

# データ同化と深層学習を併用した山岳トンネル湧水予測～ DeepSWING法の開発

## Development of DeepSWING Method～Water Inflow prediction in Mountain Tunnel Excavate Using Data Assimilation and Deep Learning

森 守正 Moritada Mori\*1 安田 亨 Toru Yasuda\*2  
小山 倫史 Tomofumi Koyama\*3 西山 哲 Satoshi Nishiyama\*4

### 梗概

山岳トンネル工事における簡易湧水予測法であるSDA-SWING法を高度化した。一次元井戸公式を基本としたSDA-SWING法を三次元方向に拡張するとともに、データ同化手法と深層学習とを併用して組み込むことで施工情報のフィードバックおよび将来予測精度の向上を図り、本手法をDeepSWING法と名付けた。開発した本手法を実際のトンネル工事において取得されたデータに適用し、その効果を確認した。

キーワード：トンネル掘削，湧水量予測，データ同化，深層学習

### Summary

The SDA-SWING method is a simplified method for water inflow prediction in mountain tunnel excavate. We extended the SDA-SWING method, which is based on one-dimensional well formulas, to three dimensions and incorporated data assimilation methods and deep learning to improve the feedback of excavate information and the accuracy of future prediction.

We named this method the DeepSWING method and confirmed the effectiveness of this method by simulating it using actual excavate records.

Keywords: tunnel excavation, predicting spring water inflow, data assimilation, deep learning

## 1 はじめに

山岳トンネル工事においては、事前調査により得られた地質特性を基に詳細設計を行うのが一般的であるが、我が国はその立地条件により、断層や割れ目が発達した非常に複雑な地質構成となっている場合が多い。ゆえに、山岳トンネル工事においては事前の想定通りに施工が進むことはまれであり、施工時の切羽観察や各種計測により実際の地質分布を把握し、適時施工方法の見直しを行っているのが現状である。特に、河川は短く急峻であり、降水量も世界平均の2倍と多く、地下水位も高いのに対し、山岳トンネル工事において一般的に用いられるNATMは坑内より常に排水を行うことが前提となっており、トンネル掘削に伴う周辺の地下水環境に与える影響を評価する場合、施工範囲のみの局所的な評価だけでなく、流域全体を水環境システムの一部として捉えたうえで、その地下水挙動を予測する必要がある、最も制御が困難なものの一つである。

トンネル掘削に伴う従来の地下水挙動については、これまで様々な手法が提案されており、実務において利用されてきた。しかし、特に三次元浸透流解析や準三次元浸透流解析では、解析モデルを非常に多数の要素に分割するため、解析時間が長くなる。また、観測値を用いて水理定数を修正する際の自由度が高く、その修正の精度は技術者の技量に依存する傾向にあり、実際の現場でリアルタイムに運用するのは難しいという課題があった。

そこで、地質調査で岩盤工学的な物性がほぼ一様であると把握できた湧水量の変動の小さい地山を対象に、簡易な井戸方程式を基準としたうえで施工中の観測値を逐次型データ同化手法（SDA: Sequential Data Assimilation）<sup>1), 2)</sup>

\*1 技術研究所（竹中土木） 博士(工学) Research & Development Institute (Takenaka Civil Engineering & Construction Co., Ltd.), Dr. Eng.

\*2 パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通基盤事業本部 博士(工学) Transportation Infrastructure Div, Pacific Consultants Co., Ltd., Dr. Eng.

\*3 関西大学 社会安全学部 教授・博士(工学) Prof., Dr. Eng., Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University

\*4 岡山大学学術研究院 環境生命科学学域 教授・博士(工学) Prof., Dr. Eng., Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University

を利用して水理地質モデルに自動に反映して迅速に湧水量の予測を行うSDA-SWING法が開発<sup>3), 4)</sup>された。しかし、本手法はDupuitの準一様流を前提とした井戸公式の一種であるBearの式<sup>5)</sup>を支配方程式として採用しているため、地盤の不均一性に起因したモデル化に伴う解析誤差を内在することが問題点として挙げられる。また、既施工区間の実績を未施工区間の将来予測に反映するシステムが簡易なものであり、将来予測精度に問題があった。

以上の課題を解決するため、筆者らはSDA-SWING法を基に三次元流れを考慮できるように拡張したうえで、既施工区間の実績を学習データとして未施工区間の地質情報を予測するために深層学習<sup>6), 7)</sup>を導入することにより解析精度の向上を図り、本解析手法をDeepSWING法と名付けた。本報は、このDeepSWING法の概要および実トンネル工事において取得された施工データを対象として本手法を適用した結果について述べる。

