

# 複数の観測値を用いたデータ同化手法の導入による地下水情報化施工簡易システムの高度化

小木曾淳弥<sup>1\*</sup>・小山 倫史<sup>1</sup>・高橋 健二<sup>2</sup>・安田 亨<sup>3</sup>・大西 有三<sup>4</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-2)

<sup>2</sup>水文技術コンサルタント(株) (〒261-0004 千葉市美浜区高洲1丁目24-2)

<sup>3</sup>パシフィックコンサルタンツ(株) (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2丁目7番1号)

<sup>4</sup>京都大学理事 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

\*E-mail: kogiso@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

トンネル工事に関する地下水問題として、大量湧水に伴う切羽崩落や周辺水環境への影響などがある。これらのトンネル掘削に伴う地下水問題に対して、トンネル工事中の施工・計測データをモデルに反映させ、地下水挙動を予測する評価法としてSDA-SWING法が開発されている。SDA-SWING法は数値モデルを単位スライスボリュームで考え、湧水量を観測値としてデータ同化の処理を行い、透水係数を逐次更新する。本論文では、観測井から得られた地下水位を観測値として追加し、地下水位と湧水量の2種類の観測値よりデータ同化の処理を試みた。結果、同一スライス内に複数の透水係数を設定することで、地下水位の挙動(低下範囲)を制御することが可能になった。

**Key Words :** tunnel excavation, water inflow, SWING, data assimilation, observation well

## 1. はじめに

トンネル工事に関する地下水問題として、施工面では大量湧水に伴う切羽崩落やトンネル排水処理、および安全施工するための地下水対策工の検討などが挙げられる。また、周辺水環境面では、地下水排水に伴う周辺水環境へ影響、すなわち、トンネル掘削による地下水位低下が既存の水源に及ぼす影響が挙げられ、これらはトンネル工事に関わる重要な課題であり、トンネルルート周辺の自然環境や社会環境に与える影響を評価し、影響因子に対して保全対策が必要となる。特に、工事による周辺の影響範囲や保全対策について考えると、地下水に関する自然環境は、最も制御が困難なものの一つである。また、流域に及ぶ地下空間開発やトンネルなどの広域、大規模土木工事における環境保全対策を考える必要があり、地下水に対して局所的に対処するのではなく、流域水循環システムの一部として捉えた上で、その地下水挙動を明らかにする必要がある。

地下水流動の数値解析においては、地質調査などを基に水理地質モデルを作成し、有限要素法などの手法を用いて3次元の飽和-不飽和浸透流解析<sup>1)</sup>を実施してきた。その際、精度のよい地下水流動予測を行うためには、地

質情報を解析モデルに反映させることが必要である。しかし、水理地質モデルが複雑になればなるほどモデルの作成および解析そのものに多大な時間と労力を要する。また、地質調査の結果をもとに複雑な水理地質モデルを用いて解析を実施しても、必ずしも実際の地下水挙動と一致するとは限らず、岩盤の物性などの入力情報を充実させたとしても、完全に地下水挙動を予測することは困難である。また、複雑な解析モデルを用いた場合、トンネル施工中に現場で得られるトンネル湧水などの施工・計測データを解析モデルに反映させ、逆解析を実施することも困難である。

そこで、解析モデルを簡素化し、トンネル工事中の施工・計測データをモデルに反映することで地下水挙動を予測する評価法としてSWING法(System for Water Information of Ground)が開発された<sup>2)</sup>。有限要素法などの数値解析手法による、複雑な水理地質モデルを作成し、地下水挙動を解析する方法に対し、SWING法は簡素化された水理モデルを用いて解析することにより、施工中に得られる観測データを容易に解析モデルに反映させることができる。SWING法は、実際に計測項目であるトンネル湧水量を基に、短時間に予測と検証を繰り返しながら解析モデルの再構築を実施し、トンネル掘削に伴う地下水

挙動の予測の精度を向上させる解析法である。トンネル掘削に伴う地下水の解析に使用する式は、Bear<sup>3)</sup>、高橋の方法<sup>4)</sup>や大島の手法<sup>5)</sup>などがあり、SWING法ではBearの手法を導入している。Bearの方法は、降雨浸透量を考慮することができ、地下水問題を流域水循環システムの一部として捉えるのには適している。

