

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

小木曾淳弥¹・小山 倫史²・高橋 健二³・安田 亨⁴・大西 有三⁵

¹学生会員 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4)
E-mail: kogiso@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 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4)

³正会員 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)

⁴正会員 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)

⁵正会員 京都大学理事 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

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挙げられる。これらのトンネル掘削に伴う地下水問題に対して3次元地下水解析が行われるが、複雑な水理地質モデルの作成および解析には、多大な時間と労力を要する。また、現場で得られるトンネル湧水などの情報を解析モデルに反映させることも困難である。そこで、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SWING法が開発された。従来のSWING法では、解析モデル更新時に、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より解析モデルを更新する過程にデータ同化手法を導入し、逐次型データ同化型のSWING法の開発を行い、実トンネルへの適用を試みた。

Key Words : tunnel excavation, water inflow, SWING, data assimilation

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の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る。近年、市街地近傍のトンネル計画を余儀なくされることが多く、施工に関する課題のみならず、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¹⁾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^{2,3)}。複雑な水理地質モデルを作成し、有限要素法などの数値解析手法によって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。したがって、実用的な地下水情報化施工法の解析ツールとして既往の有限要素法などを用いた数値解析による地下水流動解析と比較し、利便性に優れた解析法である。

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、この観測湧水量を再現するような透水係数を専門家が試行錯誤的に決定しており、客観性を欠くとともに、解析精度は専門家の技量に大きく依存していた。また、入力データ作成やパラメータの更新に時間と労力を要していた。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過程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)⁴⁾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法と呼ぶこととする。SDA-SWING法を構築することで、情報の入力方法を簡単にし、トンネル掘削現場での利用という立場から汎用性の向上を目指した。本論文では、SDA-SWING法により実トンネルにおける解析を実施し、解析手法の適用性の検討を行った。

2. SWING法による水収支解析モデル

(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) 渇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、および渇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²⁾

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 ε 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、

ε : 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。

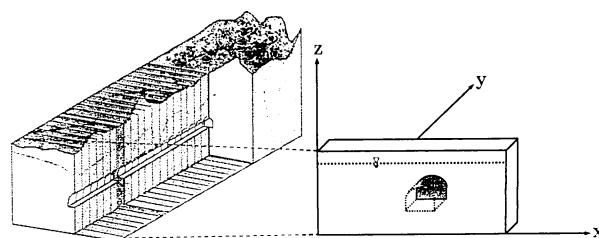


図-1 単位スライスボリューム

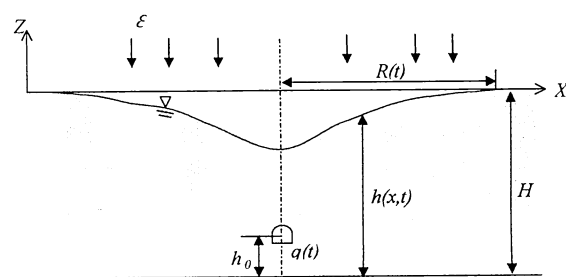


図-2 トンネル湧水に伴う地下水の流れ

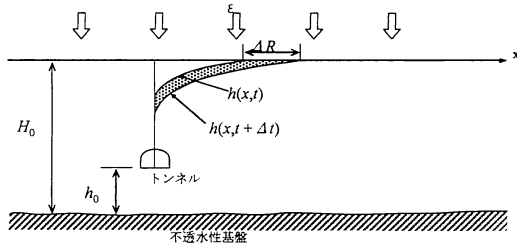


図-3 トンネル湧水量の算定方法

SWING法における単位スライスボリュームとは、トンネル掘削工区を等間隔の距離で分割したものである。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 dt 経過すると、影響範囲も R から $R+dt$ と変化する。水収支を考慮すると、トンネル湧水量は dt 期間中に減少した帯水層中の水量に、表層から浸透した ε 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⁹⁾。