## 2 SDA-SWING法概要

### 2.1 基本方程式

SDA-SWING法は、地質調査で岩盤工学的な物性がほぼ一様であると把握でき、湧水量の変動の小さい地山を対象とした山岳トンネル工事において、坑口湧水量の観測値を基に水理地質モデルを逐次・簡易に修正し、湧水量を予測し、予測結果を施工に反映する評価法である。施工時においてFig. 1に示すように、実際に観測した坑口湧水量を基に、短時間に過去までのデータから将来の坑口湧水量の予測と、観測した坑口湧水量を用いて水理定数である透水係数の修正を繰り返して、予測と評価の精度を向上させる。解析ではFig. 2に示すように、掘削対象区間をトンネル縦断方向に等間隔で分割した単位スライスボリュームを対象とする。単位スライスボリュームとは、分割区間毎の物性値を一定とする簡素化した水理地質モデルであり、分割区間の長さは1週間の掘削進捗の目安である20mを基本とする。

各単位スライスボリュームにおいて掘削に伴うトンネル湧水および地下水位低下範囲を予測し、簡易に透水係数を修正するため、Fig. 3に示すような一次元非定常流を考える。すなわち、水平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、地下水流は二次元非定常流であるが、SDA-SWING法では式(1)～(3)に示すDupuitの準一様流の仮定に基づいたBearの式に置き換えて、一つの単位スライスボリュームの単位長さあたりの湧水量と地下水位低下範囲を予測する。

$$\frac{h^2 - h_0^2}{H_0^2 - h_0^2} = \frac{x}{R(t)} \quad (1)$$

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

$$q(t) = k \frac{(H_0^2 - h_0^2)}{2R} \quad (3)$$

ここに、

$t$  : 単位スライスボリューム掘削後の経過時間 (d)

$k$  : 透水係数 (m/d),  $\varepsilon$  : 降雨浸透率 (m/d)

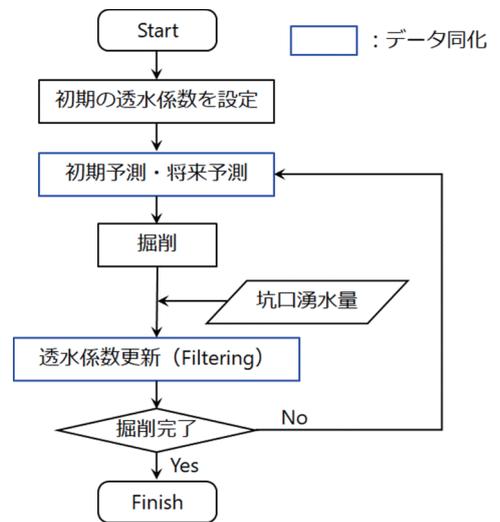


Fig. 1 SDA-SWING法実施フロー  
 Processing flow of SDA-SWING method

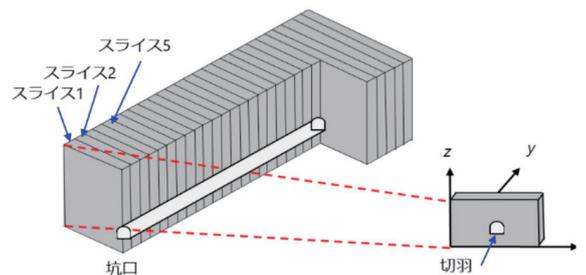


Fig. 2 単位スライスボリューム概要  
 Unit slice volume of SDA-SWING method

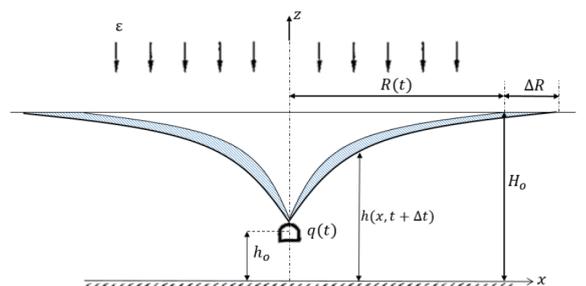


Fig. 3 トンネル掘削において生じる地下水の流れ  
 Groundwater flow caused by tunnel excavation

$\lambda_e$ : 間隙率,  $H_0$ : 初期地下水位 (m)  
 $h_0$ : 不透水性基盤からトンネル基盤までの距離 (m)  
 $q$ : 単位スライスボリュームあたりの湧水量 ( $m^2/d$ )  
 $R$ : 地下水位低下範囲 (m)

