

逐次型データ同化手法を用いた SWING 法の開発および実トンネルへの適用

京都大学大学院工学研究科	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
西松建設(株)	正会員	平野 享
水文技術コンサルタト(株)	正会員	高橋 健二
京都大学	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として、大量湧水による切羽崩落やトンネル排水処理が挙げられる。止水などの対策工の必要性を判断するために、現場では迅速かつ正確な湧水量予測が求められている。一方、既往の3次元地下水解析はある程度精度の高い水理地質モデルが必要なため時間と労力を要し、また、複雑なモデルに起因して逆解析の実施は困難なことが多い。ゆえに必ずしも工事に有効な解析手法ではなかった。そこで、簡素化したモデルを用いて逆解析を可能とし、工事で得られた湧水量を反映させた地下水挙動の予測評価法として、SWING (System for Water INformation of Ground) 法が開発されている。従来、SWING 法においては、坑口でのトンネル湧水量を観測し、これに合致するような透水係数を試行錯誤より決定していた。この透水係数を決定するプロセスに逐次型データ同化手法 (SDA; Sequential Data Assimilation)として EnKF (Ensemble Kalman Filter)を導入した SDA-SWING 法を新たに開発した。本報告は、この SDA-SWING 法を実トンネルで取得した湧水記録に適用し、解析パラメータや観測湧水量の情報が与える影響について検討したものである。

2. SDA-SWING 法

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。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)。

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

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、 λ : 有効間隙率、 ε : 降雨浸透量、 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)。

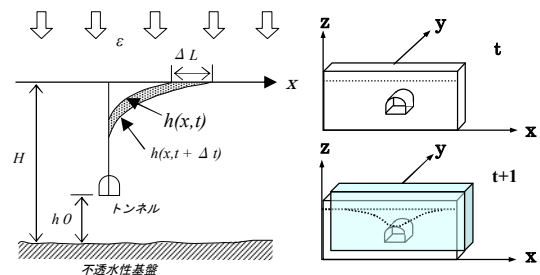


図-1 トンネル湧水量の算定方法

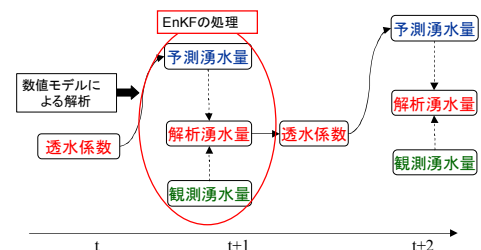


図-2 データ同化手法による透水係数最適化手順

キーワード SWING 法, データ同化, 地下水, トンネル掘削, 情報化施工

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, C1-2 棟 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 TEL:075-383-3306

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。既に、従来の SWING 法を用いた解析は実施されており、本論文では新たに開発した SDA-SWING 法を用いて解析を実施した。今回の解析は、①各スライスに与える初期透水係数（事前の地質情報）が解析結果に及ぼす影響、②観測湧水量の情報を得る頻度が、将来の湧水量予測に与える影響、この 2 点について検討を行った。

①の検討を実施するにあたり、各スライスに初期透水係数として $10 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ を与えたモデルと、18 番目のスライスのみ初期透水係数として $300 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ を与えたモデルの解析を実施し、両者の結果を比較した（図-3）。なお、スライス 18 に与えた透水係数は従来の SWING 法で試行錯誤的に得られた値を使用した。横軸は工事経過日数、縦軸が湧水量である。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。本図より、スライス 18 に相当する範囲のみに解析結果の相違を確認することができ、初期透水係数はスライス部分の解析結果の精度に影響を及ぼし、他のスライス部分に影響を与えないのがわかる。これは、事前の地質調査で得られた情報を地質毎にスライス分けすることにより精度が向上すること、精度良い透水係数が必要なことを意味している。

②の検討を実施するにあたり、各ケース共にスライスの初期透水係数は $10 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ に統一した。観測湧水量を時系列順に得たとして、観測湧水量を得る前（事前解析）、87 日目までの観測湧水量を得た場合、同様に 104 日目まで、190 日目まで得た場合の 4 ケースを実施した。

解析結果を図-4 に示す。観測湧水量を取得するに伴いモデルが更新され、観測湧水量の将来予測の精度

が向上している様子がわかる。SDA-SWING 法では、観測湧水量を得ることにより解析結果が逐次更新される。逐次更新の際、観測湧水量が得られるごとに、データ同化の処理がなされ、スライスの透水係数が自動的に最適化されることによって更新される。そのため観測湧水量の数が多いほど解析結果の精度は向上する。

4. まとめ

本研究では、地下水挙動解析ツールの一つである SWING 法にデータ同化手法を組み込み SDA-SWING 法を開発した。これにより従来の 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 により自動的化し、汎用性が向上した。SDA-SWING 法を用いて、実トンネルにおいて解析を実施し、パラメータが及ぼす影響について検討した。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。

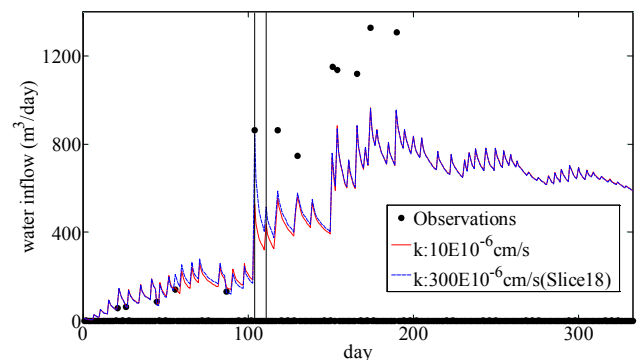


図-3 初期透水係数の違いによる解析結果

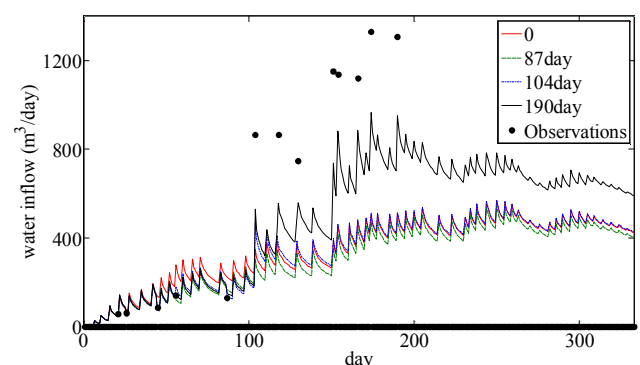


図-4 観測湧水量の頻度の違いによる解析結果

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