山岳トンネル施工時の地下水流動場予測に 対するデータ同化手法の適用性検討

高本 尚彦1*・白石 知成1・山本 真哉1

¹清水建設株式会社 技術研究所(〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17) *E-mail: n.takamoto@shimz.co.jp

山岳トンネル工事では、大量湧水による工程遅延や掘削に伴う地下水位低下や河川流量の減少など、施 工や自然環境に関わる地下水問題が生じる.情報化施工の取組みが進む中では、解析等によるリアルタイ ム予測を行うことで、工程遅延の回避や施工の安全性を向上する必要がある.本論文では、3次元浸透流 解析による予測精度向上を目的とし、既掘削区間坑内全体湧水量、切羽湧水量、観測井地下水位の複数観 測データを使用して、地山の透水係数を同定するデータ同化手法の適用性を把握するための数値実験を実 施した.その結果、観測データの組合せの違いにより、観測データの再現性や透水係数の同定結果が異な り、データ同化手法を適用する場合の有効な観測データの組合せや条件に関する知見が得られた.

Key Words : tunnel excavation, groundwater flow simulations, data assimilation

1. はじめに

山岳トンネル工事においては、大量湧水による切羽水 没やトンネル濁水処理による工程遅延といった施工に関 わる地下水問題がある.トンネル湧水の止水対策工の必 要性や排水計画の見直しを判断するために、現場では迅 速な湧水量予測が求められている.また、トンネル掘削 に伴う地下水位の低下により井戸などの水位低下や河川 流量の減少など、トンネル周辺の自然環境に影響を及ぼ す地下水問題も生じることから、トンネル周辺の自然環 境や社会環境に与える影響を評価し、その影響因子につ いて保全対策が必要となる.

トンネル湧水量やトンネル地山の地下水環境を予測す るために、地下水解析が行われる場合があるが、地下水 解析を実施するには、複雑な水理地質モデルの作成、再 現解析・予測解析の技術的な評価や解析条件の見直しな ど、多大な時間と労力を要する.そのため、地下水解析 やモニタリングが実施されることは多くはない.

一方で、情報化施工の取組みが進む中では、解析等に よるリアルタイム予測を行うことで、工程遅延の回避や 施工の安全性を向上していく必要がある.このような施 工に関わる地下水問題に対して、解析モデルを簡素化 した地下水解析手法であるSWING法¹¹に、観測湧水量を 再現する透水係数を求める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を導入 したSDA-SWING法²⁾が開発され,現場において湧水量 予測を逐次・迅速に行う試みもされている.ただし,本 手法では地下水流動のモデルを簡素化しているため,厳 密な湧水量や地下水環境を予測できるわけではない.そ こで本論文では,3次元浸透流解析による予測精度向上 を目的とし,施工時の既掘削区間坑内全体湧水量,切羽 湧水量,観測井地下水位などの複数観測データを使用し て,地山の透水係数を同定するデータ同化手法の適用性 を把握するための数値実験を実施した.

2. 手法

(1) アンサンブルカルマンフィルタ

本研究では地下水流動モデルを対象としてデータ同化 を行うため、アンサンブルカルマンフィルタを用いた. まず、以下のような状態空間モデルを考える.

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{t-1}, \mathbf{v}_t) \tag{1}$$

$$y_t = Hx_t + \omega_t , \omega_t \sim N(0, R)$$
 (2)

ここで、 x_t は時刻 t における状態変数のベクトル、f は 非線形性を有するシステムモデル、y は観測値からなる ベクトル、H は線形の観測演算子である.また、v はシ ステムノイズであり、 ω は平均 0、共分散行列R の正規 分布に従う観測ノイズである.アンサンブルカルマンフィルタでは,(1)式により得られる状態変数の予測結果 を以下の計算式により修正し,解析結果を得る.

$$x_t^{a,(i)} = x_t^{f,(i)} + K_t (y_t + \omega_t - H x_t^{f,(i)})$$
(3)

