

トンネルにおける変位計測結果の逆解析に関する 問題点とその考察

STUDY OF SOME PROBLEMS ON THE BACK ANALYSIS OF MEASURED DISPLACEMENTS IN TUNNELLING

谷河正也*・北條 明**・桜井春輔***

By Masaya TANIGAWA, Akira HOJO and Shunsuke SAKURAI

This paper deals with some problems encountered in the back analysis of measured displacements carried out during the excavation of tunnels in order to monitor their stability.

The paper consists of two parts. The first part deals with the problems that arise when the displacements have already taken place before the measuring devices are installed and the first reading is taken. Hence, the results of the back analyses become questionable. To overcome this dilemma, three-dimensional back analysis is recommended.

The second part is for a discussion on the accuracy of the back analyses, that generally depends on the way in which the input data is introduced in the analyses. In this paper, the "dual back analysis" method is proposed to increase this accuracy.

Keywords: back analysis, measured displacements, tunnels, three-dimensional effects, plastic region

1. まえがき

トンネルなどの地下空洞の施工においては、施工中の地山の挙動を観察・計測し、そこから得られる情報から迅速に設計の見直しを行い、経済的かつ安全に空洞を建設する情報化施工が注目されている。

トンネルにおける情報化施工で用いられる地山の安定性評価手法としては、地山の変位や応力などの計測値の分布や経時変化の傾向から直接評価する方法^{1),2)}、計測値の逆解析から地山の初期応力や力学定数などを求め、それらを用いて順解析し地山の応力分布から評価する方法^{3)~5)}、あるいは地山のひずみ分布から評価する方法^{6),7)}などが用いられている。また、掘削面に現われる不連続面の観察データからキープブロックを検出しその安定性を評価する方法⁸⁾や、地下発電所のような大空洞に対しては Acoustic Emission を用いる方法^{9),10)}、かぶりの浅いトンネルに対してはトンネル中心線上の地表沈下曲線をはりのたわみ曲線とみなしてせん断破壊を監視する指数を用いる方法¹¹⁾も提案されている。

一方、施工中に実施する現場計測は、一般に変位計測が主であることから、変位計測結果に基づきトンネルの安定性を評価する一手法として、著者の一人は、直接ひずみ評価法を提案した⁹⁾。この方法は、変位計測結果から地山のひずみ分布を求め、許容ひずみと比較して、空洞の安定性を評価するものである。

計測変位から地山のひずみ分布を求める方法については、計測点が多分に多い場合には、変位-ひずみ関係から直接求めることができるが、計測点が限られている場合には、まず変位計測結果をインプットデータとして逆解析を行い、初期応力パラメーターを求め、これを用いてひずみ分布を推定する方法が有効である¹²⁾。

さらに、弾塑性地山に対しては、逆解析により得られた地山の最大せん断ひずみ分布から、弾塑性解析を行うことなく、空洞周辺に生じる塑性領域を推定する方法が提案されている¹³⁾。この方法によれば施工中に当初予測した塑性領域の妥当性を検討し、必要に応じて支保ならびに掘削方法の見直しを容易に行うことができる。

また、異方性パラメーターを導入した応力-ひずみ関係により、空洞周辺岩盤の挙動を連続体力学の枠組みの中でとらえる方法が、桜井らにより提案されている¹⁴⁾。この方法を用いて、岩盤中の不連続面におけるすべり、剝離、あるいは塑性領域内の岩盤の挙動に対する解析を

* 正会員 (株)新日本技術コンサルタント
(〒542 大阪市中央区鳥の内1-20-19)

** 正会員 工修 (株)新日本技術コンサルタント(同上)

*** 正会員 工博, Ph.D. 神戸大学教授 工学部土木工学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

行い、計測変位と解析変位がよく一致することが明らかとなっている。

このように、岩盤の挙動を解明するために、逆解析に関連した種々の手法が提案されているが、実際に現場において、得られた変位計測結果を用いて逆解析を行う場合には、さらに次のような問題に遭遇する。

- ① 変位計をトンネル内から設置する場合、設置するまでに計測断面で生じた変位（以下、先行変位という）の取扱い
 - ② 得られた計測変位の入力方法
- ①については、逆解析に先行変位をどのように考慮するかという問題である。

また、②については、地中変位計、内空変位計等によって得られる計測変位が相対変位であるため、逆解析においては相対変位をそのまま入力する方法¹²⁾が提案されている。しかし、多段式地中変位計による計測の場合には、計測変位の入力方法によって解析結果に差異が生じることがある。

本論文は、トンネル掘削時の変位計測結果を用いた逆解析について、上で述べた適用時の問題点を明らかにするとともに、その解決法について考察したものである。

2. 先行変位が計測できない場合の問題点とその考察

(1) 現状における先行変位の取扱い

トンネル掘削時における変位計の設置は、種々の環境にもよるが、一般に切羽近傍においてトンネル内から行われる。特別な理由がない限り、計器はトンネル横断面内に二次元的に配置される。この場合、計器を設置してから掘削を再開し、切羽進行に伴う地山のトンネル横断面内の変位増分を計測することになる。

このような計測から得られる変位を用いて二次元平面ひずみ問題として逆解析を行う場合、変位計を設置するまでの掘削によって生じた先行変位量を考慮する方法として、計測変位に一定の倍率を乗じることが多い。