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

ここに、

λ_e : 有効間隙率

ε : 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。

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

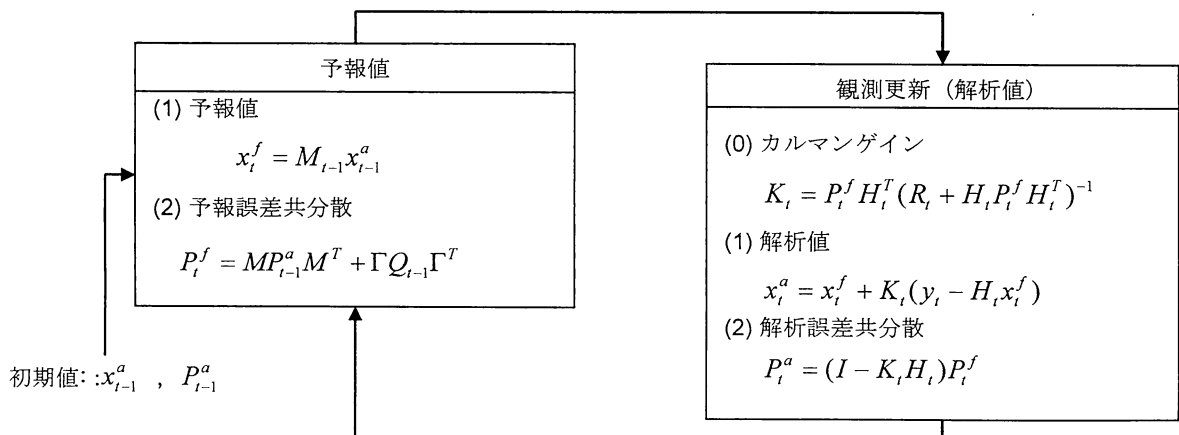


図-4 Kalman Filterの流れ

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。

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

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法の理論

本研究では、観測湧水量を取得した際に、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法を開発した。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。以下では、まず、EnKFの概要を説明し、次に、EnKFを導入したSWING法(SDA-SWING法)について述べる。

(1) EnKFの基礎理論

データ同化は気象学や海洋学の分野で広く用いられている手法である⁹⁾。この分野では地球の数値モデルを構成し、将来の予測シミュレーションなどを行う。しかしながら、モデルに与える初期値やパラメータがもつ不確実性は、シミュレーション結果が現実の現象と乖離する原因となる。そこで、実際の観測に基づいてパラメータを適切に扱うことにより、予測の精度を向上させることが可能である。土木分野においても、解析結果が実現象とよく一致しないということは頻繁にある。そこで、データ同化手法の1つであるEnKFをSWING法に組み込むことにより、解析によるトンネル湧水量の予測精度の向上を目指した。以下に、EnKFについて説明する。

KFによる処理のプロセスを図-4に示す。まず、通常の解析と大きく異なる点は、状態量の処理に加えて誤差の処理を行うことである。線形モデルである状態遷移行列 M を用いて、時刻 $t-1$ の解析値 x_{t-1}^a より時刻 t における予報値 x_t^f を算出する。同様に、誤差についても予測する。予報誤差共分散とは、モデルによる予測によって、誤差がどの程度発達するかを表したものである。式中の $\Gamma Q_{t-1} \Gamma^T$ はシステムノイズである。この予報値を算出した後、観測値が得られた時に、カルマンゲインを求め、解析値を求める。カルマンゲインの式にある H は遷移行列であり、モデルの格子点から観測点への空間的な内挿を表す。カルマンゲインは、予報誤差を最小化する重み行列であり、それを用いることにより解析値を求める。以上のプロセスを観測値が得られるごとに繰り返すのがKFである。

次に、EnKFについて述べる。EnKFではモデル内の状態量を、確率変数で表し、その分布を実現値集合であるアンサンブルによって保持し、観測値を得るたびにKFを用いてアンサンブルを逐次修正する。