SWING法は、坑口においてトンネル湧水量を観測し、この観測湧水量を再現するような透水係数を求める。このプロセスに逐次型データ同化手法の一つであるアンサンブル・カルマンフィルター (Ensemble Kalman Filter, EnKF)<sup>7,8)</sup>を導入したものがSDA(Sequential Data Assimilation)-SWING法<sup>9)</sup>である。本論文では、このSDA-SWING法に、新たな観測値として地下水位を加えることにより、坑口湧水量と地下水位の2種類の観測値を利用し、EnKFの処理を行うことを目指した。

解析では、実トンネルに基づいたテストデータを作成し、地下水位の低下・影響範囲の解析を実施し、地下水位の観測値に対するEnKFの導入前後の解析結果を比較し、検討を行った。

## 2. SWING法による水収支解析モデル<sup>2)</sup>

### (1) SWING法の概要

SWING法は、トンネル周辺の水環境保全やトンネル工事の地下水問題について、水循環系を踏まえ、簡易かつ実用的な範囲で予測精度を有する評価手法である。その特徴を以下にまとめる。

- 1) 湧水対策水量等の水量的な予測評価法であり、かつ工事実績が迅速にフィードバックできる解析法である。
- 2) 迅速かつ水循環系の要素であるトンネル湧水や表流水などの定量的な評価が可能な解析方法である。
- 3) 工事実績を基にした精度のあるトンネル湧水予測、および湧水予測評価することができ、この評価結果を基に工事中においても周辺水環境への具体的な保全対策を行うことが可能な解析方法である。

SWING法は、浸透流解析や修正タンクモデルなどに代表される地盤モデルを用いた数値解析法ではなく、実際のトンネル掘削により発生した湧水量を基に、モデルを逐次更新する準3次元解析である。解析では、簡素化された水理地質モデルが使用される(図-1)。掘削対象区間を図のような単位スライスボリュームに分割して考える。各々の単位スライスボリュームに地質調査より得られた水理定数、すなわち透水係数を与え、その透水係数を観測湧水量をもとに逐次更新する。

### (2) トンネル湧水量と地下水位低下範囲の算定<sup>2)</sup>

掘削に伴うトンネル湧水および地下水影響範囲の把握

のため、図-2に示すような1次元非定常流を考える。すなわち、水平不透水性基盤上の帯水層中に、地盤サイズに比べて十分小さい径のトンネルを設けたものと仮定する。初期水位 $H$ が一定である地下水位は、掘削後の経過時間とともにトンネル直上から徐々に低下する。この場合、地下水流は2次元非定常流であるが、SWING法ではDupuitの準一様流に置き換える。

図-2に示すとおり、降雨浸透量 $\varepsilon$ を伴う帯水層は初期 $t=0$ では地下水位は水平であると仮定すると、ある時刻 $t$ における地下水面はDupuitの準一様流の式(1)より求められる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{h(x,t)^2 - h_0^2}{(H_0^2 - h_0^2)} &= \frac{x}{R(t)} \\ q(t) &= k \frac{(H_0^2 - h_0^2)}{2R(t)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、

- $\varepsilon$  : 降雨浸透量
- $k$  : 地盤の透水係数
- $h(x,t)$  : 任意地点の地下水位
- $H_0$  : 地下水頭
- $h_0$  : 不透水層とトンネル下部との距離
- $q(t)$  : 単位スライスボリュームあたりの湧水量
- $R(t)$  : 地下水位低下区間長である。