状態変数の括弧付き添え字*i* はアンサンブルのサンプル 番号を表す. 添え字のfとaはそれぞれ予測時の状態変 数と観測に基づいて更新された状態ベクトルを表す.また,Kはカルマンゲインであり,予測誤差の共分散行列 および観測誤差の共分散行列から以下のように算出される.

$$\mathbf{K}_{t} = \mathbf{P}_{t}\mathbf{H}^{T}(\mathbf{H}\mathbf{P}_{t}\mathbf{H}^{T} + \mathbf{R}_{t})^{-1}$$
(4)

アンサンブルカルマンフィルタの実際の手順は、予測 と観測更新の2段階に分けられる.予測においては、ア ンサンブルの各メンバーに対して、式(1)のように次の 観測結果が得られる時刻までの非定常シミュレーション を実行することで状態ベクトルの事前分布を得る.次に 観測更新では観測値に平均値が0のガウスノイズを付加 し⁷、これから、各アンサンブルメンバーの状態ベクト ルを式(3)により更新することで事後分布が求められる.

(2) 地下水流動モデルの逐次データ同化

本研究では多孔質媒体における3次元飽和不飽和地下 水流動解析に対してアンサンブルカルマンフィルタを適 用する.地下水流動解析の支配方程式は以下で表される.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_r(\theta) K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_r(\theta) K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_r(\theta) K \frac{\partial h}{\partial z} \right)$$

$$= (C + \beta S_s) \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\beta = \begin{cases} 0 \quad \text{\tilde{T}} \text{$(bartxis)$} \\ 1 \quad \text{$(bartxis)$} \end{cases}$$
(5)

ここで、h は圧力水頭、K は飽和透水係数、 K_r は比透 水係数、 θ は体積含水率、C は比水分容量、S は比貯留 係数である. なお、現状では透水係数は等方性とした.

本研究ではアンサンブルカルマンフィルタにより飽和 透水係数の同定を考えるにあたり、状態ベクトルを以下 のように定義した.

$$x = [h_1, \cdots, h_n | q_1, \cdots, q_n | log K_1, \cdots, log K_m]$$
(6)

nは解析メッシュの節点数, m は地質区分の数に相当する. 状態ベクトルには主たる状態変数である圧力水頭に

加えて,推定対象の飽和透水係数を含めている.飽和透水係数は時間変化しないパラメータであるが,本研究ではデータ同化の際に飽和透水係数が変化することを許し, 逐次更新していくものとした.さらに,流量の観測結果を同化に用いるため,節点流量qも状態ベクトルに組み込んだ.一方,観測ベクトルに関しては,地下水のモニタリングにより圧力水頭または水位と地下構造物への流入量のデータが取得されていることから,以下のように定義した.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} h_1, \cdots, h_P \middle| Q_1^{obs}, \cdots, Q_d^{obs} \end{bmatrix}$$
(7)

ここで、*P*は観測孔の数である.また、*Q*は特定の領域 を流れる地下水の量であるが、解析では領域内に存在す る節点流量の総和に相当する.順解析の非定常計算には 有限要素法であるDransu-3D/EL³をアンサンブルカルマ ンフィルタ用に改良したものを用いた.

3. 数值実験方法

プログラムのアルゴリズムの妥当性検証、およびデー タ同化手法の適用性を把握するために、モデルは地下水 流動を完全に再現でき、かつ、観測データにも一切誤差 がない状況でのデータ同化を試みる. これは, 理想的な 条件下であれば、与えられた観測情報により地質区分の 透水係数を正しく同定できることを確認するためである. 具体的には、あらかじめ各地質の透水係数を設定して、 トンネル掘削を伴う非定常解析を実行し、この解析結果 より各観測地点における経時的な流量と圧力水頭(水位) を取得し、これらを模擬観測データとする.次に、透水 係数を未知として、模擬観測データを用いてアンサンブ ルカルマンフィルタを実行し、透水係数の同定を行う. 本実験で使用する観測データとしては、トンネルの既掘 削区間の坑内湧水量の合計となる全体湧水量、トンネル の切羽位置の湧水量となる切羽湧水量、圧力水頭の3つ の観測データを使用する.

