

(50) 神居古潭変成帯におけるNATM施工（逆解析への適用）

飛鳥建設 入江 公孝 ○近 久 博 志  
福井 隆夫 山田 雄彦

# 1. はじめに

トンネル施工中の地山や支保材の挙動は現場計測によってかなり明確にされつつある。その中で、現場で得られた計測データを設計にまでフィードバックさせる手法として、最近、逆解析法が脚光を浴びている。ここでは、昨年の11月に無事貫通を迎えた稲里トンネルを例に逆解析を行ない、適応性等について検討するものである。

# 2. 地質及び施工概要

稲里トンネルは第三紀層と先白亜紀層に跨っている。前者は、主として緻密で硬質な頁岩からなる良好な地山である。後者は、神居古潭変成帯に属す粘板岩、砂岩、蛇紋岩からなる破碎地山である。当変成帯は北海道中央部を南北に帯状に分布する広域の動力変成帯で結晶片岩類、蛇紋岩及び輝緑岩等の超塩基性岩からなるが、当トンネル区間ではその変成度は低く、片状の黒色片岩を主としている。片理構造は明確なものではないが、亀裂は密に発達し、全体としては「はく離性に富む破碎地山」と云う性状を示している。岩相の変化は極めて激しく、角レキ混りの粘土状の脆弱なものから硬質なもののまで様々に変化する。

施工延長1,401mのうち900mをNATMで施工し、施工法は大部分がショートベンチ発破工法である。NATM工法における標準断面と断面諸元を図-2に示す。

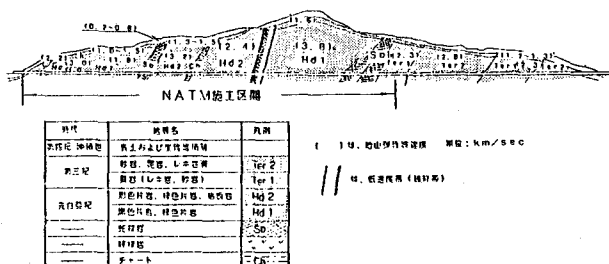


図-1 稲里トンネル地質断面図

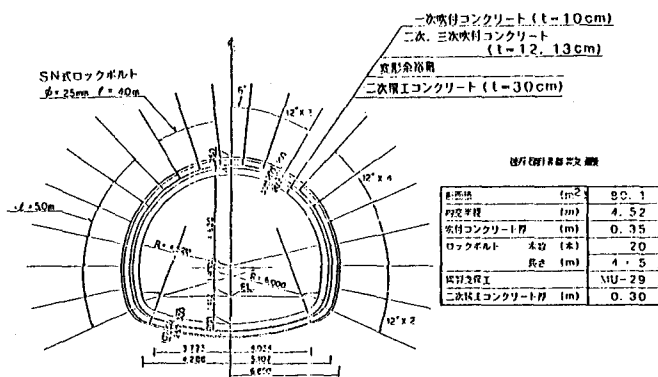


図-2 NATM工法標準断面図

# 3. 逆解析

有限要素法に共役勾配法と黄金分割法を併用した逆解析法を適用する。

## 3-1 基礎式の説明

逆解析を考えるに際し、次のような仮定を設け基礎式を導く。

- (i) 地山は等方等質で線形の応力・ひずみ関係を有す
  - (ii) 地山は平面ひずみ状態とする
  - (iii) 地山の変位挙動はトンネル掘削前の初期応力が掘削によって開放されることで生ずるものとする
- (本解析では地山の物体力は無視する)

これらの仮定は、有限要素法の弾性解析における仮定条件の一部に過ぎず、特別なものでない。しかし、(iii)に関しては解析をトンネル対象として設ける。<sup>(1)</sup> まず、有限要素法の基礎式は次の様に表わされる。

$$\begin{aligned} [B]^T [C] d &= [K] \{d\} & (1) & \quad [B]: \text{節点変位 (ひずみ) マトリックス} \quad [K]: \text{全体剛性マトリックス} \\ \{d\} &= [K]^{-1} [B]^T [C] d & (2) & \quad [C]: \text{地山の初期応力} \quad \{d\}: \text{節点変位ベクトル} \end{aligned}$$