SWING法における単位スライスボリュームとは、トンネル掘削区間を等間隔の距離で分割したものである。

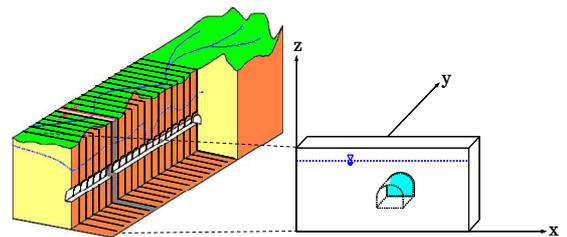


図-1 単位スライスボリューム

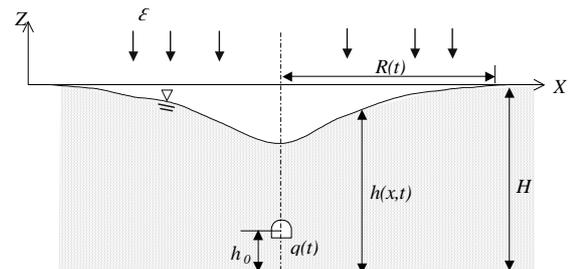


図-2 トンネル湧水に伴う地下水の流れ

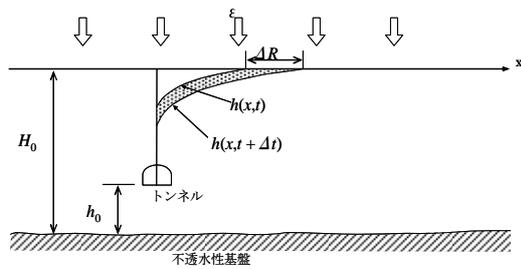


図-3 トンネル湧水量の算定方法

その各スライスに対して式(1)を用いてトンネル湧水量の計算を行う(図-3)。そして、トンネル掘削の進行に伴い、スライスボリュームを累積し、解析もスライスボリュームを累積しながら行う。

時刻 $t$ から $t+dt$ に時間が $d$ 経過すると、影響範囲も $R$ から $R+dR$ と変化する。水収支を考慮すると、トンネル湧水量は $d$ 期間中に減少した帯水層中の水量に、表層から浸透した $\epsilon$ を加えたものに等しい。すなわち、式(2)のように表現できる<sup>3)</sup>。

$$q(t)dt = k \frac{(H_0^2 - h_0^2)}{2R(t)} dt = \lambda_e \frac{(H_0 - h_0)}{3} dR + \epsilon R(t) dt \quad (2)$$

ここに、 $\lambda_e$ ：有効間隙率  $\epsilon$ ：降雨浸透量である。

式(2)はベルヌーイ方程式であり、初期値は $t=0$ ,  $R=0$ である。式(2)を時間 $t$ で積分し、 $t \rightarrow \infty$ ,  $R \rightarrow \infty$ とすると、次式ようになる。

$$R(t)_\infty = \left[ \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{2\epsilon} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

すなわち、経時変化を考慮したトンネル湧水量 $q(t)$ は、式(4)に示すとおりであり、1つのスライスボリュームの単位長さあたりの湧水量が得られる。式(4)を用いることにより、全てのスライスに対して、湧水量および地下水位の低下範囲を以下のように計算できる。

$$q(t) = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{2R(t)} = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{2 \left[ \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{2\epsilon} \left\{ 1 - e^{-\frac{6\epsilon t}{\lambda_e(H_0 - h_0)}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

以上の水理公式を用いて、各スライスに対して解析を行っていく。掘削を開始すると、事前の地質調査などから得られたスライスごとの透水係数を基に、各スライスにおいてトンネルに流入する湧水量を推定する。掘削されたスライスボリュームからの湧水量の合計は、トンネル坑口からの流出量とする。なお、水収支状態を考える上で、地表からの降雨浸透量を考えることも重要である。なおSWING法における、降雨浸透量は地表部における限界貯留高、およびホートン流出を再現した1次元タンクモデルを適用し、降雨量に応じた降雨浸透率を採用する。

### 3. SDA-SWING法における観測井の考え方

ここでは、坑口湧水量及び地下水位情報を取得した際に、データ同化手法の1つであるアンサンブル・カルマンフィルター (Ensemble Kalman Filter, EnKF) を用いて、モデルの再構築を行うSDA-SWING法を紹介する。ここで、モデルの再構築とは、単位スライスボリュームに与えられた透水係数の値を最適化することである。観測値として地下水位を追加した場合の解析フローを図-4に示す。解析は工事開始から工事終了までを一日単位で行い、掘削進捗状況に合わせて、解析対象スライスにおける湧水量・地下水位低下量を予測する。

- Step-1: 湧水量の観測値がある: Step-2, ない: Step-4.
- Step-2: 観測された湧水量を基に、EnKFによる処理を実施する<sup>9)</sup>。
- Step-3: モデルに入力されていた透水係数を、EnKFの処理によって更新された透水係数に更新する。
- Step-4: モデルに入力されている透水係数を使用し、湧水量・地下水位の影響範囲を計算する。

