

京都大学工学部	学生員	○小木曾淳弥
京都大学大学院工学研究科	正会員	小山 倫史
水文技術コンサルタト (株)	正会員	高橋 健二
京都大学大学院工学研究科	正会員	西山 哲
京都大学理事	正会員	大西 有三

1. はじめに

トンネル工事に関する地下水問題は、施工面では大量湧水に伴う切羽崩落防止やトンネル排水の処理および安全施工するための地下水対策工の必要性などが課題である。既往の 3 次元地下水解析はある程度の地質情報を反映した地盤モデルの作成が必要であり、モデル作成および解析に多大な時間と労力を要する。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。従来の SWING 法においては、坑口においてトンネル湧水量を観測し、観測湧水量に合致するような透水係数を試行錯誤的に決定していた。本研究では、SWING 法において観測湧水量から逆解析的に透水係数を決定するプロセスに逐次型データ同化手法として EnKF (Ensemble Kalman Filter)を導入した。本論文では新たに構築したシステムを SDA (Sequential Data Assimilation)-SWING 法と呼ぶことにする。SDA-SWING 法により実トンネルにおける解析を実施し、その妥当性を評価した。

2. SDA-SWING 法

SWING 法は、浸透流解析や修正タンクモデル等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。単位スライスボリュームに与えた水理定数である透水係数を最適化することで、トンネル湧水量の将来予測計算を行う地下水解析方法である。トンネル湧水量の算出には Dupuit の準一様流解析に基づく式および井戸公式を用いる。湧水量は次式より求められる (図-1)。

$$q(t) = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{2 \left[\frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{2\varepsilon} \left\{ 1 - e^{-6\alpha / \lambda \varepsilon (H_0 - h_0)} \right\} \right]^{1/2}} \quad (1)$$

ここに、 k : 地盤の透水係数、 h : 地下水位、 h_0 : 不透水性基盤からトンネル底盤までの距離、 H_0 : 初期地下水位、 q : 単位スライスボリュームのトンネル湧水量、 L : 単位スライスボリューム内で発生する地下水位低下区間である。

EnKF はデータ同化手法の一つであり、観測値と予測値から解析値を求める手法である。状態量を表わすスライスに与えられた透水係数から算出した湧水量を

予測湧水量とし、この予測湧水量と同時刻の観測湧水量から EnKF の処理を行い、解析湧水量を計算する。この解析湧水量から透水係数を求め、各スライスの透水係数を最適化された透水係数に置き換える (図-2)。