逆解析を二次元平面ひずみ問題として実施する場合の主な仮定は、次の2つである。

- ① トンネルは十分長く、断面形状はトンネル軸方向に変化しない。
- ② 地山の初期応力の主軸の1つがトンネル軸方向と一致している。

実際のトンネルにおいては、②の条件を満足する場合の方がまれであり、トンネル軸方向と地山の初期応力の主軸は、一般に一致していないと考えておかなければならない。

一方、地山の初期応力の主軸の1つがトンネル軸と一致していない一般的な三次元初期応力下の平面ひずみ弾

性解析結果¹⁵⁾によれば、トンネル軸方向にかかわる初期応力成分は、トンネル掘削によって生じたトンネル横断面内の全変位量には影響しないことがわかっている。

しかし、計器をトンネル内から設置し先行変位が計測できない場合に、トンネル軸方向にかかわる初期応力成分がトンネル横断面内の変位にどのような影響を及ぼすかということについては明らかではない。

以下に、トンネル軸方向にかかわる初期応力成分がトンネル横断面内の変位に及ぼす影響を調べるために行った解析結果について述べる。

(2) 三次元初期応力下におけるトンネル横断面内の掘削変位

a) 三次元弾性掘削解析

トンネル掘削による切羽の進行に従って、三次元初期応力状態の各応力成分が、トンネル横断面内の変位にどのように寄与しているかを調べることにより、先行変位が計測できない状況での二次元逆解析について考察を行う。

ここでは馬蹄形断面のトンネルを例にとり、三次元境界要素法による掘削問題として弾性解析を実施する。

解析に用いる初期応力状態は、1つの応力成分のみ0以外の値をもつ状態とする。ここでは、初期応力パラメーター（初期応力と弾性係数の比）を考え、たとえば、 $\sigma_{x0}/E = -0.01$ で他の成分は0というような状態を設定する。したがって、解析は6ケースとなる。また、ポアソン比は0.3とする。

要素分割は図-1に示すとおりである。

解析の結果得られた、トンネル壁面位置(①～⑤)における放線方向の変位を図-2に示す。

b) 解析結果に対する考察

図-2から明らかなように、トンネル軸方向に関係するせん断応力成分 τ_{y20} と τ_{xz0} による変位の発生傾向は、他の応力成分による変位の発生傾向とは全く異なっている。

トンネル横断面内の応力成分 σ_{x0} 、 σ_{y0} 、 τ_{xz0} の影響は、切羽が計測断面を通過する直前から急激に増加していき、計測断面の2～3D後方まで切羽が進むと変位量はほぼ一定値になる。

これに対し、 τ_{y20} と τ_{xz0} については切羽が計測断面に到達したとき変位量が最も大きくなり、切羽がさらに進

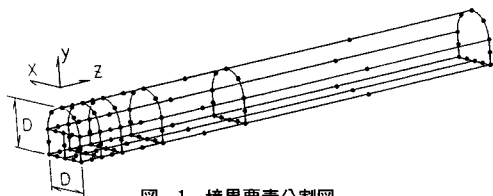


図-1 境界要素分割図

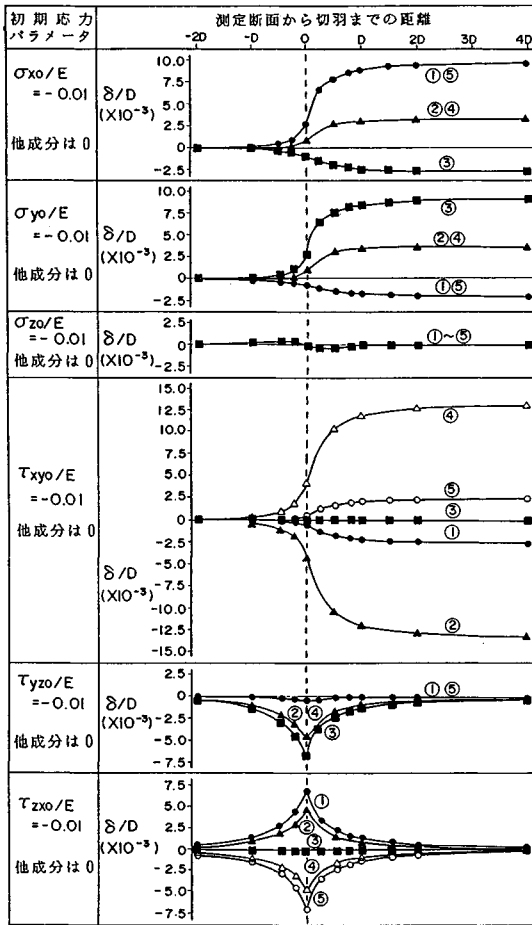


図-2 トンネル横断面内変位に対する各初期応力成分の影響

行して計測断面の後方2~3Dに達すると、変位はほぼ0に戻っている。すなわち、トンネルが全く掘削されていない状態から、完全に掘削された状態に至るまでの全変位量が測定できれば、トンネル軸方向にかかわる初期応力成分 τ_{yz0} 、 τ_{zx0} による変位の影響は無視できるが、切羽近傍に変位計を設置して、切羽進行に伴う変位増分を計測する場合には、 τ_{yz0} 、 τ_{zx0} による変位が計測値に含まれることになる。