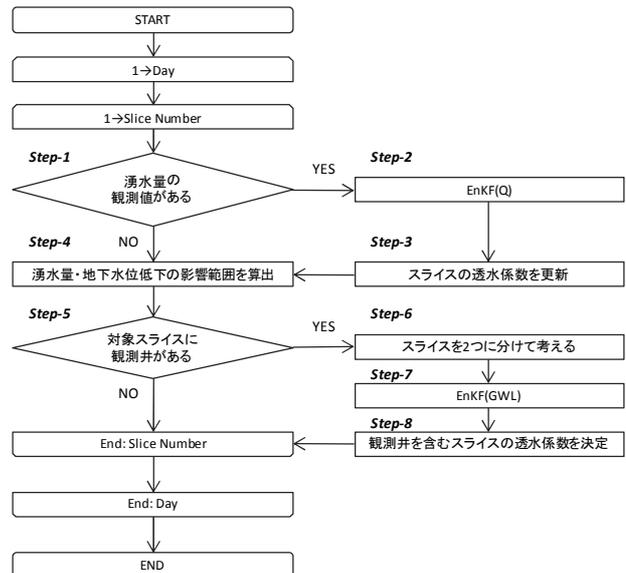


図-4 SDA-SWING法の解析フロー

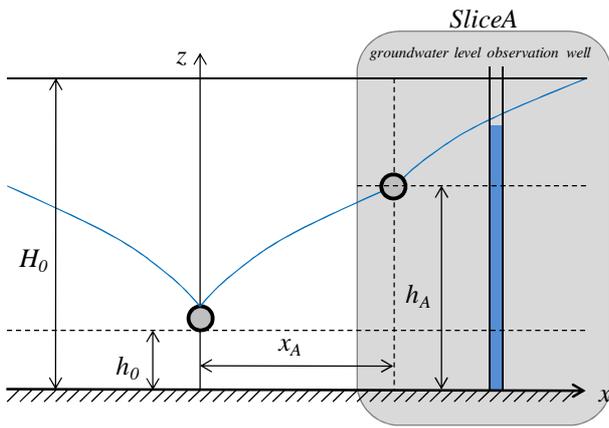


図-5 スライスの分割

- Step-5: 解析対象のスライス内に観測井がある: Step-6.
- Step-6: 解析対象となっているスライスを分割し, 観測井を含むスライスに新たに透水係数を与える.
- Step-7: 観測された地下水位を基に, EnKFによる処理を実施する.
- Step-8: 分割されたスライスの内, 観測井が含まれる方の透水係数を更新する.

地下水位のデータ同化を行う場合には, スライスを図-5のように分割して考える. これは, 湧水量を基にして算出した透水係数と地下水位を基に算出したそれとでは, モデルを単純化するために単位スライスボリュームを使用しているため, 必ずしも値が一致しないためである. 湧水量を基に算出した透水係数は, 解析対象スライスの代表となる透水係数として保ち, 地下水位の観測情報による更新は行わない. 地下水位によるEnKFの処理は, 図に示すようにスライスを分割したうちの, 観測井が含まれるSliceAに対して行う. スライスを分割するx方向の距離は, 地質図を参考にするなどして, 任意の地点を与える. 式(1)より, その任意の点における地下水位が求まり, その地下水位を $h_A$ とする. SliceAでは,  $h_0$ を $h_A$ に変更し, 通常のスライス解析と同様に, 地下水位低下の影響範囲の計算を行う.

#### 4. 地下水位低下の影響範囲の解析

本章では, SDA-SWING法において, 観測井から得られた地下水位情報を使用してEnKFの処理を行うことにより, 地下水位の低下範囲が制御できることを示す. トンネル掘削に伴う, 低下範囲の解析を, トンネル工事を基にしたテストデータを作成して行った.

