

# 一次元井戸公式を準用したトンネル湧水量予測 手法におけるEnKFの実装について

森 守正<sup>1\*</sup>・久保田 恭行<sup>2</sup>・安田 亨<sup>3</sup>・西山 哲<sup>4</sup>

<sup>1</sup>株式会社竹中土木 技術・生産本部 技術部 (〒136-8570 東京都江東区新砂一丁目1-1)

<sup>2</sup>岡山大学 環境理工学部 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島一丁目1-1)

<sup>3</sup>パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒136-8570 東京都江東区新砂一丁目1-1)

<sup>4</sup>岡山大学大学院 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島一丁目1-1)

\*E-mail: mori-mo@takenaka-doboku.co.jp

**Key Words :** tunnel excavation, ground water, SWING, SDA-SWING, EnKF,

## 1. 目的

山岳トンネル工事における地下水流出問題への予測手法としては、これまでに様々な取り組みがなされてきたが、一般的に地下水の流れは水文学的、水理学的、および地質学的立場によって考察されるべきものであり、非常に複雑なものである。従って、一概に論ずるのが難しい問題とされている。また、工事中に得られた坑口湧水量や周辺井戸の水位などの観測情報を反映するような逆解析的手法を用いる場合、計算時間等を考慮するとモデルは出来る限り簡素化するのが望ましい。

そこで、一次元井戸公式を準用した山岳トンネル掘削時の湧水量予測法としてSWING法<sup>1)</sup>が開発された。この手法はトンネルを縦断方向にスライス分割したうえで、各横断面方向ごとに集水範囲およびトンネル湧水量を算出している。ただし、井戸公式においてはDupuitの準一様流近似に準拠して計算を行っており、横断方向のみの流れを考慮しているため、実現象と比較した場合、計算結果については鉛直方向や奥行方向を考慮していないことに起因する誤差が存在する。そこで小木曾らは、観測値を基に誤差が最小となるようにモデルを補正するため、逐次型データ同化手法 (SDA : Sequential Data Assimilation) の一種であるアンサンブルカルマンフィルター(Ensemble Kalman Filter, 以下EnKFと称する)を取り入れたSDA-SWING法<sup>2)</sup>を提案している。本研究では、解析結果のうち坑口湧水量に着目し、最初にSWING法と三次元浸透流解析の比較検証を行ったうえで、三次元浸透流解析で得られた値を正值と見なしたモデルに対してSDA-SWING法によるデータ同化を実施し、流れの次元に起因する誤差に対するEnKFの挙動および将来予測精度を確認する。

## 2. 解析手法

### (1) SWING法概要

SWING法の詳細については、参考文献<sup>1) 2)</sup>をご参照いただきたい。概略を述べると、対象トンネルを縦断方向に10-25m程度に区分し、この単位スライスの湧水量および水位低下範囲を一次元井戸公式から求める。そして、単位スライスの湧水量を図-1に示すように縦断方向に足し合わせることで、トンネル掘削に伴う坑口湧水量を算出する手法である。各スライスには土質定数が定められており、これを最適化することで掘削方向のトンネル湧水量および周辺影響の将来予測を行う。

### (2) データ同化手法を組み込んだSDA-SWING法

SDA-SWING法におけるEnKFの実装方法を以下に示す。データ同化では、状態変数ベクトル  $x_t$  に関するシステムモデルと観測変数ベクトル  $y_t$  に関する観測モデルを連立させた式(3)、(4)に示すモデルを考える。

・システムモデル

$$x_t = \begin{Bmatrix} K_t \\ \lambda_{et} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} v_t^{K_t} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{※} K_t = \ln(k_t) \quad (3)$$

$v_t \sim N(0, 1)$  : システムノイズ,  $k_t$  : 透水係数,  
 $\lambda_{et}$  : 間隙率

・観測モデル

$$y_t = h_t(x_t) + w_t = \sum q_t(x_t) + w_t \quad (4)$$

$w_t \sim N(0, 0.001)$  : 観測ノイズ,  $q_t$  : スライス湧水量  
 $h_t$  : 観測演算子 (状態方程式=井戸公式)