(2)式に対して現場計測によって  $n$  個の変位  $\bar{d}_i$  が得られたとすると、最小二乗法を適用して目的関数は次のように与えられる。<sup>(2)</sup>

$$J = \sum_i (d_i - \bar{d}_i)^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

そして未知数を地山の縦弾性係数 ( $E_1$ ) と初期応力 ( $\{\sigma_0\}$ ) とし、目的関数  $J$  の勾配ベクトルを求めると、

$$\frac{\partial J}{\partial E_1} = -2 \sum_i \left[ \frac{\partial}{\partial E_1} \left\{ \{K\}^T \{B\}^T \frac{\partial}{\partial E_1} \{u\}_i \right\} \right] \cdot \bar{d}_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \sigma_0} = 2 \sum_i \left[ \{K\}^T \{B\}^T \frac{\partial}{\partial \sigma_0} \{u\}_i \right] \cdot \bar{d}_i \quad (5)$$

となる。式中の添字 1 は地山の定数を、 $i$  はベクトル中の  $i$  成分を表すものとする。また、 $\partial \{K\} / \partial E_1$  は地山の剛性マトリックスの微分であり、

$$\frac{\partial \{K\}}{\partial E_1} = \int \{B\}^T \frac{\partial \{D\}}{\partial E_1} \{B\} dv_i \quad (6)$$

$$\frac{\partial \{D\}}{\partial E_1} = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1-\nu}{1+\nu} & 0 \\ \frac{1-\nu}{1+\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2(1-\nu)}{1+\nu} \end{bmatrix} \quad (7)$$

として求められる。上式(6)を考える事によって複合構造物(地山、ロックボルト、吹付コンクリート等)の扱いが可能となる。

### 3-2 解析手順

共役勾配法のアルゴリズム

アルゴリズム (共役勾配法)

ムは右のようになる。<sup>(3)</sup> 図-3に解析フローチャートを示す。 $\beta^k$  の算定公式は様々に提案されているが、ここでは最もよく使われている F-R の公式による。また、ステップ 5 中  $\alpha^k$  は関数比較の黄金分割法により求める。

### 3-3 解析モデル

解析は下半掘削前を想定し、図-4・図-5に示すような有限要素モデルを設定する。この場合、初期せん断応力度を  $0 \text{ kg/cm}^2$  とし、左右対称なモデルを使用する。41節点、14要素(地山7要素、ロックボルト5要素、吹付コンクリート2要素)である。

### 3-4 数値解析

解析は現場で得られた計測データ(下半掘削前)のうち、次の2ケースについて行なう。

ケース1 … 第三紀頁岩層

ケース2 … 神居古潭変成帯片状粘板岩層

使用した材料データ、初期値を表-1と表-2に示す。ロックボルトの弾性係数に関しては図-9のひずみ比較図の下半掘削前の状態に対して線形の相関が成立するものとして求めた勾配 0.90 (ケース1) と 0.16 (ケース2) を低減率として掛け合わせた値を使用する。