したがって、先行変位が計測できない状況で二次元逆解析を実施する場合には、 τ_{yz0} 、 τ_{zx0} の値が大きいつきに解析結果の精度が低下する。

(3) 二次元逆解析における先行変位の影響

a) τ_{yz0} 、 τ_{zx0} の二次元逆解析への影響

図-2 に示した馬蹄形断面トンネルの三次元弾性掘削解析の変位解を利用して、逆解析の入力変位に先行変位

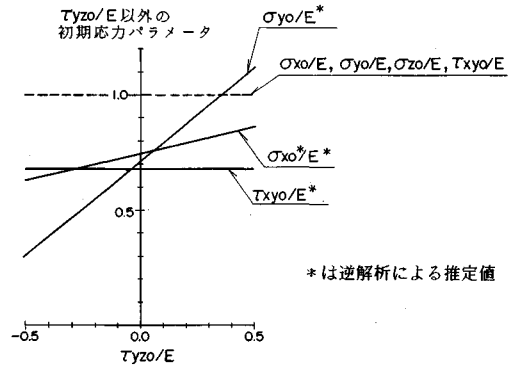


図-3 二次元逆解析における τ_{yz0} の影響 (入力変位に先行変位含まず、 $\tau_{zx0}/E=0$)

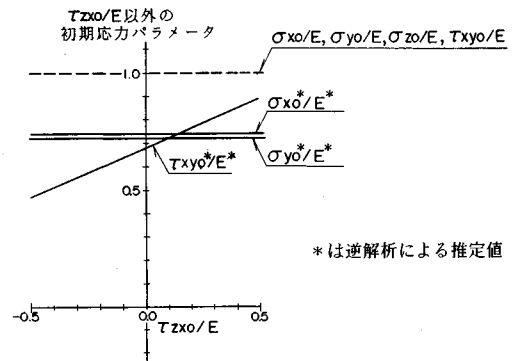


図-4 二次元逆解析における τ_{zx0} の影響 (入力変位に先行変位含まず、 $\tau_{yz0}/E=0$)

が含まれていない場合における初期応力パラメーターの推定値の変化の様子を、 τ_{yz0}/E と τ_{zx0}/E をパラメーターとして調べてみる。ここで、計測変位は切羽が計測断面に到達した時点から得られるものとする。

なお、三次元初期応力状態は、 τ_{yz0}/E をパラメーターとするときには、その他の応力成分を、

$$\sigma_{x0}/E = \sigma_{y0}/E = \sigma_{z0}/E = \tau_{xy0}/E = 1, \tau_{zx0}/E = 0$$

また、 τ_{zx0}/E をパラメーターとするときには、その他の応力成分を、

$$\sigma_{x0}/E = \sigma_{y0}/E = \sigma_{z0}/E = \tau_{xy0}/E = 1, \tau_{yz0}/E = 0$$

と設定する。

τ_{yz0}/E をパラメーターとしたときの二次元逆解析によって得られた初期応力パラメーターを図-3に、 τ_{zx0}/E をパラメーターとしたときの結果を図-4に示す。

図-3 から明らかなように、 τ_{yz0}/E の値によっては、 σ_{x0}^*/E^* および σ_{y0}^*/E^* の推定誤差がかなり大きくなる場合がある。また、 σ_{x0}^*/E^* と σ_{y0}^*/E^* の真値に対する比にも違いが生じる。一方、図-4 より、 τ_{zx0}/E の絶対値が大きくなれば、 τ_{xy0}^*/E^* の推定精度が低下するこ

とがわかる。

したがって、 τ_{y20}/E と τ_{zx0}/E が 0 に近いときには、 σ_{x0}^*/E^* 、 σ_{y0}^*/E^* および τ_{xy0}^*/E^* がほぼ同じ値になっているので、計測変位に一定の倍率を乗じて先行変位に対する補正を行い、逆解析の入力変位としてもあまり問題は起こらないが、 τ_{y20}/E や τ_{zx0}/E の値が σ_{x0}/E や σ_{y0}/E の値に対して 20~30% 以上となるときには、計測変位に一定の倍率を乗じて先行変位に対する補正を行うような方法は適当ではない。

b) 計測変位に先行変位が含まれていない場合の二次元逆解析結果の一例

ここでは、適当な三次元初期応力状態を想定して、計測変位に先行変位が含まれている場合と、計測変位に先行変位が含まれていないため一定の倍率を計測変位に乗じて補正を行った場合の二次元逆解析結果に、比較的大きな差が生じる例を示す。

三次元初期応力状態を、図-5 に示すように設定する。図-2 に示した馬蹄形断面トンネルの三次元弾性掘削解析の変位解を利用して、設定した初期応力状態から変位を求め、それを“計測変位”とみなして、逆解析を実施する。なお、有限要素分割は図-6 に示すとおりである。

計測変位に先行変位が含まれている場合の逆解析結果を図-7 に示す。図-7 は正解値と考えられる。

一方、計測変位に先行変位が含まれていない場合に計

測変位を補正して逆解析を行った結果を図-8 に示す。ただし、計測変位の 1.4 倍を入力変位とすることで先行変位に対する補正を行った。これは、トンネル軸方向にかかわる初期応力成分 τ_{y20} と τ_{zx0} が 0 のときにほぼ正解値が得られる補正倍率である。

図-7 と図-8 を比較すると、計測変位に先行変位が含まれていない場合には、計測変位に一定の倍率を乗じて補正を行っているにもかかわらず、主応力の向きが大きく異なっているために最大せん断ひずみの分布形に相違がみられる。さらに、最大せん断ひずみの値が正解値の 1/2 程度となっており、推定精度があまり良くないことがわかる。

