

逆解析プログラムの紹介

一條 俊之*
Toshiyuki Ichijo

中尾 幸久*
Yukihisa Nakao

トンネル掘削や地下空洞工事の設計施工において、現場計測は重要な位置を占め、計測データを基に様々な解析手法によってトンネル周辺地山の安定を評価する方法が提案されている。その中で「逆解析」は、現場計測データを基に解析を行い、地山の力学挙動を知ることができる有効な手法である。ここでは、この解析手法と現在コンピュータ（大型電算、パソコン）で稼動中のシステムの紹介を行うものである。

1. 逆解析の概要

トンネル掘削に伴う地山の力学的挙動を把握するため、通常、FEM解析が用いられる。この場合、トンネルに作用する初期応力や地山の物性値のデータを事前に設定して解析（順解析）を行うが、結果が値山の実挙動となかなか一致しないのが実情である。これは、室内試験では地山をマスとして評価しうる物性値を特定化することがなかなか難しいため、事前データの信頼性に問題を残す結果となるからである。そのため、得られるデータに対してなんらかの工学的判断が必要とされる。そこで、現場計測から得られる地山挙動から逆に初期応力や地山の物性値を計算する「逆解析」という手法が提案されている。逆解析には、大まかに分けて次の2つの方法がある。

(1) 逆定式化法（Inverse Formulation Method）

得られた計測変位から逆に未知数を計算する。

(2) 直接定式化法（Direct Formulation Method）

これは未知のパラメータを任意に変化させ、計測変位に合うように最適な値を求める試行錯誤法である。

現在稼動中のプログラムは(1)の手法であり、以下この説明を行う。

2. 逆解析の方法

逆解析により現場計測で得られる地中変位あるいは内空変位を用いて、地山の初期応力および材料定数を推定することができる。これは、通常の応力一ひずみ解析の

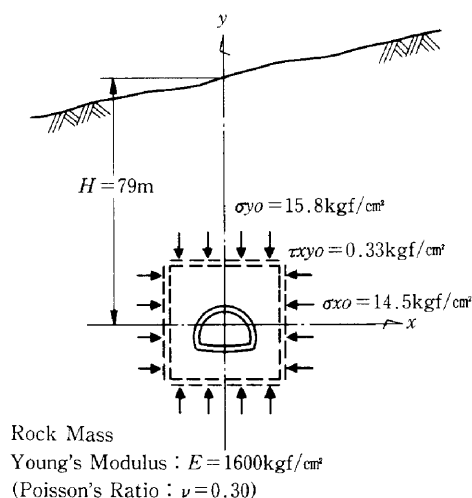


Fig.1 地山を一樣応力場と考えた場合の初期応力と弾性係数

逆を行うものである。

Fig.1 に示すように地山を等方等質の弾性体（弾性係数 E 、ポアソン比 ν とする）と仮定し、初期応力はトンネル掘削位置の近傍で一樣であると考え、ポアソン比の影響は小さいとされているので、それを既知量としてあらかじめ与えると、求めるべき未知量はトンネル掘削前の地山に存在している初期応力と弾性係数のみとなる。そして、さらに、その初期応力と弾性係数の比をとると、平面歪問題の2次元の場合は、未知量は3個となる。すなわち、

$$\{C\} = \langle \sigma_{x0}/E, \sigma_{y0}/E, \tau_{xy0}/E \rangle$$

である。これを初期応力パラメータと呼ぶ。この初期応力パラメータを入力データとして、通常の有限要素の逆の定式化を行うと、最終的に次の式を得る。

$[A]$ は、ポアソン比、地山と覆工材料の弾性係数の比、および、測定点の位置によって定まるマトリクスである。 $\{U\}$ は2点間の相対変位の測定値である。これらから、内空変位の測定として最も一般的な三角形の測線を用いた場合には、初期応力パラメータを一意的に求めることができる。解析フローを Fig.2 に示す。以上の解析によって主に次に示す情報を得ることができる。

- (1) 掘削前のトンネル周辺地山の初期応力
 - (2) トンネル周辺地山の弾性係数
 - (3) 掘削により生じるトンネル周辺地山の応力、歪分布
- この内、(3)の歪分布と室内試験で得られた地山の限界歪と比較することで、塑性領域を定量的に把握し、トンネル周辺地山の安定を評価することが可能である。