4. 簡易解析モデルによる数値実験検討

(1) 3次元浸透流解析モデルおよび数値実験条件

数値実験に使用した簡易解析モデルを図-1に示す.解 析モデルは、水平方向500m×300m、鉛直方向350mの直 方体で、地表より100m下の深度に長さ300mの水平トン ネルが位置している.メッシュ長は水平・鉛直共に10m メッシュとなっている.モデル領域内の地質は、図-1に 示すように、表層1メッシュ分(10m)を地質1とし、そ れ以深はトンネルの縦断方向に100mずつ地質2~地質4 に区分した.また各地質に設定した水理特性を表-1に示 す.透水係数は等方とし,各地質区分の領域内の透水性 は均質と仮定した.

模擬観測データを作成するための解析条件は、図-1に 示すようにモデルの底面および側面の手前と奥について は不透水境界,左右の側面については動水勾配を与える よう静水圧の水頭固定とした.地表面は降雨境界とし、 300mm/yearの涵養量を一定に与えた.トンネル掘削は1 日10m掘削とし、解析期間は30日とした.上述した条件 の下で飽和不飽和の非定常解析結果から模擬観測データ を抽出した.圧力水頭の観測データはモデルの節点上に 設けることとし、本実験ではトンネル直上20mの位置の 節点で地質2~4に1箇所ずつ(図-1の観測No.1~観測No.3) データを抽出した.全体湧水量は掘削済みの全坑壁節点 からの流量、切羽湧水量は切羽部分の1要素分の坑壁節 点(8節点)の流量からデータを抽出した.

アンサンブルカルマンフィルタでは、1日ごとに観測 データに基づいて透水係数を修正更新する.本実験にお けるアンサンブルカルマンフィルタのアンサンブルの大 きさは48サンプルとした.透水係数の取り得る範囲は 1.0E-4~1.0E-10m/sとした.推定対象とする透水係数の初 期値は、実際のトンネル施工では地山地質の透水係数が 不明な場合もあることから、本実験においては一様分布 を発生させ、透水係数の不確かさ(正規ノイズの標準偏 差)は0.1とした.また観測誤差は、圧力水頭、流量と もに独立であるものとし、平均値0のガウス分布に従う と仮定した.ガウス分布の分散は、湧水量と地下水頭の 観測データでは絶対値や測定精度が異なることを考慮し て、流量を10、圧力水頭を0.1と異なる大きさとした. 本実験における解析ケースは、使用する模擬観測データ の組み合わせを変えた以下のケースとした.



表-1	簡易解析モデルで設定し	た水理特性

生まり	透水係数	有効	比貯留係数		
地貝区刀	(m/sec)	間隙率	(1/m)		
地質1	1.00E-06		1.00E-05		
地質2	1.00E-08	0.2			
地質3	1.00E-07	0.2			
地質4	1.00E-05				

ケース1:全体湧水量+切羽湧水量+圧力水頭 ケース2:全体湧水量+切羽湧水量 ケース3:全体湧水量+圧力水頭 ケース4:切羽湧水量+圧力水頭 ケース5:切羽湧水量のみ

(2) 数值実験結果

観測データの組み合わせの違いや透水係数初期値およ び観測誤差の設定の影響について把握した.

誌面の関係上,ここでは結果の一例を示す.図-2およ び図-3は、ケース1の湧水量および圧力水頭の再現結果 を時系列で示したものであり、データ同化結果は、観測 結果をもとに修正された値のアンサンブルの平均値であ る.本結果より、対象期間全体にわたって模擬観測デー タとほぼ一致していることが分かる.また再現結果は他 のケースにおいても同様な結果となった.ただし、ケー ス3は他のケースに比べて計算に時間を要した.計算時 間がかかる原因としては、飽和不飽和の計算に時間を要 している可能性が高いことから、ケース3ではそのよう な透水係数の組み合わせが生じていることが考えられる.