先行変位の影響による逆解析の精度の低下を防ぐ方法としては、三次元初期応力状態を考慮し、トンネル形状を三次元的にモデル化した三次元逆解析^{16),17)}が有効であると思われる。しかしながら、三次元逆解析の適用にあたっては、現場で容易に使用できる解析システムの開発や、三次元逆解析に適する計器の配置方法など、今後さらに検討が必要である。

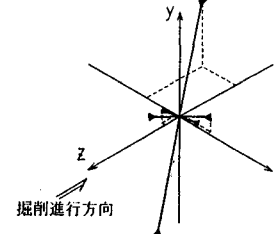
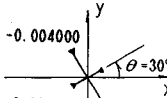
		初期応力パラメータ		方向余弦		
				l	m	n
主	σ_{10}/E	-0.005789	-0.371	0.687	-0.625	
	σ_{20}/E	-0.002012	0.908	0.411	-0.088	
	σ_{30}/E	-0.001199	-0.197	0.600	0.776	
応	3 元 主 応 力 図					
		掘削進行方向				
応	σ_{x0}/E	-0.002500				
	σ_{y0}/E	-0.003500				
	σ_{z0}/E	-0.003000				
	τ_{xy0}/E	0.000866				
	τ_{yz0}/E	0.002000				
	τ_{zx0}/E	-0.001000				
	力	面				
分	内					
	主					
	応					
	力					
	図					

図-5 想定した三次元初期応力状態

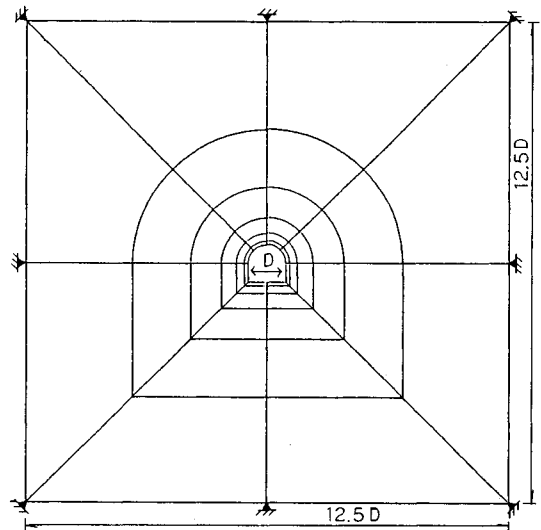


図-6 有限要素分割図

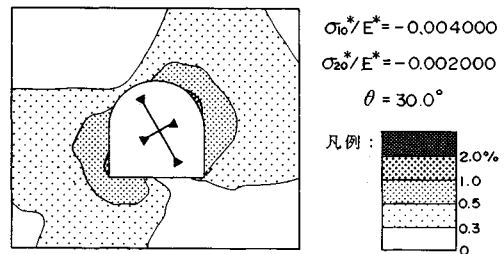
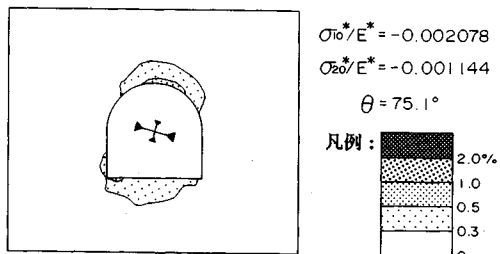


図-7 計測変位に先行変位が含まれている場合の逆解析結果 (最大せん断ひずみ分布)



図—8 計測変位に先行変位が含まれていないため計測変位の1.4倍を入力変位とした逆解析結果（最大せん断ひずみ分布）

3. 変位の入力方法に関する問題点とその考察

(1) 変位の入力方法に関する問題点

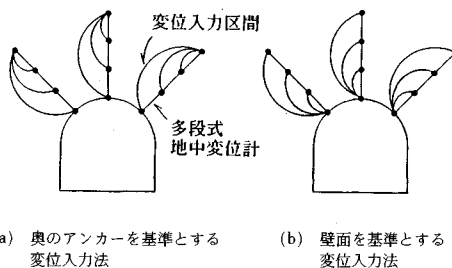
桜井らはトンネル掘削時に行う変位計測の結果から、逆解析によってトンネル周辺の地山に発生している塑性領域を推定する方法を提案した¹³⁾。その方法は、桜井らが先に提案した逆解析法 (DBAP)¹²⁾、すなわち、計測変位から初期応力パラメーターを逆算する方法を発展させたものである。なお、DBAPにおいては、地山は等方等質の線形弾性体 (二次元平面ひずみ状態) とし、さらに、トンネル付近の初期応力は一定と仮定している。

塑性領域の推定法は、まず DBAP によって得られた初期応力パラメーターをインプットデータとして通常の弾性解析を行い、トンネル周辺の最大せん断ひずみを求め、次にその値が降伏条件から求められる最大せん断ひずみの限界値を超える領域を塑性領域として推定する方法である。

この方法の妥当性は数値シミュレーションによって実証されている¹³⁾。しかし、シミュレーションにおいては、地中変位の計測点は十分多くあり、しかもトンネル半径方向と接線方向の二方向が測定されているものとして解析されている。一方、現場での変位計測では、一般に相対変位を測定し、そのうえ、トンネル接線方向の変位計測は非常に困難なため通常は実施しない。そのため、この方法を現場に適用する場合、その精度に問題のあることが予想される。

著者らは、最も一般的に用いられる多段式地中変位計の測定結果を用いて塑性領域の推定を行っている際に、変位の入力方法によっては、その結果の精度が非常に悪くなることに気付いた。