データ同化前と後の L 個のアンサンブルメンバーを

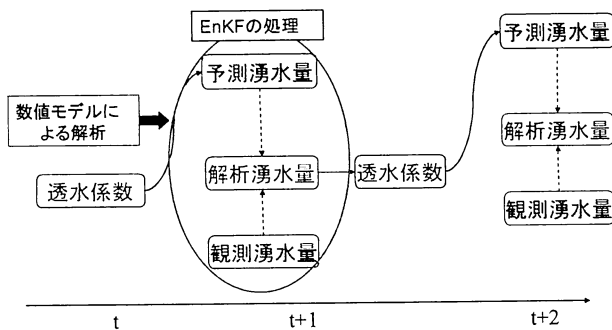


図-5 透水係数の算定方法

$x_t^{f(l)}$, $x_t^{a(l)}$ と定義する。アンサンブル平均とアンサンブル共分散行列は次式で定義できる。

$$\bar{x}_t^f = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L x_t^{f(l)} \quad (5)$$

$$\bar{P}_t^f = \frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^L \left(x_t^{f(l)} - \bar{x}_t^f \right) \left(x_t^{f(l)} - \bar{x}_t^f \right)^T \quad (6)$$

アンサンブル数 $L \rightarrow \infty$ にしたがって、上式がKFにより得られた平均値および共分散行列に一致する。これより、観測更新に必要な式は次のように表すことができる。

$$\bar{K}_t = \bar{P}_t^f H_t^T (\bar{R}_t + H_t \bar{P}_t^f H_t^T)^{-1} \quad (7)$$

$$\bar{x}_t^a = \bar{x}_t^f + \bar{K}_t (y_t - H_t \bar{x}_t^f) \quad (8)$$

$$\bar{P}_t^a = (I - \bar{K}_t H_t) \bar{P}_t^f \quad (9)$$

EnKFでは、初期値を L 通り発生させ、観測ノイズを与えることにより、式(7)よりカルマンゲインを算出する。このカルマンゲインを用いて、式(8)の解析値と式(9)の解析誤差共分散行列を算出する。

(2) SDA-SWING法におけるEnKFの適用

SDA-SWING法では、観測湧水量を得るごとにEnKFの処理を行い、各スライスに与えた透水係数を更新する(図-5)。時刻 t において、スライスボリュームに与えられている透水係数を用いて時刻 $t+1$ における予測湧水量を算定する。時刻 $t+1$ に観測湧水量が得られた場合、EnKFによる処理を行い、解析湧水量を算出する。この時刻 $t+1$ における解析湧水量より、透水係数を更新する。各スライスに与えられている透水係数が式(5)における状態量 x_t^f に相当する。乱数を発生させ、 L 通りの透

水係数を生成し、アンサンブルメンバー $\bar{x}_t^f$ を得る。観測ノイズとして、本研究では、観測湧水量を0.0025倍した数値を与えるものとする。なお、透水係数は遷移行列 H より湧水量の物理量に変換する。カルマンゲイン $\bar{K}_t$

を求めた後、解析値 $\bar{x}_t^a$ と解析共分散行列 $\bar{P}_t^a$ を算出することで、時刻 $t+1$ における更新が終了する。この一連の計算をスライスごとに行う。

