

逆解析を用いた情報化施工の 高度化に関する一考察

A Study on Improvement for Observational Construction using Inverse Analysis

福田 毅¹・山田 浩幸²・藤澤 勉³・大村 修一⁴・村上 章⁵

Tsuyoshi Fukuda, Hiroyuki Yamada, Tsutomu Fujisawa,
Syuichi Ohmura and Akira Murakami

¹正会員 工博 株式会社地層科学研究所(〒532-0011 大阪市淀川区西中島 5-7-19-301)

E-mail:fukuda@geolab.jp

²正会員 株式会社鴻池組 大阪本店 土木技術部(〒530-8517 大阪市北区梅田 3-4-5)

³東日本高速道路株式会社 千歳工事事務所(〒066-0037 北海道千歳市新富 1-2-14)

⁴鴻池・飛島特定建設工事共同企業体穂別トンネル西工事(〒054-0201 北海道勇払郡むかわ町穂別稲里 418-5)

⁵正会員 農博 岡山大学大学院環境学研究科(〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

The kinetic property of the rock and the distribution are estimated by comparison with various kinds of investigation or rock classifications in the design of the tunnel, but it is complicated to identify them. Therefore inverse analysis has been used as a method to estimate the kinetic property of the rock and initial stress in macroscopic perspective by measurement results. However, there are some problems that should be settled from a point of view sophisticating observational construction.

In this paper, the approach solving those problems by the inverse analysis that applied Kalman filter to a finite element method is presented.

Key Words : *inverse analysis, observational construction, swelling rock, Kalman filter*

1. はじめに

トンネルの設計段階では、種々の調査や探査の結果や岩盤分類などとの比較のもとで、岩盤の力学定数やその分布が推定される。これに基づき、支保パターンの選定などが行われる。また、必要に応じて数値解析などによって適切な部材の選定が行われる場合もある。しかし、現実にはトンネルの計画線上のすべての岩盤に対して、地層の状態や力学定数などを特定することは困難である。また、岩盤にはクラックから断層に至るまで、大小さまざまな不連続面が存在し、トンネルのスケールにおける巨視的な意味での力学定数を正しく推定することは至難であると言わざるを得ない。設計時におけるこのような不確実性を補い、安定なトンネルを安全な施工によって建設する手法が、情報化施工である。一般的な情

報化施工では、設計時に求められた岩盤の変位量などをもとに、施工管理基準値を定めておき、計測される変位量などがこれを上回る場合には、支保パターンや部材などを見直す努力がなされる。

新たに支保パターンや部材を選定する際には、数値解析などを用いることとなるが、現在の計測結果をもたらしめている岩盤の力学定数や初期応力は、何らかの方法で推定する必要がある。これには、逆解析手法が適用される。その一例として、桜井¹⁾らは、初期応力と岩盤の巨視的なヤング率の比を計測結果より同定し、これをもとに数値解析を実施する方法を提案している。この手法は、トンネル掘削という応力変化に対する岩盤の応答を用いて岩盤の物性を求めるために、これが不連続面も含んだ巨視的な物性となっており、後の数値解析において非常に有用な情報となる。

桜井らの手法は、極めて効果的であるが、情報化施工をより高度化すると観点からは、幾つかの解決すべき課題がある。ここでいう高度化とは、より多くの情報を基に逆解析を実施することを意味しており、その課題とは、段階掘削など三次元的な構造変化を伴うような場合に適用しにくいこと、時間とともに剛性が変化するクリープ変形が生じているような場合に適用できないこと、岩盤の強度定数を推定することが難しいことなどである。

このような問題点が解決すれば、例えば切羽前方の変位や地表面沈下など、多くの情報を用いた逆解析が可能となる。また、非弾性的な挙動をしている領域の推定や地盤物性の経時的变化の推定などが可能となる。これらの結果、トンネル周辺の地山の状態をより多くの情報を基に監視することができることとなり、情報化施工の高度化に寄与すると考える。