多段式地中変位計の測定結果をインプットデータとして逆解析を入力する場合、その入力方法として、次の二通りがよく用いられている。すなわち、図—9(a) および (b) に示すように、計器の最も奥のアンカーを基準とした相対変位を入力する方法と、空洞壁面を基準とした相対変位を入力する方法である。



図—9 逆解析における変位の入力方法

この2種類の変位の入力方法によって逆解析を行うと、その両者にかんがりの相違の生ずる場合がある。この2種類の変位の入力方法による逆解析結果の相違は、地山の応力-ひずみ関係の非線形性などに起因するものと考えられる。

以下に、地山が弾塑性体である場合について、数値シミュレーションによって、この問題点についての考察を行う。

(2) 数値シミュレーション

a) シミュレーションの手順

① まず、二次元弾塑性有限要素解析 (以下、弾塑性解析という) により掘削問題としてトンネルの解析を行う。このとき得られた解析結果を“真の”変位ならびに“真の”塑性領域とする。

② 次に、“真の”変位を計測変位とみなし、図—9(a)、(b) に示した2種類の変位入力方法により逆解析を実施する。このとき、地山は等方均質の線形弾性体と仮定する。

③ 弾塑性解析で得られた“真の”塑性領域と、桜井らの提案した逆解析法によって推定した塑性領域を比較する。

b) 弾塑性解析

図—10 に示す形状のトンネルについて、図示する初期応力状態のもとで、表—1 の力学定数を用いて、弾塑性解析を実施する。ここで、 E 、 ν 、 c および ϕ はそれぞれ弾性係数、ポアソン比、粘着力および内部摩擦角である。また、 ϵ_0 は限界ひずみを表わし、地山を Mohr-Coulomb の降伏規準に従う弾・完全塑性体とするならば、 E 、 c 、 ϕ を用いて次式で求められる。

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma_c}{E} = \frac{2c \cos \phi}{E(1 - \sin \phi)} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 σ_c は一軸圧縮強度である。

地山の応力-ひずみ関係は、降伏前は等方の Hooke の

表—1 地山の力学定数

E	ν	c	ϕ	ϵ_0
980MPa	0.3	0.49MPa	30°	0.173%

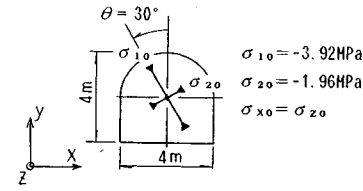


図-10 トンネル形状と地山の初期応力状態

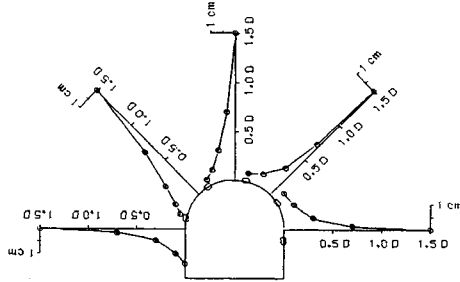


図-11 弾塑性解析による変位解

法則に従い、降伏後は非関連流れ則を用いて表わされるものとする。また、塑性ポテンシャル関数には、Von-Misesの関数を用いる。

要素分割ならびに拘束条件は、先に示した図-6と同様である。ただし、トンネルの大きさは直径 $D=4\text{m}$ とする。

弾塑性解析結果のうち、逆解析に入力する計測変位に相当する節点間の相対変位を図-11に、正解値としての塑性領域を図-12に示す。

c) 逆解析の結果

図-11に示した節点間の相対変位をインプットデータとして逆解析を実施し、初期応力パラメーターおよび塑性領域を求める。なお、逆解析では、先にも述べたとおり、地山を等方均質の線形な見掛けの弾性体と仮定する。なお、岩盤のポアソン比および塑性領域の推定に必要な内部摩擦角および限界ひずみは表-1に示した値を用いる。

測線の最も奥のアンカーを基準として変位を入力した場合の逆解析結果を図-13(a)に、壁面を基準として変位を入力した場合の逆解析結果を図-13(b)に示す。

図-13(a)と(b)を比較すると、両者の結果は大きく異なっているばかりでなく、いずれの結果も弾塑性解析によって得られた“真の”塑性領域を精度良く推定しているとはいいがたい。

