのひずみ、応力を精度良く算定できることが立証でき、これからのトンネルの施工管理に非常に役立つものと思われる。

地山初期応力の推定については、数値シュミレーショ

ンによって行い、その手法の妥当性が証明された。この結果、不確定要素であった初期応力を施工中に簡単に、精度良く推定することができ、覆工厚、1間掘削長、上半断面形状などの施工条件を合理的に決定することができるようになった。

今後、この逆解析手法が、現場計測と一体となり機能する施工管理システムを確立する研究を進めていきたい。

なお、この研究を行うにあたり御指導いただいた近畿大学工学部の久武勝保助教と、現場計測にて多大の御協力をいただいた東名小山工事の現場の方々に、心より感謝の意を表します。

<参 考 文 献>

- 1) Kovari, K., Amstad, Ch. and Fritz, P. : Integrated Measuring Technique for Rock Pressure Determination, Proc. Int. Sympo. on Field Measurements in Rock Mech., pp.289~316, 1967
- 2) Hisatake, M. and Ito, T. : Back Analysis for Tunnels by Optimization Method, Proc, 5th int. Conf. on Numerical Methods in Geomech., Vol. 2, pp. 1301~1307, 1985
- 3) 久武勝保・伊藤富雄・上久保裕介・村上敏夫：トンネルA計測変位による覆工応力の推定、第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 pp. 16~20
- 4) 久武勝保・土岐晃生・村上譲二：トンネルA計測による地山初期応力の推定、土木学会第45回年次学術講演会、第3部門、1990