筆者らは、有限要素法にカルマンフィルタを適用した逆解析手法によって、これらの問題を解決することを試みている。本報告では、研究開発の第1ステップとして、この逆解析手法の適用事例について述べる。以下に、適用工事の概要とカルマンフィルタを用いた手法の概略を述べるとともに、現場計測結果を用いた逆解析事例を示す。

2. 穂別トンネルの概要

穂別トンネルは、図-1に示すように道東自動車道(北海道横断自動車道)の夕張IC～十勝清水ICの間に位置しており、全長 $L=4,323\text{m}$ の山岳トンネル工事であり、西工事では西側の延長 $L=1,500\text{m}$ をNATMで掘進中である。概要について表-1にまとめる。

当該箇所の地質はメラングジュと呼ばれる岩石種の異なる岩体(泥岩、緑色岩、蛇紋岩)が複雑に関係した地質構造を呈しており、硬軟も様々である。また、工区境の土被りの大きい区間(土被り300m以上)において蛇紋岩の出現が想定されている。実際、先行して掘削の進む連絡坑では蛇紋岩が確認され、大きな変位が生じている。

したがって、本工事では膨張性地山(緑色岩、蛇紋岩、粘板岩)におけるトンネル構造の安定性を確保するため、断面形状、施工法(加背割り、断面閉合)、支保構造(支保パターン)、補助工法などに関して、数値解析によるシミュレーションをもとにトンネルの修正設計を実施することが計画されている。

本報告では、坑口より70mの泥岩区間における脆弱な地山において、収束状況が悪く大きな変位を生じた箇所を対象とする。本工事における検討の一連

の流れを図-2に示す。また、対象断面における計測結果は、4章の図-5に示す。本報告では、計測データを用いて本坑周辺地山の物性値を推定する逆解析、および逆解析により推定された岩盤物性値を用いた予測解析を実施した結果を示す。

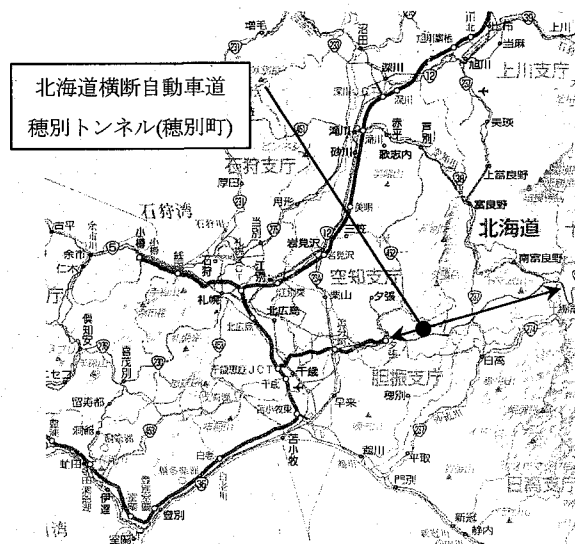


図-1 穂別トンネル位置

表-1 工事概要

工事名称	北海道横断自動車道 穂別トンネル西工事
工事場所	北海道勇払郡穂別町
工期	平成18年3月～平成21年3月
発注者	東日本高速道路㈱
施工者	鴻池・飛鳥特定建設共同企業体
工事内容	延長 $L=1,500\text{m}$ (道路土工 $L=12\text{m}$ 含む)
	断面 トンネル延長 $L=1,500\text{m}$ 掘削断面積 $A=85.0\text{m}^2$ (D1)
	施工法 NATM
	掘削方式 発破工法
	掘削工法 DIIIパターン(上半先進ベントカット工法) CII, DI, DII, EIパターン (補助ベント付き全断面工法)
補助工法	天端安定対策: 長尺鋼管 $\phi 76$ 「リング」(坑口) 注入式 $\phi 76$ 「リング」
	鏡面の安定対策: 長尺鏡 $\phi 76$ 外, 核残し
	脚部の安定対策: 脚部補強 $\phi 76$ 外, 仮インバート