(3) 二重逆解析法による塑性領域の推定

図-12および図-13(a), (b)より、弾塑性解析結果とその逆解析結果が異なるのは、塑性領域内の変位の影響であると思われる。

そこで、一般に塑性領域は壁面側から発生するため図

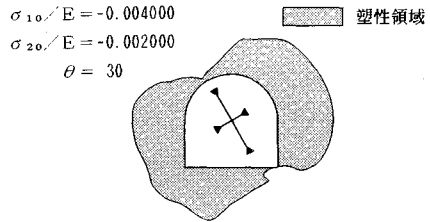


図-12 弾塑性解析による塑性領域

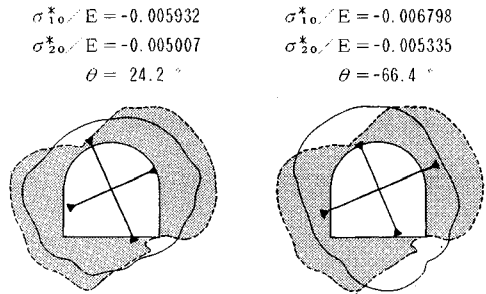


図-13 塑性領域の比較
 (a) 奥のアンカーを基準とする変位入力法による場合
 (b) 壁面を基準とする変位入力法による場合

図-13 塑性領域の比較

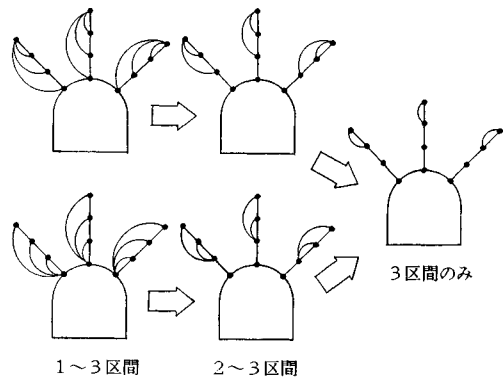


図-14 二重逆解析法の変位入力方法の例 (3測線で計測区間が1~3区間の場合)

図-14に示すように、2種類の入力法により、壁面側から1区間ずつ入力変位を除外し、塑性領域の影響を徐々に減らしながら逆解析を行ってみることにする。

図-11に示した変位をインプットデータとしてこの方法による解析を行う。この場合、5測線に1~4区間が存在する解析となり、その結果は図-15のようになる。この図から明らかなように、壁面側の2区間の変位を入力から除外し、3~4区間のみのデータで解析した場合、奥を基準としても、壁面側を基準としても、解析結果に大きな違いがなく、“真の”塑性領域に対して、かなり良い精度で塑性領域を推定し得ることがわかる。

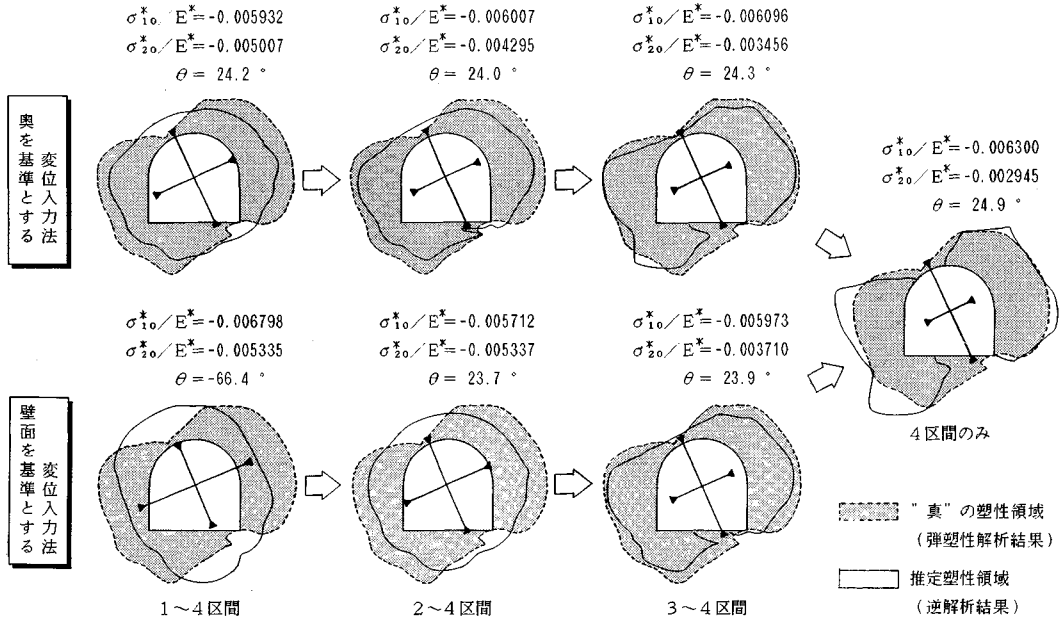


図-15 二重逆解析法による逆解析結果

また、初期応力パラメーターについても、絶対値にはまだ差があるものの、初期応力パラメーターの主値の比や主応力の角度は真の値にかなり近いものが得られている。

したがって、変位の入力を計測線の奥を基準とした場合と、壁面側を基準とした場合について、壁面側から変位を順次除外して逆解析を行い、両者の解にあまり差がなくなったときの解を採用すれば精度の良い逆解析結果が得られることになる。つまり、この方法は、壁面付近に生じた岩盤の力学特性が変化した領域の計測変位を取り除くことによって、初期応力パラメーターおよび塑性領域の推定精度を高める方法といえる。以下、この解析法を二重逆解析法とよぶことにする。

(4) 塑性領域内のひずみ分布の推定

a) 二重逆解析法によるひずみ分布

次に、二重逆解析法によって得られるひずみ分布について調べてみる。

まず、弾塑性解析結果から得られる“真”の最大せん断ひずみ分布を図-16に示す。

それに対して、壁面を基準として全区間の変位を入力して逆解析を行った結果を図-17に、二重逆解析法の結果(3~4区間のデータに対し、奥を基準とした変位入力法)の最大せん断ひずみ分布を図-18に示す。

図-16と図-17を比較すると、ひずみ分布の傾向は大きく異なっている。一方、図-18に示した二重逆解析法により推定したひずみ分布をみると、トンネル壁面から離れた領域において推定精度はかなり向上している