上記モデルに対し、観測値が与えられた段階でモデルを更新し、その上で最尤法により状態変数の同定および

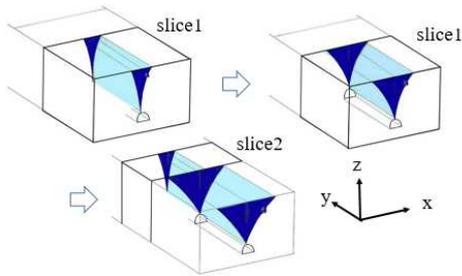


図-1 単位スライスボリュームの累積手順

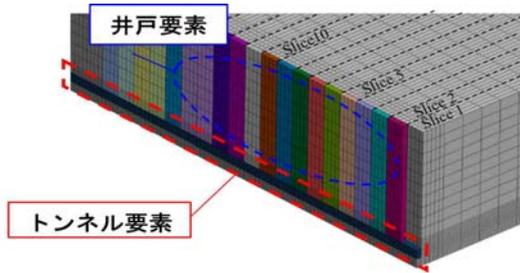


図-2 三次元FEM解析モデル

表-1 模擬トンネル物性値

項目	物性値
スライス間隔(m)	20
平均透水係数 $k$ (m/s)	$5 \times 10^7$
平均有効間隙率 $e$	0.1
平均降雨浸透量 $\epsilon$	$5 \times 10^8$
平均地下水頭 (m)	150
不透水性基盤からトンネル下部間の距離(m)	10
掘削進捗(m/day)	2

将来予測を行う。これを観測結果が得られる度に繰り返すことで解析モデルの精度向上を図る。なお、同定する状態変数は掘削中のスライスにおける透水係数のみであり、次のスライスに移行した時点で一定値となる。

### (3) 三次元浸透流解析

三次元浸透流解析は、SWING法の再現のため、図-2に示すように掘削進捗に伴いスライス毎にトンネル上部に井戸が設置されていくモデルとした。スライス湧水量は、井戸側面全体から得られる節点流量を合計して算出した。

## 3. 解析結果

表-1に示す模擬トンネル（地質条件一定、平面方向に奥行無限延長）を対象に、三手法による坑口湧水量の解析を行った。解析結果を図-3,4に示す。SWING法と三次元浸透流解析との間には流れの次元に起因する誤差が生じるので、計算結果には差異が生じるが、EnKFを導入することにより、図-5に示すように透水係数を強制的に同定することで湧水量を合致させる。しかし、将来予測においては、この誤差に起因する差異が生じる。

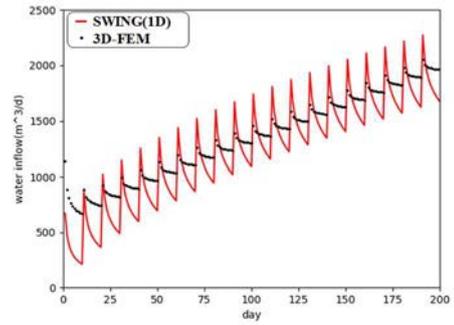


図-3 SWING法と三次元浸透流解析との比較

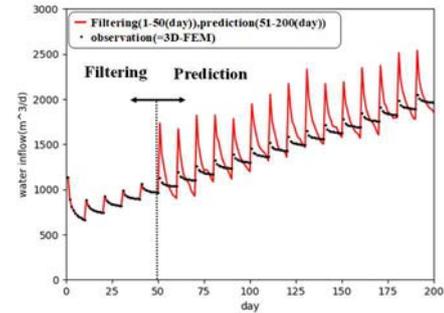


図-4 SDA-SWING法によるデータ同化および将来予測例

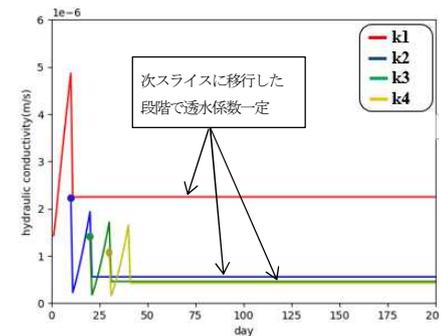


図-5 SDA-SWING法におけるslice1-4の透水係数の遷移

## 4. まとめ

模擬トンネルを対象にSWING法、SDA-SWING法、三次元浸透流解析による比較検討を行った。その結果、EnKFの処理に関わらず流れの次元に起因する差異が生じることが判明した。そのため、SWING法においてこの誤差を補正する必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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 (トンネル工学) 特集号, Vol.66, No.1, pp.9-15, 2012.pp.147-150, 2008.