図-4は各地質区分(地質1~4)における透水係数の同 定結果の一例を経時変化で示したものである.地質1に ついては対象となる模擬観測データがないことから,ど のケースにおいても、全解析期間を通して標準偏差も大 きく、透水係数の同定はできていない.地質2では、解 析当初は真値とずれてはいるものの、ケース1では7日目 に、ケース2では9日目には真値に近い値を示しているの が確認できる.この違いから、観測No.1のデータがある ことでケース1の方が早く真値に近づくことが確認でき た.一方、ケース5では真値と大きくずれてはいないも のの、地質2を掘削している期間においても真値と一致 する結果は得られなかった.この理由としては、ケース 5では地下水頭の観測データがなく、切羽流量の変化量 が小さいことから、透水係数を同定できるだけの情報が 少ないためと考えられる.地質3と地質4については、対





図-4 簡易解析モデルにおける透水係数同定結果例

象の地質区間に入った直後は真値とずれているものの, その後すぐに真値に近づく結果となり,標準偏差も小さ いことが分かる.以上のことから,データ同化手法(プ ログラム)が概ね妥当であると判断され,本手法が適用 が可能であること分かった.また透水係数の同定におい ては,単体の流量データを使用するよりも,全体湧水量 と切羽流量の両観測データを使用した方が同定の精度が 向上し,さらに地下水頭の観測データも加えた方がより 同定精度が向上することが確認できた.

また、透水係数の初期値の設定を変えてみた結果、模擬観測データの再現や透水係数の同定結果に大きな違い は生じなかった.しかし、すべての地質で一定範囲の初 期値(例えば1.0E-5~1.0E-9m/s)とする場合でもその範 囲が小さく、また個々の地質で想定される透水係数に基 づいて個別の初期値を発生させる方が計算時間が早くな った.これらの計算時間の違いも飽和不飽和の計算に要 している時間の違いによる可能性があり、計算を早くす るためには、個々の地質で想定される透水係数に基づい て個別の初期値を発生させる方が良いことが分かる. 観測誤差の設定値については、流量と地下水頭で異な る大きさを与えたが、流量についても異なる大きさ(例 えば、全体流量を100、切羽流量を10)を与えた方が、 観測データにおけるアンサンブルの標準偏差が大きくは なるものの、 模擬観測データの再現結果と透水係数の 同定結果は良くなった. 流量については、実際はトンネ ル規模や地山の透水性によって絶対値が大きく異なって くることから、観測誤差の大きさについては、現場の湧 水量に合わせた設定が必要と考えられる.

5. 地形を考慮した3次元トンネル解析モデルによる数値実験検討

(1) 3次元浸透流解析モデルおよび数値実験条件

本節では現実的な3次元解析モデルとして,地形も考 慮した解析モデルでの数値実験を行った.数値実験に使 用した地形考慮解析モデルを図-5に示す.解析モデルは, 水平方向は約12000m×10000m,鉛直方向は約200~650m で、地表より約100m下の深度に長さ3600mのトンネルが 位置している.メッシュ長は10m~数百mメッシュで、 トンネル付近を細かくしている.モデル領域内の地質は、 図-5に示すように、地質1~地質4に区分し、地質3につ いては高透水部となる層を設けた.各地質に設定した水 理特性を表-2に示す.本実験でも透水係数は等方とし、 各地質区分の領域内の透水性は均質と仮定した.

模擬観測データを作成するための解析条件を図-5に示 す.トンネル掘削は1日10mの掘削とし,地質3を掘削中 に掘削停止期間20日を設けた上で,全解析期間を380日 とした.上述した条件の下で非定常の解析結果から模擬 観測データを作成した.圧力水頭の観測データはトンネ ル直上40~60mの位置の節点で,地質1,地質2,および 地質4に1箇所ずつ(図-5の観測A~観測C)データを抽 出した.アンサンブルカルマンフィルタを実施する際の 条件および解析ケースは,前節の簡易解析モデルと同様 とした(ケース1~5).