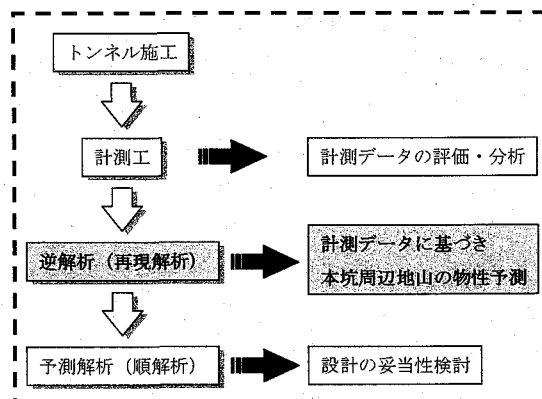


図-2 トンネル施工時における設計フロー

3. カルマンフィルタを用いた逆解析²⁾³⁾

本検討では、カルマンフィルタを適用した逆解析プログラム（解析コード：Geo-Inverse、(株)地層科学研究所）を用いて解析を実施した。最初にカルマンフィルタの概略について述べる。ここでは、カルマンフィルタに関する詳細については数多くの文献⁴⁾⁵⁾⁶⁾で紹介されていることから、その基本的な部分についてのみ触れることとする。

カルマンフィルタを用いた逆解析とは、未知数と観測値との関係を示した観測式により、最も適切と思われる未知数を求める手法である。すなわち、確率論に基づく逆解析の一手法である。また、カルマンフィルタの特徴としては、岩盤の変形挙動を計測した際に含まれる観測誤差を考慮できることや非適切⁶⁾な逆問題に対して有効な解析手法であるなどが挙げられる。

今、未知パラメータ x がある離散過程の状態方程式にしたがって変化している場合を考える。さらに、状態 $t-1$ から状態 t への遷移が線形変換で表わされるものとする、これは次式のように書ける。

$$x_t = \Phi_{t-1} x_{t-1} + \Gamma_{t-1} w_{t-1} \quad (1)$$

ここに、 Φ_{t-1} ：($n \times n$) 次元の線形系の状態遷移行列、 Γ_{t-1} ：既知の ($n \times r$) 次元の駆動行列、 w_{t-1} ：($r \times 1$) 次元のシステムノイズベクトルである。また、式(1)は状態方程式と呼ばれる。

次に、状態 t に移った後に観測値 z が与えられたとすると、次式のように書ける。

$$z_t = H_t x_t + v_t \quad (2)$$

ここに、 H_t ：観測行列、 v_t ：観測ノイズである。また、式(2)は観測方程式と呼ばれる。

本報告で対象としているトンネル変位を用いた逆解析の場合には、未知数 x は地盤のヤング率、観測値 z はトンネルの内空変位 u に相当する。したがって、この未知数と観測変位 u^* (変位ベクトル u の一部) との関係を図示すればよい。そこで、以下に示す有限要素法の剛性方程式について考える。

$$Ku = f \quad (3)$$

左辺の剛性行列 K に未知パラメータ x が含まれ、変位 u は観測変位 u^* とそれ以外の変位成分 $\tilde{u}$ とに分けられる。したがって、式(3)は、以下のように記述できる。

$$K(x) \begin{Bmatrix} \tilde{u} \\ u^* \end{Bmatrix} = f \quad (4)$$

式(3)を観測式に充当するために書き換えれば、次のような非線形関数となる。

$$u^* = h(x) \quad (5)$$

ただし、カルマンフィルタは、線形フィルタなのでこのままでは適用できない。したがって、観測式 $u^* = h(x)$ を推定値 $\hat{x}_{t-1/t-1}$ (添字の意味は、初めの時刻が推定値を得た時刻、後の時刻が観測値を得た時刻を表わす)のまわりで Taylor 展開して線形化する。このような方法は、一般に拡張カルマンフィルタと呼ばれる。

一方、状態方程式から求まる未知数 x がヤング率と定数であるため、状態 t によって変化しない。したがって、状態遷移行列は単位行列となる。また、この場合システムノイズは考慮しないのが一般的である。