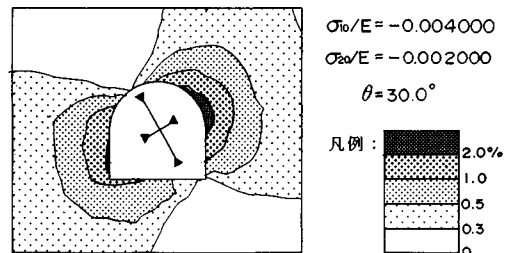


図-16 “真”の最大せん断ひずみ分布 (弾塑性解析結果)

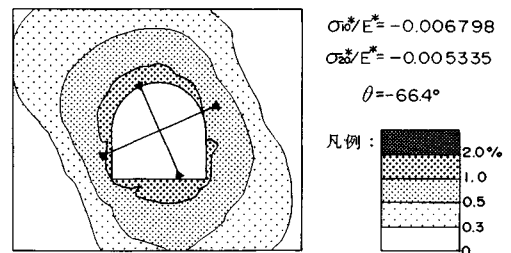


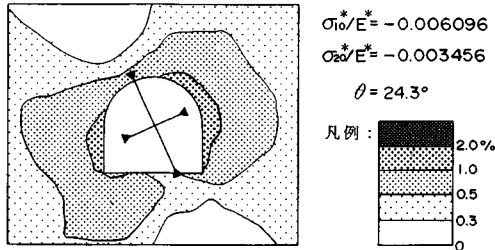
図-17 全区間の変位を用いた逆解析により推定した最大せん断ひずみ分布 (壁面を基準とする変位入力法)

ものの、壁面近傍のひずみレベルは異なっている。

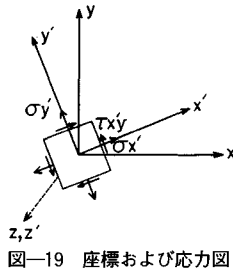
そこで、二重逆解析法で推定した塑性領域内に対して、桜井らが提案している異方性パラメーター¹⁴⁾を導入して、塑性領域内のひずみ分布を推定してみる。

b) 異方性パラメーターによる塑性の表現¹⁴⁾

異方性パラメーターを導入した応力-ひずみ関係式を用いて塑性を表現する方法について以下に簡単に述べ



図—18 二重逆解析法により推定した最大せん断ひずみ分布



図—19 座標および応力図

る。

異方性材料の応力-ひずみ関係は、二次元平面ひずみ状態の場合、図—19に示す局所座標系 ($x' y' z'$) において、次式のように表わされる。

$$\{\sigma'\} = [D'] \{\epsilon'\} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\{\sigma'\}$ は応力ベクトル、 $\{\epsilon'\}$ はひずみベクトル、 $[D']$ は応力-ひずみ関係マトリックスであり、次式で与えられる。

$$[D'] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & m(1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 m は異方性パラメーターとよばれ、次式で定義される。

$$m = G/E \dots \dots \dots (4)$$

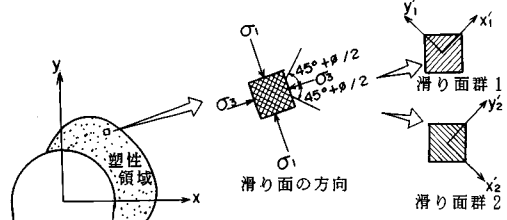
ただし、 E, ν, G は、縦弾性係数、ポアソン比ならびにせん断弾性係数である。

全体座標系における応力-ひずみ関係マトリックス $[D]$ は、座標変換マトリックス $[T]$ を用いて次のように表わされる。

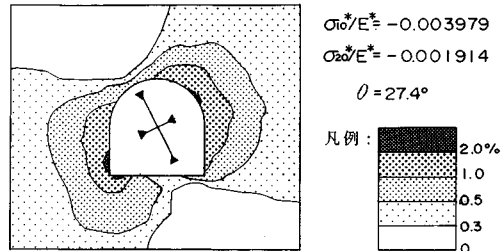
$$[D] = [T][D'][T]^T \dots \dots \dots (5)$$

ここで塑性を表現するために、図—20に示した塑性領域内の要素について、最大引張主応力方向と $\pm(45^\circ + \phi/2)$ の角をなす2組のすべり面群が存在するものとして、2組のすべり面群のすべり面方向 (x_1 および x_2 軸方向) のせん断剛性を低下させる。

全体座標系における2方向のすべり面の応力-ひずみ関係マトリックスを、それぞれ $[D_1], [D_2]$ 、ひずみを $\{\epsilon_1\}, \{\epsilon_2\}$ とすると、全体座標系において、2方向のすべ



図—20 連続体モデルによる塑性の表現



図—21 異方性パラメーターを導入して推定した最大せん断ひずみ分布

り面を考慮した平均ひずみ $\{\epsilon\}$ は、次式によって表わされる。

$$\{\epsilon\} = 1/2 [\{\epsilon_1\} + \{\epsilon_2\}] = 1/2 [[D_1]^{-1} + [D_2]^{-1}] \{\sigma\} \dots \dots \dots (6)$$