式 (2) の降雨浸透率 $\varepsilon$ については、地表面を一つの流域と見なした4段タンクモデル<sup>8)</sup>を構築し、実績降雨量に対する基底流出量の比率より求める。タンクモデルの各種パラメータは、工事着手前の一定期間における降雨量および近隣河川の流量実績から設定する。なお、トンネル湧水の影響を受ける河川流量の予測は、河川へ流出する帯水層とトンネルへ流出する帯水層が一体であると仮定し、掘削前の実測河川流量を同定したタンクモデルで掘削時期について予測計算した河川流量から、SDA-SWING法により求めたトンネル湧水量を差し引いた流量として計算を行う。

次に、湧水量の予測手順を示す。まず、掘削に伴い、Fig. 4に示すように、最初に掘削対象となる単位スライスボリュームであるスライス1が解析範囲に入る。ここで、坑口側の単位スライスボリュームから順にスライス1, スライス2, スライス3と称す。また、SDA-SWING法では井戸公式であるBearの式を用いるため、Fig. 3に示すように、地下水位は掘削と同時にトンネル直上まで低下する。なお、Bearの式は一次元非定常流を基本とし、二次元、三次元流れを考慮できないため、地下水位が低下する単位スライスボリュームはスライス1のみである。つまり、切羽前方にあたる単位スライスボリュームであるスライス2以降の地下水位の低下は考慮しない。掘削がスライス2に進行すると、スライス2の地下水位がトンネル直上まで低下する。このサイクルの繰り返しにより、解析範囲はトンネルの掘削に伴い、逐次単位スライスボリュームを累積する。つまり、全ての単位スライスボリュームで発生する湧水量を合計することで坑口湧水量の予測値が求められる。

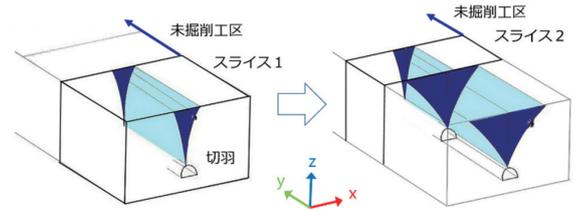


Fig. 4 トンネル掘削により拡張される地下水位  
 Extent of groundwater level caused by tunnel excavation

## 2.2 データ同化手法概要

SDA-SWING法においては、透水係数の自動修正法として逐次型データ同化手法であるアンサンブルカルマンフィルター (EnKF: Ensemble Kalman Filter) を採用している。各々の単位スライスボリュームに地質調査より得た透水係数などの水理定数を初期条件として与え、その透水係数を坑口湧水量の観測値をもとに逐次修正する。

SDA-SWING法におけるEnKFの処理手順を示す。EnKFでは、未知の状態空間モデルに対して、観測ベクトルを基に状態ベクトルの修正を行う際、状態ベクトルと観測ベクトルそれぞれにノイズ ( $v_T, w_T$ ) が含まれるという仮定の下で観測値を再現できる状態ベクトルの組み合わせを探すことになる。また、状態モデルの時間更新 $f_T$ は存在せず、システムノイズのみ含まれるものと仮定すると、システムモデルは式 (4) に示すようになる。

$$x_{T|T-1} = x_{T-1|T-1} + v_T \quad (4)$$

SDA-SWING法の状態ベクトルは土質定数であり透水係数 $k$ , 間隙率 $\lambda_e$ , 平均降雨浸透率 $\varepsilon$ の3つである。ただし、状態ベクトルのうち特に解析結果に大きな影響を与える透水係数 $k$ にのみシステムノイズを与えた。次に、観測ベクトルは坑口湧水量の観測値 $Q$ である。また、EnKFでは状態ベクトルの確率分布がガウス分布に近いほど精度が高くなるのに対し、透水係数はその対数値がガウス分布に従うことが一般的に知られている。従って、透水係数の対数値に対してシステムノイズを与えることにした。

ここで、一つの単位スライスボリュームの掘削に要する時間を $m$ , 時刻 $T$ における既施工区間の単位スライスボリュームからの湧水量の合計値を $Q'_{(T)}$ とすると、スライス ( $j$ ) 掘削時における本手法の状態空間モデルは、式 (5), (6), (7) の通りになる。なお、式 (5) に示す通り、透水係数 $k$ は対数に変換した。

$$x^j_{T|T-1} = x^j_{T-1|T-1} + v_T \quad ※x_{T-1|T-1} = \log_{10} k_{T-1|T-1} \quad (5)$$

$$y_T - Q'_{(T)} = h_{T-m(j-1)}(x^j_{T|T-1}) + w_T \quad (6)$$

$$Q'_{(T)} = \sum_{n=1}^{j-1} h_{T-m(n-1)}(x^n_T) \quad (7)$$

上記の状態空間モデルに対し、坑口湧水量を観測した段階で透水係数の修正を実施する。また、掘削後の単位スライスボリュームからの湧水は数時間または、数週間の間定常流に収束する。そこで、掘削期間が定常流に収束する程度のスライス幅 (=20m) を確保した上で、掘削中のみEnKFの処理を適用する。掘削後は掘進中の単位ス