以上のことから、カルマンフィルタについて適切な初期条件と、有限要素法について既知の境界条件の下で観測変位を入力すると、式(1)の状態方程式と式(2)の観測方程式からカルマンフィルタのアルゴリズムにより未知数(ヤング率)が同定できる。この逆解析のフローを、図-3 に示す。

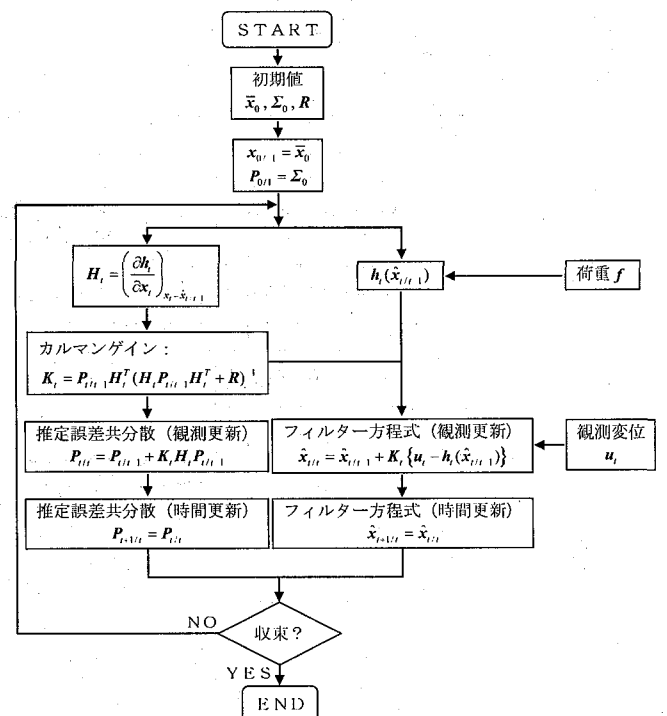


図-3 カルマンフィルタを適用した逆解析

4. 現場計測値を用いた解析事例

本章では、前章で述べたカルマンフィルタを用いて逆解析を実施し、岩盤物性値の同定を行う。すなわち、トンネル内空変位を観測値とし、トンネル周囲の岩盤のヤング率を同定する問題を解くことを試みる。

最後に、同定した物性値を用いて有限要素解析(予測解析)を実施し、逆解析により得られた物性値の妥当性について検証する。

4.1 逆解析の入力条件および解析条件

図-5 には、北海道横断自動車道穂別トンネル西工事の STA=629+23 で計測された内空変位の経時変化図を示す。経時変化の特徴としては、次のような点が挙げられる。上半掘削時の挙動として、天端/上半脚部沈下量のオーダーがほぼ同じである。また、それに対して内空変位量が小さいことから、共下がりの挙動が示されている。仮インバートによる早期閉合を実施しているため、下半脚部の沈下は抑制されていると判断できる。

図-4 に解析に用いた有限要素モデルを示す。現場計測結果からは、上半掘削時に共下がり現象がみられている。そこで、トンネル脚部付近に周囲とは別の物性をもつ層(層2)を仮定し、この部分の物性値も逆解析により求めることとした。

解析に用いる計測値を表-2 に示す。表-2 は、現場計測値と支保工を考慮しない場合の推定値を示している。支保工を考慮しない場合の推定値とは、先行変位を考慮して計測値を一定の割合で増加させ、支保工がない場合に計測されると推定される値を求めたものである。この値は事前の数値シミュレーション、ならびに過去の経験などから求めた。