「計測の遅れ」の評価はしないで解析を行う。

共役勾配法・黄金分割法

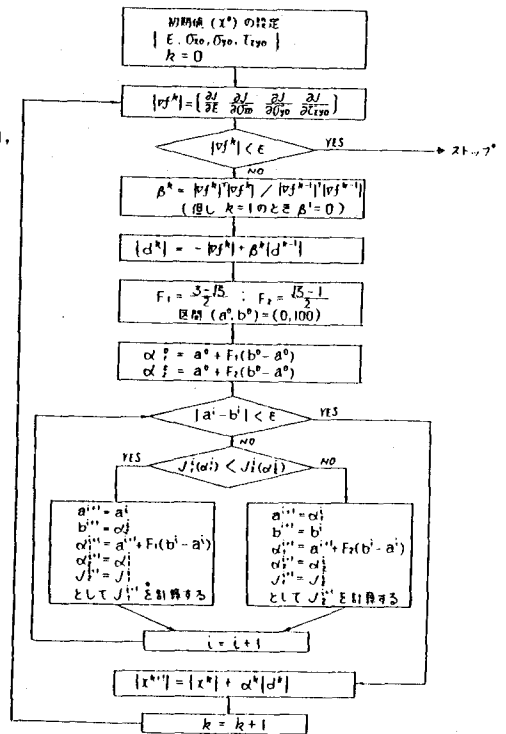


図-3 解析フローチャート

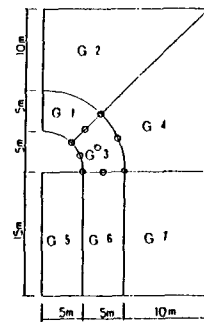


図-4 地山モデル図

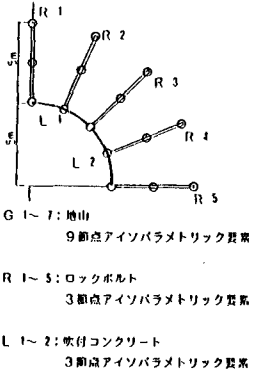


図-5 支保材モデル図

表-1 材料データ

| 解析ケース  | ケース1      | ケース2      | 単位                 |
|--------|-----------|-----------|--------------------|
| 地 山    | $\nu=0.3$ | $\nu=0.3$ |                    |
| 材料     | E=5000    | E=1000    | kg/cm <sup>2</sup> |
| コンクリート | t=25      | t=25      | cm                 |
| ロックボルト | E=1890000 | E=336000  | kg/cm <sup>2</sup> |
|        | A=5.07    | A=5.07    | cm <sup>2</sup>    |

表-2 初期値

| 解析ケース   | 単位                 | ケース1  | ケース2 |
|---------|--------------------|-------|------|
| 地山弾性係数  | kg/cm <sup>2</sup> | 10000 | 1000 |
| 初期水平応力係 | kg/cm <sup>2</sup> | 10    | 10   |
| 初期鉛直応力係 | kg/cm <sup>2</sup> | 10    | 10   |
| 初期剪断応力係 | kg/cm <sup>2</sup> | 0     | 0    |

表-3 目的関数の収束状況

| 繰返し回数 | ケース1      | ケース2      |
|-------|-----------|-----------|
| 0     | 0.0215558 | 7.0595458 |
| 1     | 0.0076244 | 0.0234530 |
| 2     | 0.0000068 | 0.0000004 |

計測データとして天端沈下と水平の内空変位だけが得られている場合を想定し、解析してみると表-3のような目的関数の収束が得られた。両ケースとも2回の繰返しではほぼ収束している。解析結果を地中変位計とロックボルトの軸力計の計測結果と比較してみると図-8のようになる。弾性解析であるので節理等の不連続な挙動は十分にシュミレートしきれないものの、変位は全体的によく一致していることが分かる。ロックボルトの軸力は平均値としてのオーダーは一致しているが、とりわけケース2では違った値を示している。

#### 4. ロックボルトの軸力発生について

解析結果を踏まえて、ロックボルトの軸力発生機構について考える。

ロックボルトの軸力発生機構を大別すると次のように分けられる。

##### a) ケース1

i) 節理等の不連続の開きが卓越する(図-7)。 ii) 地山とロックボルトのひずみの分布が同じ傾向を示す(図-8)。 iii) 変位が大きく進行すれば、ロックボルトが局部的に降伏したり破断したりする。

##### b) ケース2

i) 地中変位の進行が全体に渡って分布する(図-7)。 ii) 地山とロックボルトのひずみ分布は異なった傾向を示し、相関は認められない(図-8)。 iii) 変位が大きく進行してもロックボルトの軸力は増加せず、地山との付着が切れ、抜け出してくる。