式 (6) より、2方向のすべり面を考慮した応力-ひずみ関係マトリックスは、次式で表わされる。

$$[D] = [1/2 ([D_1]^{-1} + [D_2]^{-1})]^{-1} \dots \dots \dots (7)$$

c) 異方性パラメーターを導入した逆解析

異方性パラメーターを導入した逆解析を実施するにあたり、ポアソン比は変化しないものと仮定し、 $\nu = 0.3$ とする。

変位の入力方法は、設定した1~4区間の変位をすべて用い、奥を基準とする。

逆解析は、入力変位 U_i と解析によって得られる変位 U_i^* との残差の二乗和 e が最小となるように m を求める方法で行う。すなわち、

$$e = \sum_{i=1}^N (U_i - U_i^*)^2 \longrightarrow \min \dots \dots \dots (8)$$

となる m を求める。

解析の結果得られた最大せん断ひずみの分布ならびに初期応力パラメーターを図—21に示す。なお、このときの異方性パラメーター m の値は0.077となった。

図—21に示した異方性パラメーターを導入して推定した最大せん断ひずみ分布と、図—16に示した“真の”最大せん断ひずみ分布を比較すると、その推定精度が非常に良いことがわかる。また、初期応力パラメーターの推定精度も向上している。

したがって、弾塑性地山に対しては、二重逆解析法により塑性領域を推定し、塑性領域内に対して上で述べた

方法で異方性パラメータを導入すれば、塑性領域の形状、最大せん断ひずみの分布ならびに初期応力パラメータをすべて精度良く推定することができる。

4. む す び

本論文では、トンネル掘削時の変位計測結果を用いた二次元逆解析について、実際に現場へ適用する際に遭遇する2つの問題点を指摘し、それらに対して考察を行った。

第一の問題点は、先行変位が計測不可能な場合に、地山の初期応力状態によっては、逆解析結果の精度が低下することである。

この場合、逆解析結果の精度低下の原因の1つとして、トンネル軸方向に関係するせん断応力成分の影響が考えられ、精度低下を防ぐためには三次元逆解析が有効であることを指摘した。

第二の問題点は、トンネル周辺岩盤に塑性領域が生じる場合、計測変位の入力方法によって、逆解析結果の精度が低下することである。

しかし、この問題は、多段式地中変位計を用いて計測を行うときには、本論文で提案した二重逆解析法により解決することが可能であり、先に著者の一人が提案した塑性領域の推定法と異方性パラメータを導入した応力-ひずみ関係を併用することにより、初期応力パラメータ、塑性領域の位置と形状ならびに最大せん断ひずみの分布をすべて精度良く推定することができる。

なお、ここで示した三次元境界要素法による弾性掘削解析には、清水ら¹⁸⁾が開発したプログラムを用いたことを付記する。

謝 辞：本論文をまとめるにあたり、神戸大学工学部助手 清水則一氏ならびに(株)新日本技術コンサルタント 平川芳明氏に多大なご助力を得た：ここに記し、謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 吉川恵也・朝倉俊弘・日吉 直・遠藤眞一：NATM 計測実績の統計分析，第15回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.220～223，1983。
- 2) 菅原彦彦・尾原祐三・有賀義明・石村 豊：地下発電所における岩盤応力測定，第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.96～100，1988。
- 3) 本島 睦・日比野敏・林 正夫：岩盤掘削時の安定解析のための電子計算プログラムの開発，電力中央研究所報告，No.377012，1978。
- 4) 土屋 敬：連載講座 NATM(7)，7章，トンネルと地下，Vol.12，No.7，pp.71～75，1981。
- 5) Serata, S. : Integration of field instrumentation and computer simulation—Development and application of the SPDR method, 2nd int. sympo. on FIELD MEASUREMENTS IN GEOMECHANICS, KOBE, pp.613～624, 1987。
- 6) 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) 桜井春輔・進士正人：マイクロコンピュータによる地下空洞掘削時の安定性の評価，土木学会論文集，第358号/Ⅲ-3，pp.37～46，1985。
- 8) 川本眺万・藤川富夫：岩盤掘削面におけるキープロック安定解析のシステム化について，土木学会論文集，第346号/Ⅲ-1，pp.47～55，1984。
- 9) Sugawara, K., Kaneko, K. and Obara, Y. : Rock stress and AE activity in Miike coal mine, 2nd int. sympo. on FIELD MEASUREMENTS IN GEOMECHANICS, KOBE, pp.749～758, 1987。
- 10) 石田 毅・金川 忠・佐々木俊二・浦沢義彦：AEによる岩盤空洞安定性監視に関する基礎実験，土木学会論文集，第376号/Ⅲ-6，pp.141～149，1988。
- 11) 横山 章・木村 宏・高瀬昭雄：NATMによる掘削時の現場計測に基づく施工管理手法，トンネルと地下，Vol.15，No.4，pp.7～17，1981。
- 12) 桜井春輔・武内邦文：トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法，土木学会論文報告集，第337号，pp.137～145，1983。
- 13) 桜井春輔・清水則一・松室圭介：計測変位に基づく地下空洞周辺地山に発生する塑性領域の推定法，土木学会論文集，第394号/Ⅲ-9，pp.89～96，1988。
- 14) Sakurai, S. and Ine, T. : Strain analysis of jointed rock masses for monitoring the stability of underground openings, Proc. of the Int. Sympo. on Computer and Physical Modelling in Geotechnical Engineering, Bangkok, pp.221～228, 1986。
- 15) Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W. : Fundamentals of rock mechanics, 2nd Edn., John Wiley & Sons, Inc., pp.249～254, 1976。
- 16) 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。
- 17) 桜井春輔・清水則一・壺内達也：地下空洞における計測変位の境界要素法による三次元逆解析法，土木学会論文集，第382号/Ⅲ-7，pp.55～61，1987。
- 18) 清水則一・壺内達也・桜井春輔：境界要素法による三次元弾性問題の解析—直接法と間接法—，(財)建設工学研究所報告，第28号，pp.63～75，1986。

(1989.5.17・受付)