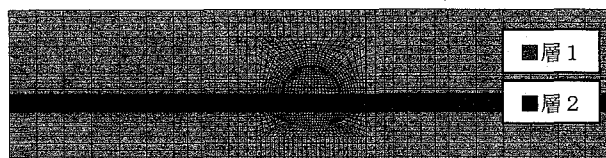


図-4 有限要素モデル

表-2 逆解析に用いる計測値

	測点	現場計測値 (mm)	支保工を考慮しない 場合の推定値(mm)	割増率
上半掘削	S1	-18.0	-25.7	0.7
	S2	-1.0	-1.4	0.7
	S3	-26.0	-37.1	0.7
	N1	-55.0	-78.6	0.7
	N2	-58.0	-82.9	0.7
	N3	-58.0	-82.9	0.7
下半掘削	S1	-31.7	-52.8	0.6
	S2	2.0	3.3	0.6
	S3	-37.2	-62.0	0.6
	N1	-101.4	-169.0	0.6
	N2	-89.8	-149.7	0.6
	N3	-110.2	-183.7	0.6
	N4	-5.1	-8.5	0.6
	N5	-14.3	-22.9	0.6

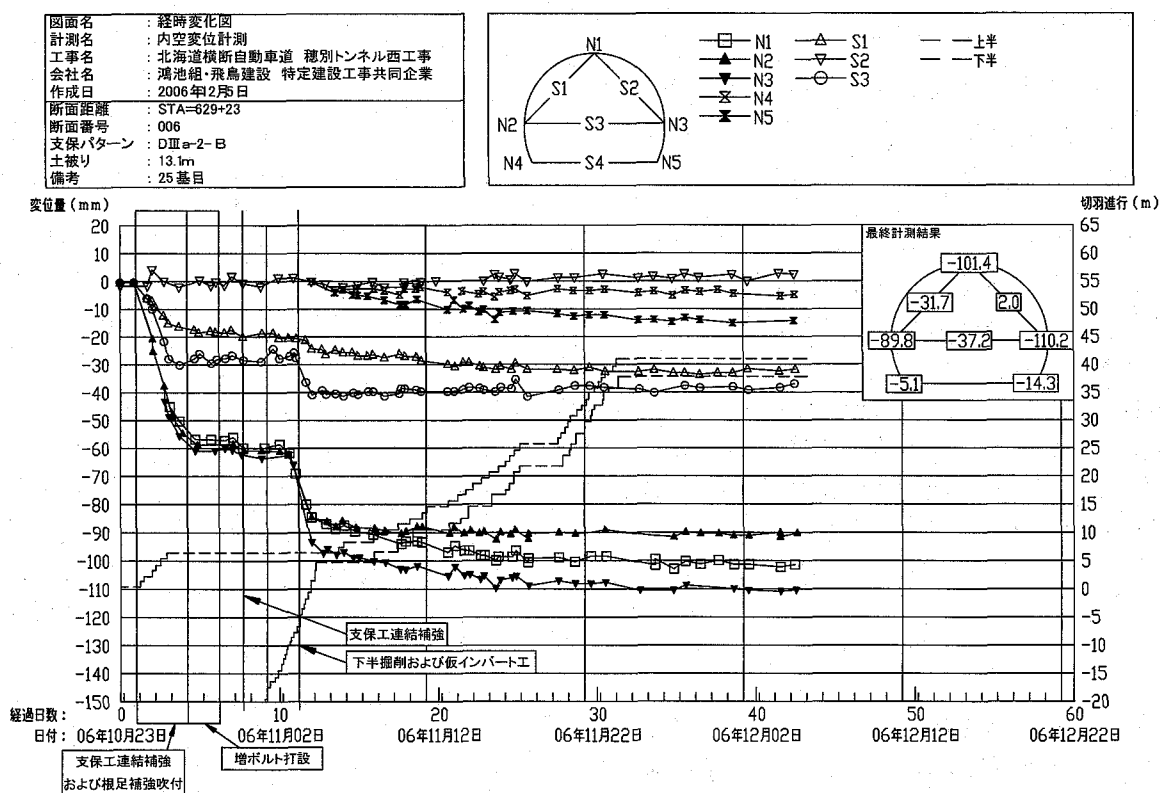
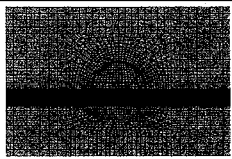
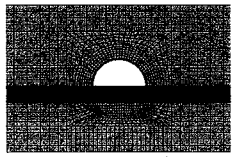
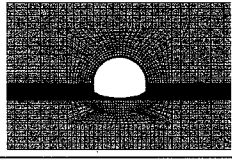