広義に分類すれば、ケース1は硬岩・中硬岩のように不連続面の挙動が卓越し、岩自身の変位挙動は相対的に小さい場合に対応し、モルタルと地山との付着力が良好で

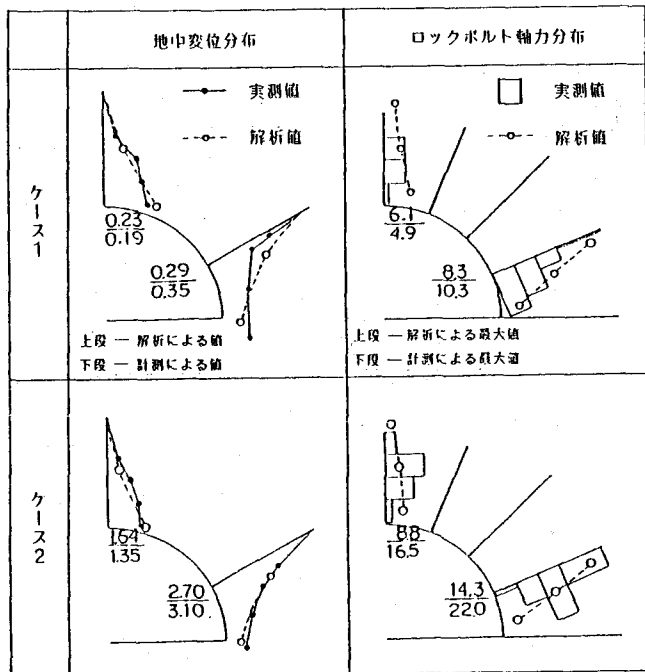


図-6 解析値と実測値の比較

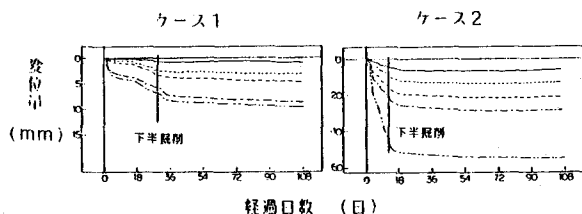
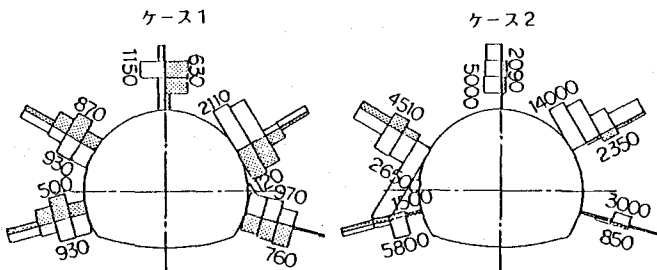


図-7 地中変位計 経時変化グラフ



□ 地中変位計により求めた歪  
 ■ ロックボルト軸力計により求めた歪

単位 :  $10^{-6}$

図-8 地中変位計とロックボルト軸力計のひずみ分布の比較

ある地山に打設されたロックボルトの挙動であると云える。ケース2は土砂のように、変位挙動が広範囲に及び全体的に変位する場合に対応し、モルタルと地山との付着力が非常に小さい地山に打設されたロックボルトの挙動であると云える。そして軟岩においては、これらの中間的な挙動を示すものと思われる。図-9に当トンネルの地山とロックボルトのひずみの比較図を示す。同図において節理等の不連続面が卓越していると思われるデータについて中黒で印し、両者の境界付近を指数関数で図中に示す。この指数関数式と  $\epsilon_R = \epsilon_B$  で囲まれた領域が硬岩・中硬岩に対応し、この式と  $\epsilon_R = 0$  で囲まれた領域が土砂に対応する結果となった。