Fig.3,4 に解析例として最大せん断歪図と変位の解析値と計測値の比較を示す。限界歪を0.8%とした場合、トン

*土木設計部 設計課

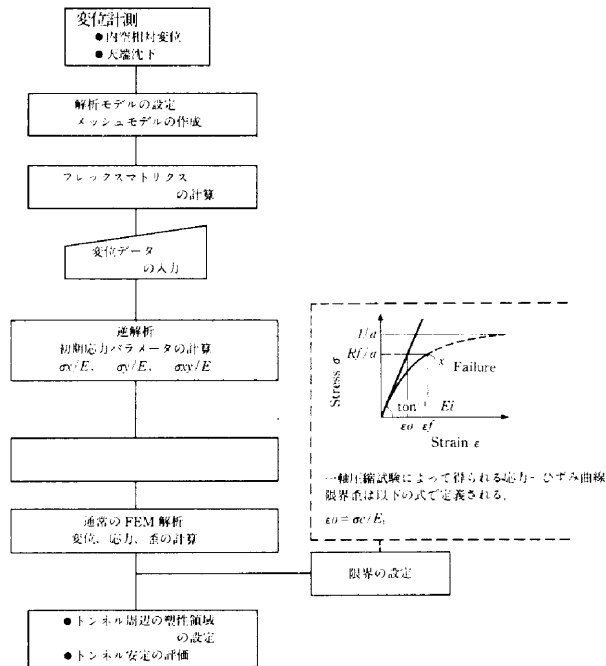


Fig.2 逆解析フロー図

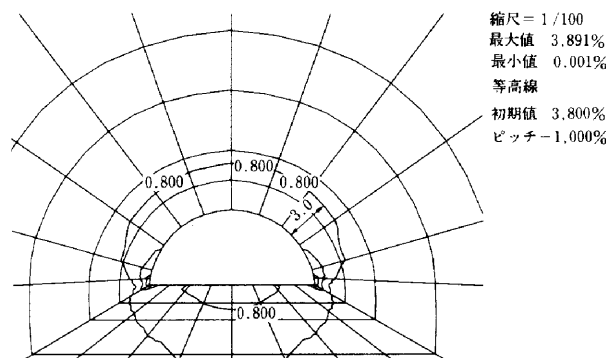
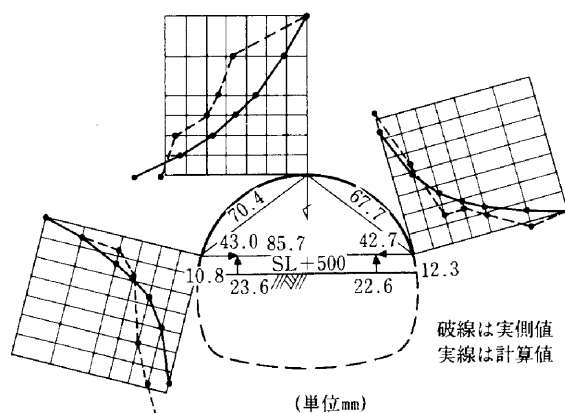
Fig.3 等ひずみ線図 (γ_{max})

Fig.4 変位の実側値と計算値との比較

ネル壁面から3.0m程度地山が塑性化していることがわかる。また、解析値と計測値との変位比較において両者は概ね一致しており、このプログラムの整合性は確認される。

3. 現場における（パソコンによる）利用法

逆解析プログラムの使用手順を以下に示す。

- ① 本プログラムは有限要素解析を利用するため、解析領域（トンネル断面を含む断面）を有限要素分割しなければならない。大型機では自動分割プログラムを利用して、比較的簡単に要素分割ができる。
- ② 逆定式化により初期応力パラメータを算出するためのマトリクス（フレックスマトリクス）を、有限要素解析にて求める。
- ③ 計測データを入力し、領域内のひずみ分布、応力分布を求める。
- ④ 物性試験値より評価された限界ひずみから、ゆるみ領域（塑性領域）を推定する。
- ⑤ ゆるみ領域の範囲から対策工の必要性や対策工の内容を検討する。
- ⑥ 施工

①～②は有限要素解析を行う部分のため、大型機を利用する方が人為的作業性、演算時間に対して有利である。トンネル断面が同一であれば①～②は省略することができ、計測データに基づき③～⑥を逐次繰り返すことに

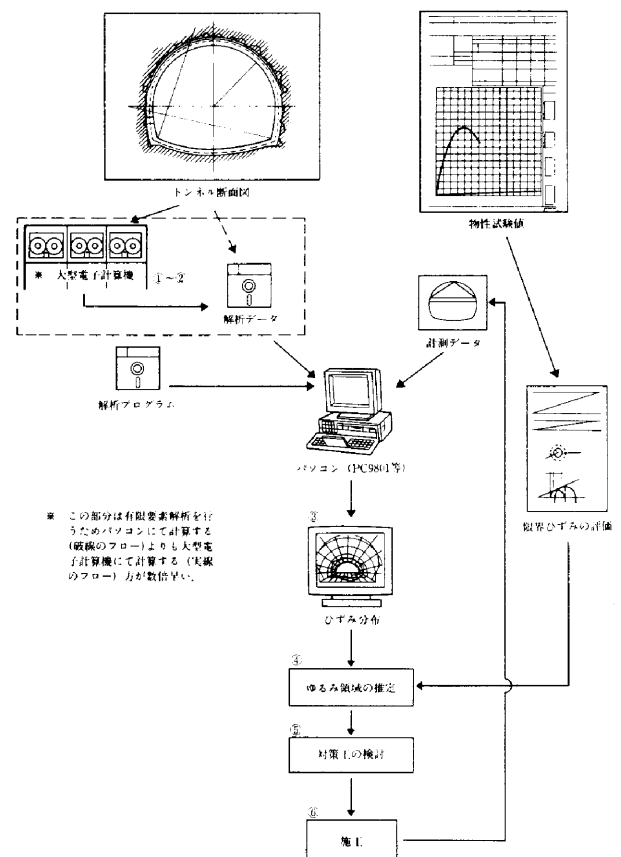


Fig.5 逆解析を利用した計測・施工フロー

より、周辺地山の状況を推定しながら施工することができ
る。

4. おわりに

逆解析は、現在施工中のトンネルに適用されており、
新しいトンネル安定の評価法として注目されている。今
後、解析手法の整理・適用限界を踏まえ、現場の計測管理
に役立てたい所存である。

参考文献

- 1) 桜井春輔, 「マイクロコンピュータによる計測結果の
評価と設計・施工へのフィードバックについて」, 第五
回トンネル技術シンポジウム—NATMの計測と施工
管理—, 日本トンネル技術協会, 昭和59年2月, PP
3～12