図-5 計測結果

表-3 逆解析に用いる物性値

分類	ポアソン比	単位体積重量(kN/m ³)
層1■	0.30	19.6
層2■	0.40	19.6

表-4 解析ステップと解析条件

ステップ	解析モデル	条 件
I		初期地盤内応力の設定
II		上半掘削および上半掘削時の計測値を入力
III		下半掘削および下半掘削時の計測値を入力

本解析では後者の支保を考慮しない場合の推定値を用い、支保工をモデル化せずに逆解析を実施した。

なお、逆解析を実施する上で岩盤のポアソン比および単位体積重量を仮定する必要がある。そこで一般値⁷⁾を参考に表-3のように設定した。

段階掘削の過程とその時の解析条件を表-4にまとめた。第Iステップでは、岩盤内に土被り13.1m相当の初期応力を与える。第IIステップでは上半を掘削し、掘削時の内空変位量および沈下量を観測値として入力する。同様に第IIIステップでは下半を掘削し、この時の観測値より岩盤の物性値を逆解析する。

4.2 逆解析結果と検討

表-5には、第Iステップの上半掘削時、および第IIステップの上半・下半掘削時における計測点の沈下量を示している。括弧で示した数値は現場計測値を意味している。表-6には、各計測点について計測値と逆解析値を比較したものを示す。これらの結果をみると、計測値と解析値との相違はみられるが、変形のモードとしては良好な結果が得られている。特に、トンネル脚部が沈下するといういわゆる共下がり現象が表現されている。これは、トンネル下部に設けた層で同定されたヤング率が、他の部分に比

べて低い値であることに起因している。また、計測結果と逆解析結果が良好な一致を示していることから、この部分に剛性の低い層が存在していたか、何らかの原因で下半部付近の岩盤の剛性が低下していた可能性が高いことがわかる。

また、下半掘削時までの変位を用いて求めた場合には、上半掘削時までの変位を用いて求めた場合に比べて岩盤の剛性は低く評価されている。このことから、下半部の掘削によって岩盤の変形が進行し、この結果、トンネルの周辺では岩盤の剛性が低下したと推測できる。

図-6は、逆解析によって得られた最大せん断ひずみ分布を示している。トンネル周辺部に比べて剛性の低い脚部付近の岩盤で大きなせん断ひずみが発生している。

予測解析では上半掘削時で推定されたヤング率を用いて予測解析を実施することとした。その結果を次節に示す。

表-5 計測点における沈下量と同定結果

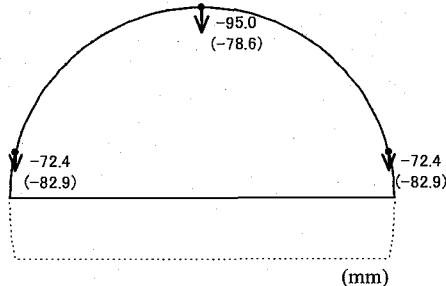
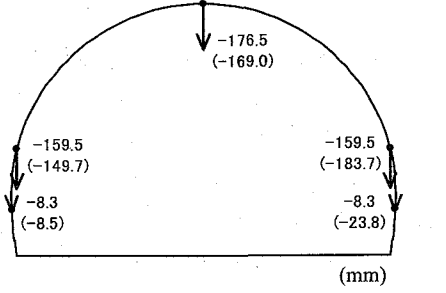
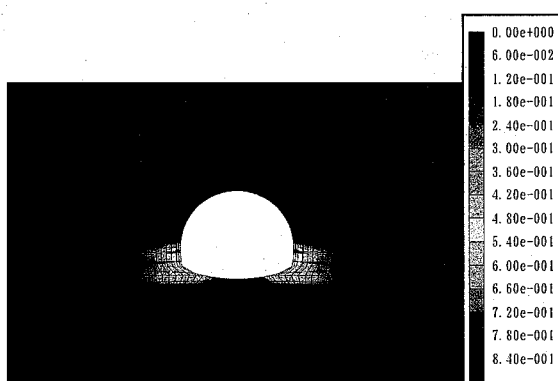
計測点における沈下量とヤング率推定結果	
上半掘削時	
	■層1 ヤング率 : 97.8 MPa
	■層2 ヤング率 : 2.6 MPa
下半掘削時	
	■層1 ヤング率 : 16.8 MPa
	■層2 ヤング率 : 0.3 MPa