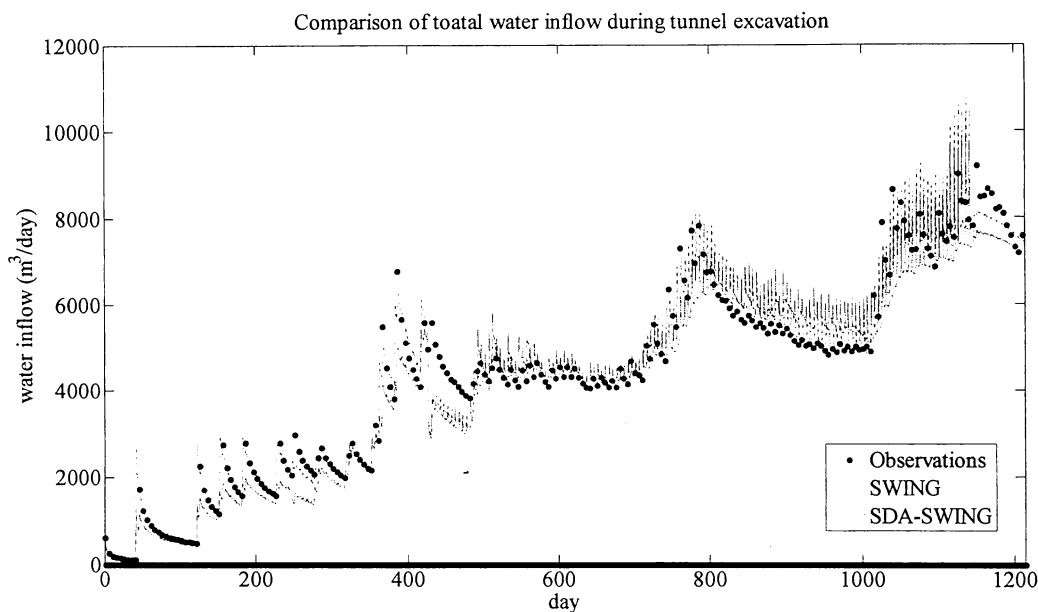


図-6 SWING法とSDA-SWING法の比較

4. SDA-SWING法を用いたトンネル湧水量の算定

トンネル湧水量の事後検証を実トンネル工事の実績データを用いて行った。既に、従来のSWING法での本トンネル解析は行われており、新たに開発したSDA-SWING法を用いて解析を実施することにより、その適用性について検討を行った。

(1) トンネル工事の概要

解析対象としたトンネルは、延長5km、平均土被り150m、丹波帯の一部をなす古生代から中生代の丹波層群（砂岩、泥岩、チャート）に施工されたトンネルである。計画段階においてトンネル掘削に伴うトンネル湧水、表面水や渓流水の枯渇など、自然環境への影響が懸念されていた。トンネル工事は一部大断面区間を除いて、NATM工法による全断面掘削工法を採用し、2工区に分けて施工された。

(2) 解析ケース

2工区のうちの1つの工区の解析を実施した。本解析の目的は次の2つである。1) 従来のSWING法とSDA-SWING法の比較、2) 観測湧水量を得ることによって、湧水量の将来予測がどのように変化するかについて調べる。

前者の検討においては、工事終了時までの観測湧水量を使用し、SWING法とSDA-SWING法による解析を実施した。後者の検討については、SDA-SWING法を使用し、工事終了までの期間を100%として、工事進行が33%、67%時点までの観測値を用いて将来の湧水量の予測を行った。例えば、工事進行が33%時点とは、その時点までの観測湧水量を用いてEnKFによる処理が行われることを意味し、それ以降の解析は予測値となる。初期透水係