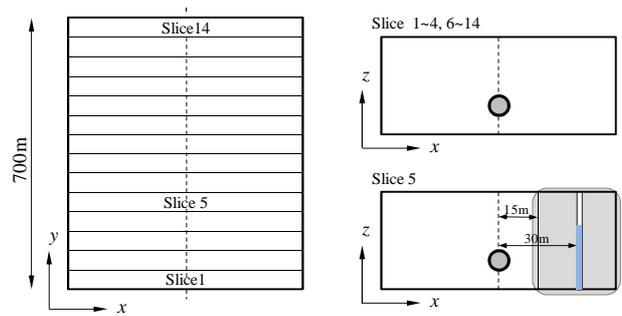


図-6 解析モデルの概要  
(左) 平面図 (右) スライスの断面図

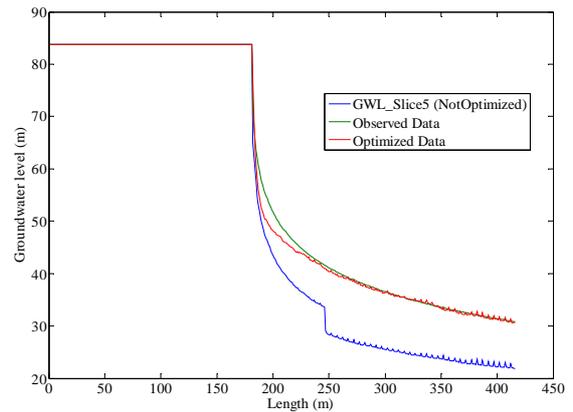


図-7 地下水位の観測井データと最適化後の値

#### (1) 解析モデルの概要と観測井データ

解析対象としたトンネルは, 延長700m, 平均地下水位140m, 平均透水係数 $3.0 \times 10^{-6}$  m/s, 工期は416日に設定した. 単位スライスボリュームの設定は, スライス長50m, 合計14つのスライスとした. 観測井はトンネル掘削進行方向に220m (スライス5), 進行方向に垂直(x方向)に30m, スライスの分割線はx方向に15m地点に設定した (図-6). 湧水量の観測頻度は5日毎で, 地下水位の観測頻度は毎日とした.

地下水位の観測データは, 観測井の設定が無い状態における地下水位低下量の時系列データを算出し (図-7のGWL\_Slice5), そのデータを基にして観測井から得られる地下水位データを作成した (図-7のObserved DATA).

#### (2) 解析結果

スライス5の観測井の位置における, 地下水位の時系列推移を図-7(Optimized DATA)に示す. 図より, 観測井のデータに近似する解析結果が得られていることがわかる. 次に, スライス5全体の, 地下水位の時系列推移を図-8に示す. スライスを分割した効果を確認するために, 観測井を設定していない解析結果を図-8(上)に, 観測井がある解析結果を図-8(下)に示す. スライス5は, 掘削

進捗が、トンネル進行方向201mに達した時点から解析対象となり、181日目以降がそれにあたる。そのため、181日目までの地下水位推移は無く、地下水面は一定となっている（SWINGではトンネル進行方向における地下水位の連続性を考慮しないため）。解析対象になると、地下水位が時系列に伴って低下している様子がわかる。2つの図を比較してわかるように、観測井を設定している方では、分割線(Length=15m)を境に、地下水位の挙動が変化していることがわかる。また、それに伴い、影響範囲も変化していることがわかる。

これらの結果から、観測井を設けることにより、地下水位の実測データを基に、地下水位の挙動をコントロールすることが可能であると言える。

## 5. まとめ

本研究では、SDA-SWING法におけるデータ同化(EnKF)による処理プロセスを湧水量に加え、地下水位に対しても行った。従来の湧水量のみによるEnKFの処理では、スライス全体の透水性を1つの透水係数で表しており、湧水量に重点を置いた透水係数を算出していた。それに対し、今回のケースにおいては、地下水位の低下量にも着目した透水係数も算出した。スライスを分割し、観測井から得られる地下水位の情報によるEnKFの処理を追加することによって、従来の地下水位の低下範囲の予測よりも、地下水位の挙動をコントロールすることが可能なシステムになったと言える。

SDA-SWING法は、現場での適用を考えて開発されており、現場において湧水量予測を逐次・迅速に行うことができる。これにより湧水対策時における、迅速な意思決定の判断材料になると考えられる。ただし、地下水位の情報を考慮することが可能でも、スライスを大雑把に分割したに過ぎず、地下水挙動のモデルを簡潔化しているため、厳密な湧水量・地下水位の影響範囲の予測解析を実施する場合には3次元地下水解析が必要であると考えられる。