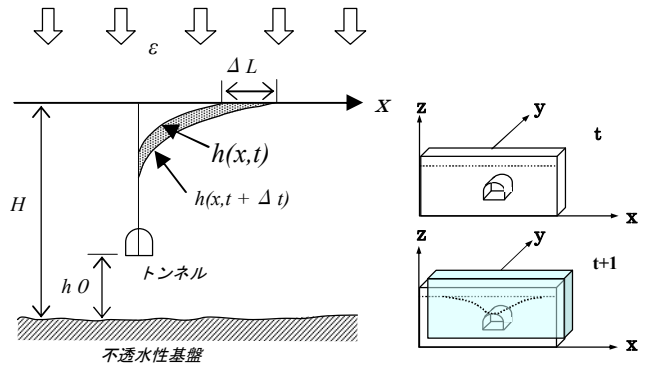


図-1 トンネル湧水量の算定方法

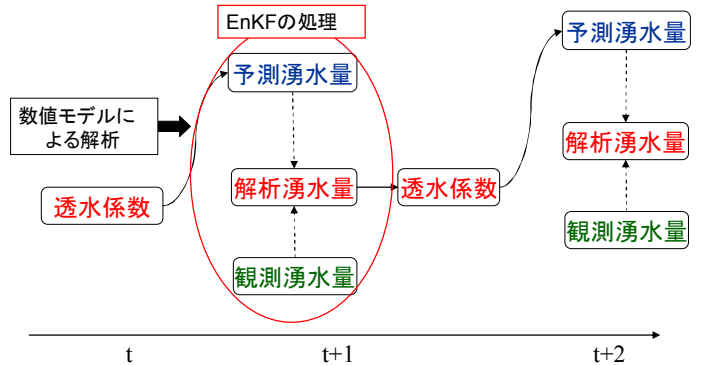


図-2 データ同化手法による透水係数最適化手順

3. 実トンネルにおける SDA-SWING 法の適用

トンネル湧水量の事後検証を千葉県南房総にある実トンネル工事の実績データを用いて行った。このトンネルは丘陵地帯に位置し、丘陵標高は 70~120m 程度、土かぶりは 50~70m 程度、崖錐堆積物、千倉層群に施工された。このトンネル工事の実績データを基に従来の SWING 法および SDA-SWING 法で湧水量予測の解析を実施し、解析結果を図-3 に示す。比較のため、SWING 法による解析は初期透水係数を $10 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ に統一し、最適化を行わない (Not optimized) と、試行錯誤的に最適化を行った (SWING) の 2 種類を実施した。このうち、SWING の解析結果は実際に生じたトンネル湧水量として、SDA-SWING 法と比較した。なお、SWING 法ではスライスボリュームごとに切羽湧水量を加算するため、鋸歯状の変動が認められる。

Not optimized と比べ、従来の SWING 法と SDA-SWING 法は観測値に合致するような結果になっている。104 日の観測湧水量の時点の解析結果に SWING 法と SDA-SWING 法には大きな相違がある。SWING 法は観測湧水量から試行錯誤的に観測湧水量に見合う透水係数を算出しているため観測値によく合致している。これに対して SDA-SWING 法では最適化前の初期透水係数を $10 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ に統一して解析を行っており、そこから自動的に EnKF の処理によって透水係数の最適化がなされているため、追従しきれていないが、湧水量の増加傾向は十分表現できており、観測湧水量を得ることにより予測精度が向上しているのがわかる。なお、トンネル湧水量の急激な変化については、初期透水係数を地質調査から得られた情報を考慮し、各スライスに与えることにより、湧水量予測精度が向上することがわかっているが、その結果については紙面の都合上省略する。

次に、SDA-SWING 法の解析で使用した初期透水係数の変化の様子を図-4 に示す。横軸は工事経過日数、縦軸が透水係数の値である。各線は各スライスに与えた初期透水係数であり、 $10 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ に統一した。本

図より、工事の経過に伴い透水係数が変化しており、観測湧水量が得られるごとに、EnKF の処理がなされ、透水係数が最適化されていることを意味する。

4. まとめ

本研究では、SWING 法という地下水挙動解析ツールにデータ同化手法を組み込み SDA-SWING 法を開発した。これにより従来、SWING 法において試行錯誤的に透水係数を最適化していたものを、EnKF を導入することにより自動化し、汎用性が向上した。そして、新たに開発した SDA-SWING 法を用いて、実トンネルにおきて解析を実施し、その実用性を示した。SDA-SWING 法は現場での地下水情報化施工の手法として非常に有益であると言える。

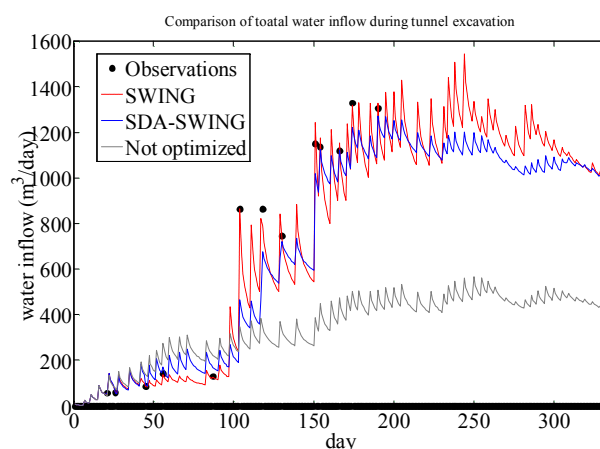


図-3 湧水量予測

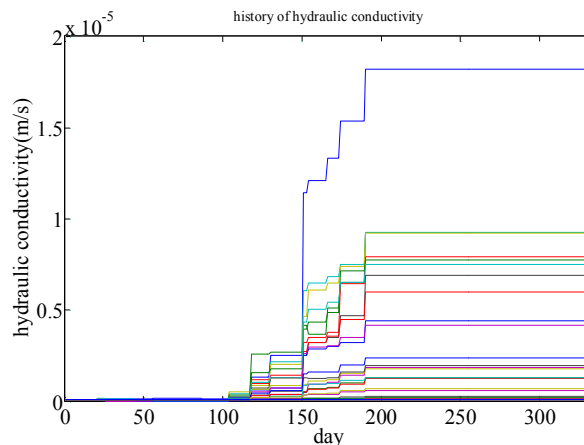


図-4 透水係数の最適化

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) 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, pp63-92