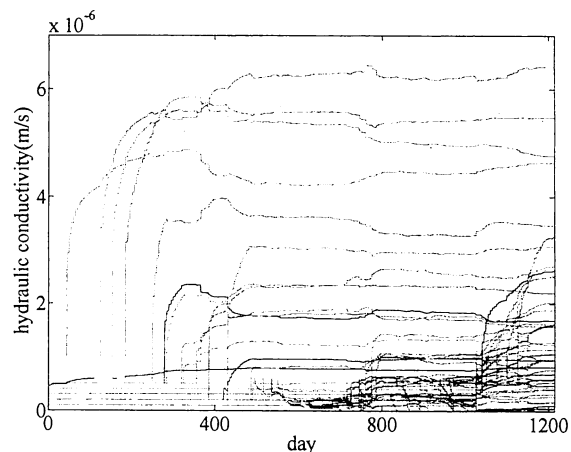


図-7 透水係数の最適化の様子

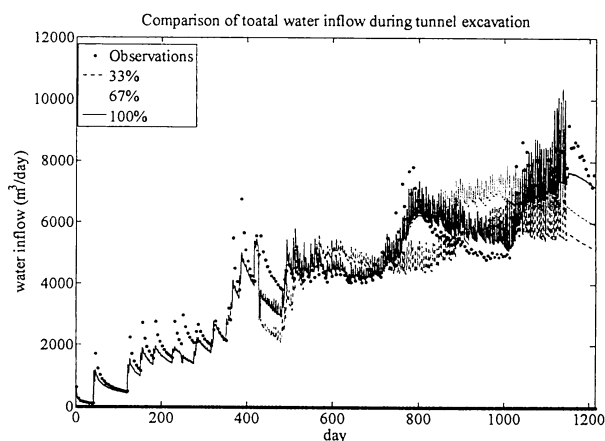


図-8 SDA-SWING法による湧水量予測

数は地質調査より得られた値を使用した。

(3) SWING法とSDA-SWING法の比較

SWING法とSDA-SWING法の解析結果を図-6に示す。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。観測湧水量はトンネル坑口での湧水量を用いた。トンネル湧水量の観測値（図中の黒点）と2つの解析値を比較すると、両者ともに比較的良好に湧水量が予測されているのがわかる。ただし、工期初期においてSWING法とSDA-SWING法の解析結果に差が見られる。これは、事前兆候無しで、突発的に大量の湧水が発生したためである。SWING法では、最適な透水係数を試行錯誤的に決めるため、観測値に非常に近い値を得ることができる。一方、EnKFの処理は1つ前の時間ステップの値より、次のステップの予測を行うため、急激な湧水量の変化には十分適応できない。この突発的な湧水に対応するためには、先行ボーリングなどによって事前にある程度精度のよい地質情報（この場合、透水係数）が分かっているならば、予測の精度は向上する。また、観測湧水量をある期間内で密に計測することで対応することも可能であると考えられる。

(4) SDA-SWING法によるトンネル湧水量予測

SDA-SWING法の解析で使用する各スライスの透水係数の変化の様子を図-7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透水係数であり、0日での透水係数は地質調査より得た初期の透水係数である。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、各スライスの透水係数が最適化されていることを意味する。

図-8に観測湧水量の取得量の違いによる湧水量の将来予測の変化を示す。33%の解析結果は405日までが実測期間になり、それ以降が予測期間となる。67%の解析結果は809日以降が予測期間である。67%の結果では実測期間が長くなった分、精度が向上し、湧水量の将来予測も33%と比べ変化している。本図より、観測湧水量を得るごとに解析結果が更新され、予測の精度も向上していることがわかる。これは、SDA-SWING法では、観測湧水量を得ることにより解析結果を逐次更新していくため観測湧水量の数が多いほど解析結果の精度が向上するためである。

5. 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。

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が、EnKFを導入することにより透水係数の最適化が自動化されることで、現場への適用を考えた際の汎用性が向上した。また、新たに開発したSDA-SWING法を用いて、実トンネルにおいて解析を実施し、その実用性を示した。

本研究の目的は、解析精度の向上よりも、最適化プロセスの自動化に重点を置いている。そのため、試行錯誤的に決定する従来の方法による結果と比較すると精度はやや低下しているが、試行錯誤的に透水係数を決定する労力および時間を考慮するれば十分であると考えられる。

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、地下水挙動のモデルを簡潔化しているため、厳密な湧水量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、SDA-SWING法にはまだ改良の余地があり、特に、突発湧水の予測に関しては、その予測精度の向上は今後の課題である。SDA-SWING法は現場での地下水情報化施工の手法として有益であると言える。

謝辞：本論文の執筆にあたり、多くの方の助力を頂きました。特に、京都大学大学院理学研究科の石川洋一先生には、データ同化に関して有益な助言を頂きました。深く感謝申し上げます。

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) Xiong J,Ohnishi Y, Takahashi K and Koyama T：Parameter Determination of Multi-tank Model with Dynamically Dimensioned Search. Proceedings of the Symposium on Rock mechanics in Japan.2009, Vol.38 :19-24.
- 4) Christopher K Wikle, L.Mark Berliner: A bayesian tutorial for data assimilation, Physica D,230, 1-16.
- 5) Jacob Bear: Dynamics of Fluids in Porous Media, Dover Publications, pp.420-422, 1988.
- 6) 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.

DEVELOPMENT OF SWING METHOD WITH SEQUENTIAL DATA ASSIMILATION AND ITS APPLICATION TO REAL TUNNEL CONSTRUCTION

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 SWING method was developed to predict the groundwater flow quickly by back calculation using simple models. However, parameter optimization is practiced by trial and error method and requires experts' skill. In this paper, Ensemble Kalman Filter was introduced to the original SWING system to automate the optimization process. The newly developed SWING method (called SDA-SWING) was applied to a real tunnel construction and the groundwater inflow to the tunnel was predicted.