表-6 解析ステップと解析条件

	計測値		逆解析値	
	第Ⅰステップ	第Ⅱステップ	第Ⅰステップ	第Ⅱステップ
S1	-25.7	-52.8	-20.9	-35.8
S2	-1.4	3.3	-20.9	-35.8
S3	-37.1	-62.0	-17.7	-64.3
N1	-78.6	-169.0	-95.0	-176.5
N2	-82.9	-149.7	-72.4	-159.5
N3	-82.9	-183.7	-72.4	-159.5
N4	-	-8.5	-	-8.3
N5	-	-23.8	-	-8.3

単位(mm)

図-6 最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ 分布

4.3 有限要素解析 (予測解析)

カルマンフィルタを用いた逆解析手法により同定されたヤング率を用いて、トンネル掘削時の予測解析を実施した。岩盤の物性値は前節で示したとおりであり、支保工の諸元については表-7 にまとめた。支保工の物性値は、一般値として資料⁸⁾を基に設定した。

表-7 支保工緒元

ロックボルト			鋼アーチ支保工		吹付け厚 (cm)
長さ (m)	周方 向(m)	延長 方向(m)	上半 (m)	下半 (m)	
4.0	1.2	1.0	H-200	H-200	25

予測解析では、吹付コンクリートおよび鋼製支保工をはり要素でモデル化し、実際の施工過程を考慮したシミュレーションを行った。その結果を表-8 および表-9 に示す。

表-8 および表-9 には、上半および下半掘削時における支保工を施工した際に計測された内空変位と沈下量、ならびに予測解析により算出された結果を示している。上半掘削時をみると、天端沈下量は計測値に比べ解析値が大きく、内空変位は解析値が小さい結果となっている。下半掘削時では、脚部沈下量は計測値におおむね一致しており、良好な解析結果

が得られた。上半部の沈下量および内空変位量についても、計測値と異なる点はあるものの、変形モードはおおむね一致する結果が得られた。これらのことから、逆解析により同定されたヤング率が妥当なものであると判断できる。