また、今回の解析ではテストデータを使用しているため、実際に観測井のあるトンネル工事実績に基づいた解析を、リアルタイムで行うことにより、地下水位のデータ同化を加えたSDA-SWING法の有効性を実証する必要がある。

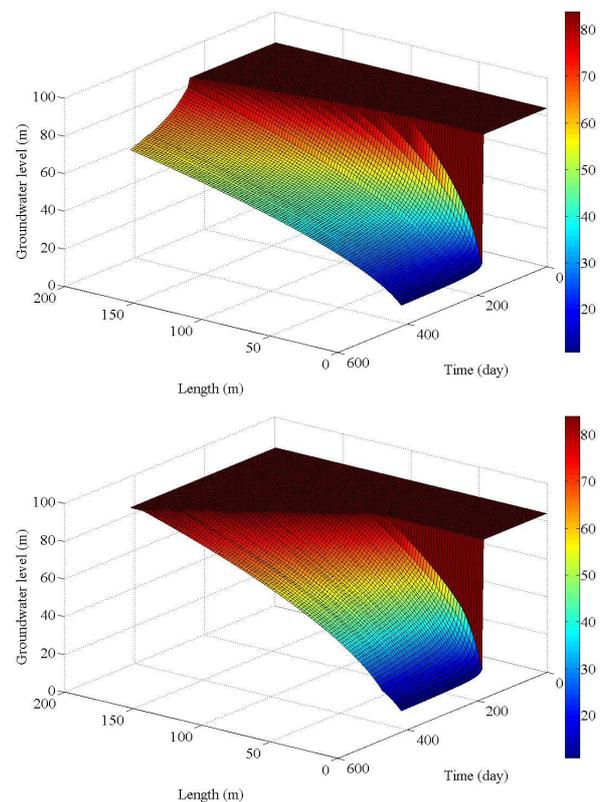


図-8 地下水推移の解析結果  
(上)観測井なし(下)観測井あり

## 参考文献

- 1) 赤井 浩一,大西 有三,西垣 誠：有限要素法による飽和－不飽和浸透流の解析,土木学会論文集, No.264, pp87-96,1997.
- 2) 高橋健二, 大西有三, 安田 亨, 熊 俊：山岳トンネルの地下水情報化施工簡易システム(SWING)の構築, 土木学会 地下空間シンポジウム論文・報告集, vol.13, pp.147-150, 2008.
- 3) Jacob Bear: *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Dover Publications, pp.420-422, 1988.
- 4) 高橋彦治：湧水と地圧, 山海堂, pp.33-47, 1963.
- 5) 大島洋志：トンネル掘削に伴う湧水とそれに伴う水収支変化に関する水文地質学的研究, 鉄研報告, NO.1228, 1983.
- 6) 大島洋志, 西森紳一：トンネル工事を対象とした水文調査法の研究, 鉄研報告, No.1108, 1979.
- 7) Christopher K Wikle, L.Mark Berliner: *A bayesian tutorial for data assimilation*, Physica D,230, 1-16.
- 8) 淡路敏之, 蒲池政文, 池田元美, 石川洋一：データ同化－観測・実験とモデルを融合するイノベーション, 京都大学学術出版会, pp. 63-92.
- 9) 小木曾淳弥, 小山倫史, 高橋健二, 安田亨, 大西有三. 逐次型データ同化手法を用いた地下水情報化施工簡易システム (SWING) の開発. 土木学会論文集 F1, Vol.66, No.1, pp.9-15, 2010.

# IMPROVEMENT OF SWING METHOD WITH SEQUENTIAL DATA ASSIMILATION USING TWO TYPES OF OBSERVED DATA

Junya KOGISO, Tomofumi KOYAMA, Kenji TAKAHASHI, Toru YASUDA  
and Yuzo OHNISHI

To control the groundwater inflow during tunnel excavation is one of the key issues. However, the 3-D models for FEM cannot be used for the back calculation using observed data such as tunnel inflow. The SDA-SWING method was developed to predict the groundwater flow quickly by back calculation using simple models and Ensemble Kalman Filter (EnKF). This system optimizes the parameter using a kind of the groundwater inflow data. In this paper, to improve this system, the EnKF process is using observed groundwater level data in addition to the groundwater inflow. The improved SDA-SWING method is applied to a virtual tunnel construction and simulates the lowering groundwater level.