(2) 数值実験結果

本節でも誌面の関係上、結果の一例を示す.図-6はケ ース1の湧水量の再現結果を時系列で示したものであり、 対象期間全体にわたって模擬観測データとほぼ一致し, 他のケースにおいても同様な結果となった.一方, 圧力 水頭の再現結果については、図-7に示すように観測C地 点における地質3に到達した以降でケースによって僅か に再現結果が異なった.ケース1では地質3に到達した直 後以外、ケース4では地質3に到達した時点で模擬観測デ ータとほぼ一致していることが分かる.一方ケース3で は、地質4に到達した以降も模擬観測データとのずれが 続いおり,全体湧水量の模擬観測データだけでは,僅か な圧力水頭の変化を再現できない可能性があることが分 かった.また図-8は各地質区分(地質1~4)における透 水係数の同定結果の一例を経時変化で示したものである が、ケース3については、地質1と地質4以外の区間で透 水係数の同定に失敗していることが分かる.地質2では 全体湧水量の変化量が小さいことから、透水係数を同定 できるだけの情報が少ないためと考えられる. また地質 3については、全体湧水量の変化量はあるものの、地質2 の同定ができていない状態の上に、掘削期間が短いこと

から,透水係数を同定する前に地質4の掘削に入ったこ とで同定できなかった可能性がある.またケース1とケ ース4の比較から,全体湧水量と切羽流量の両観測デー タを使用した方が同定の精度が向上する結果となり,前 節の簡易解析モデルの数値実験と同様な結果となった.



表-2 地	形考慮解析モ	デルで設定	した水理特性
-------	--------	-------	--------

世界区分	透水係数	有効	比貯留係数
地貝区刀	(m/sec)	間隙率	(1/m)
地質1	1.00E-06		1.00E-05
地質2	1.00E-07	0.2	
地質3	1.00E-05	0.2	
地質4	1.00E-08		







6. まとめ

山岳トンネルの3次元浸透流解析に対して、施工時の 複数観測データを使用して、地山の透水係数を同定する データ同化手法の適用性を把握するための数値実験を実 施した.その結果、データ同化手法の適用が可能である こと分かった.使用する観測データとしては、全体湧水 量だけでは透水係数の同定ができない可能性があり、切 羽流量、さらには動水勾配の変化を表す地下水頭の観測 データも併せて使用することで、透水係数の同定精度が 向上することが確認できた.今後、地下水頭の必要なデ ータ数量としての知見が得られていないことから、地下 水頭観測点数や配置の違いの感度解析、降雨変動を与え た条件での適用性や涵養率の同定などを実施していく予 定である.最終的には、実トンネルの実測データを使用 したデータ同化手法の検証を行う必要がある.

参考文献

- 高橋彦治,大西有三,安田亨,熊俊:山岳トンネルの 地下水情報施工簡易システム(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) 小木曽淳弥,小山倫史,高橋健二,安田亨,大西有三:複数の観測データを用いたデータ同化手法の導入による情報 化施工簡易システムの高度化,第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,pp.13-18,2012.
- Nishigaki, M.: Density dependent transport analysis saturated-unsaturated porous media 3 dimensional Eulerian Lagrangian method, Okayama Univ, 2001

APPLICABILITY EVALUATION OF DATA ASSIMILATION TO SIMULATE GROUNDWATER FLOW DURING MOUNTAIN TUNNEL CONSTRUCTION

Naohiko TAKAMOTO, Tomonari SHIRAISHI, and Shinya YAMAMOTO

It is necessary to avoid process delays and improve construction safety by real-time simulation during mountain tunnel construction. In this paper, for the purpose of improving the prediction accuracy by the 3D groundwater flow simulation, we carried out a numerical experiment to understand the applicability of the data assimilation method for identifying the hydraulic conductivity of the ground using multiple observation data. As a result, the reproducibility of the observation data and the identification of the hydraulic conductivity differed depending on the combination of the observation data, effective conditions were obtained when using the data assimilation method.