表-10 には、支保工の応力照査結果を示す。解析結果に基づけば、支保工に発生する応力は許容応力値を超えることはなくトンネル支保の安定性が検証された。

表-8 予測解析結果と変形(沈下)モード

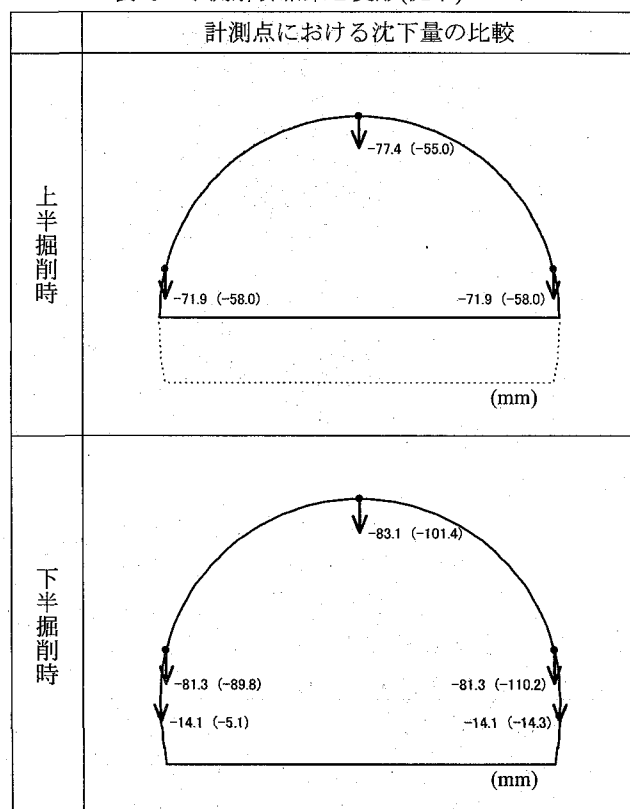


表-9 計測値と予測解析結果

	計測値	解析値		計測値	解析値
計測点	上半完了	上半完了	計測点	下半完了	下半完了
S1	-18.0	1.3	S1	-31.7	-5.5
S2	-1.0	1.3	S2	2.0	-5.5
S3	-26.0	-5.5	S3	-37.2	-16.8
N1	-55.0	-77.4	N1	-101.4	-83.1
N2	-58.0	-71.9	N2	-89.8	-81.3
N3	-58.0	-71.9	N3	-110.2	-81.3
N4	-	-	N4	-5.1	-14.1
N5	-	-	N5	-14.3	-14.1

単位(mm)

表-10 支保工の応力照査結果

施工過程	吹付けコンクリート		鋼製支保工		ロックボルト	
	応力 (MPa)	許容応力度 (MPa)	応力(MPa)	許容応力度 (MPa)	軸力(kN)	耐力(kN)
上半支保 建込	0.91	6.75	53.35	240	105.81	170
下半掘削	1.02		54.35		122.28	
下半支保 建込	1.22		144.31		163.18	
インバート掘削	1.27		225.41		164.40	

5. まとめ

本報告では、情報化施工の高度化に貢献することを目的とし、カルマンフィルタを適用した逆解析手法を用いて岩盤の剛性を同定する手法の開発を試みた。その適用事例として、坑口より70mの泥岩区間における脆弱な地山の断面を対象とした逆解析と、逆解析により求めた岩盤物性を用いた予測解析を行い、計測結果との比較をした。予測解析により得られたトンネル変形の値は、計測結果とおおむね一致しており、カルマンフィルタを用いた逆解析手法が妥当なものであることが示された。同時に、予測解析に基づき支保工の安定性を確認することができるなど、情報化施工の一助となることを示すことができた。

しかしながら、本報告で行った逆解析は2次元断面を対象としたものであり、次のステップとして3次元の掘削形状をモデル化した逆解析を試みたいと考えている。また、今回の逆解析では支保工をモデル化せず、支保工が無い場合の変位量を推定して実施している。支保工の効果を有限要素モデルで正しく表現し、逆解析を行うためには、支保工と岩盤の相互作用を正しく表現する必要がある。

今後は、適用事例を増やし、支保工効果の表現方法や三次元解析の適用方法を検討していき、情報化施工の高度化を図りたいと考える。

参考文献

- 1) 桜井春輔・竹内邦文：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，No.337，pp.137-145，1983.
- 2) 村上 章・鈴木 誠：講座「地盤工学における逆解析」8.盛土の施工管理，土と基礎，Vol.43，No.11，pp.73-79，1995.
- 3) 村上 章・長谷川高士：Kalman フィルター有限要素法による逆解析と観測点配置，土木学会論文集，第388号／Ⅲ-8，pp.227-235，1987.
- 4) 星谷 勝・斉藤悦郎：建設技術者のためのデータ解析と応用－カルマンフィルタを中心として－，pp.13-27，鹿島出版会，1991.
- 5) 登坂宣好・大西和榮・山本昌宏：逆問題の数理と解法－偏微分方程式の逆解析－，東京大学出版会，1999.
- 6) 村上 章・堀 宗朗・登坂宣好・鈴木 誠：有限要素法・境界要素法による逆問題解析－カルマンフィルタと等価介在物法の応用，コロナ社，2002.
- 7) 地盤工学会：設計用地盤定数の決め方－岩盤編－，2007.
- 8) 土木学会：2006 年制定 トンネル標準示方書 山岳工法・同解説，2006.