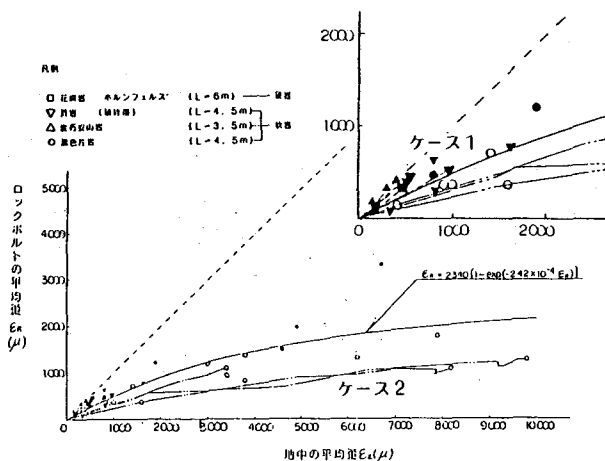


図-9 ロックボルトと地中変位のひずみの比較図

## 5. まとめ

吹付コンクリート及びロックボルトの効果を考慮に入れた逆解析の手法を開発し、実測値への検証を行なった。

逆解析の結果、地中変位に関しては実測値と比較的によく一致するにもかかわらず、ロックボルトの軸力分布は異なった傾向が認められる。このことは、ケース2（土砂、硬岩の一部）の様な地山においては、解析にあたってロックボルトの滑りやせん断力を考慮する必要性を示している。一方、ケース1（硬岩、中硬岩）の地山ではその影響度は少なく、不連続面の開きのシュミレートや適切な力学定数の設定さえ行なえば正確な解析が可能であろう。

本逆解析法は、現場計測結果をタイムリーに設計、施工へフィードバックさせるための一手法であり、現段階でも変位に関しては実用的なオーダーで計測結果との一致が窺える。支保材に関しては考慮した解析が出来る程度の段階であり、引続き研究の余地が残されているものの、ロックボルトに関しては実際の挙動を分析することで、解析への足掛かりが出来たものと思われる。

今後は、本逆解析プログラムをさらに改良し、支保材のシュミレートまで出来るようにしたいと考えている。また、図-9に示したロックボルトと地中のひずみの履歴曲線と地山の強度の関係などは整理されればロックボルトの設計上有意なデータとなる。

最後に、本報告書作成にあたって北海道開発局土木試験所地質研究室、同室開発建設部穂別道路改良事務所からの御指導に深く感謝の意を示すと共に、関係諸兄にあらためて謝意を表わしたい。

## 参考文献

1. 桜井、武内「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 p137～145 1983. 9
2. 荒井、錦見、太田「情報化施工における有限要素パラメータの逆算について」第16回土質工学研究発表会
3. 今野、山下著「非線形計画法」日科技連
4. 近久、福井、山田「NATMにおける現場計測についての一考察」第37回年次学術講演会講演概要集 1982
5. 高崎、蔵田、楠本「神居古潭変成岩帯におけるトンネル周辺挙動」第14回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 1982

(50) Tunnelling by NATM in KAMUIKOTAN METAMORPHIC BELT  
(Adaptation of Back Analysis)

Kimitaka Irie  
Hiroshi Chikahisa  
Takao Fukui  
Takehiko Yamada  
Katsumi Watanabe  
(TOBISHIMA CORPORATION)

Abstract

INASATO Tunnel was driven in Slate and Serpentinite which belong to KAMUIKOTAN METAMORPHIC ROCK in HOKKAIDO. We show the tunnel behavior and their measurements as follows.

We developed a converse analysis method, considering the effects of supporting system. Tunnel displacements were measured. We applied our converse analysis method to the value of measured displacements and estimated initial stresses and elastic modulus of the ground.

We are able to classify the behavior of ground into certain groups comparing rockbolt strain with ground strain.

As a conclusion, we will study adaptation of our method to field measurements.

We believe that this method is also useful for the analysis of other fields.