ライスボリュームについて坑口湧水量を最も再現する透水係数を逆算（フィルタリング）し、一定値に定める。その後、逆算した透水係数を用いて将来予測を行う。Fig. 5に示すように、坑口湧水量の観測値に対して逐次フィルタリングと将来予測を繰り返すことで、将来予測精度を向上する。

なお、SDA-SWING法ではあくまでも個別の掘削対象スライスにおける湧水現象に対してEnKFを適用しており、式中の時刻 $T$ についても対象スライス内の経過時間であって、掘削スライスの進行とは異なるものである。その結果、将来予測を行う際に用いる新たな掘削スライスにおける透水係数は初期値のままであり、掘削実績を将来予測精度に反映させることができなかった。そこで、スライス3以降の各スライスの初期透水係数を、スライス2以前で一定値に定めた透水係数の平均値を与えることで既施工区間実績の反映を行い、将来掘削区間における予測精度の向上を図った。

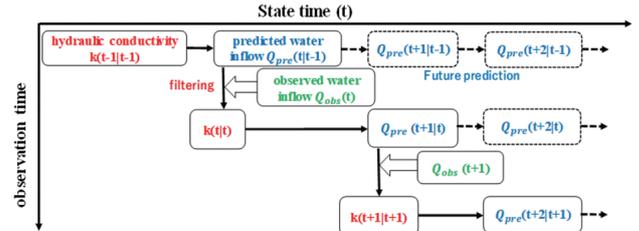


Fig. 5 SDA-SWING法における湧水量予測の更新手順  
Procedure for updating spring water prediction using SDA-SWING method

### 2.3 SDA-SWING法の課題

SDA-SWING法ではBearの式に準拠して湧水量を求めているので、掘削の進捗に伴い土被りが大きくなると、集水範囲が大きくなるので必然的に坑口湧水量はその分増加する。この対策として、平均値を用いた既施工区間のフィードバック機構を組み込んではあるが、実際の地山では地質が複雑に変化している場合が多く、平均値のみで未施工区間の地質情報の変動を反映することが不十分であると予想される。また、データ同化手法を用いているので、観測方程式を構成するパラメータ以外の観測値についてはモデル上のノイズとして取り扱わざるを得ず、それ以外の観測値についてはフィードバックすることができないという問題がある。

更に、SDA-SWING法における各スライスは独立して井戸公式が適用されており、Fig. 6に示すように切羽前方である未施工区間スライスにおいては地下水位の低下が発生しておらず、掘削進捗に伴い各スライスが解析範囲に累積されると経過時間0 (day) から初めて水位低下が発生し、その結果大きな湧水量の変動が生じる。しかし、実現現象では切羽前方には事前に奥行方向の流れに起因した地下水位低下が発生しており、掘削時にそれほど大きな湧水量の変動は発生しないと予想される。平面方向についても、Dupuitの準一様流の仮定である切羽平面方向の一次元流れのみ考慮しており、鉛直方向の流れに起因した誤差を内在した予測手法である。

## 3 DeepSWING法概要

前項に示す課題を解決するため、SDA-SWING法に2点の改善を行ったDeepSWING法を新たに開発した。本章では改善点の概要を示す。

### 3.1 改善点①：流れの次元の拡張

平面井戸問題において鉛直方向の水の流れを考慮するためには、一般的には二次元浸透流解析を実施する必要がある。しかし、西垣らはBearの式を基に水平方向・鉛直方向の水の流れを考慮できるように修正した定常流状態の流量と集水範囲に関する簡易式（以下、西垣式と称する）を提案<sup>9)</sup>している。この式をBearの式に組み込んだ場合、式 (2), (3) は以下に示す通りとなる。

$$R(t) = 1.22 \left[ \left( \frac{k}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] H_0 \left[ 1 - \left( \frac{h_0}{H_0} \right)^2 \right] \cdot \alpha(t) \quad (8)$$

$$q(t) = 0.72 H_0^{-1} k (H_0^2 - h_0^2) \left( \frac{k}{\varepsilon} \right) / \alpha(t) \quad (9)$$

$$\alpha(t) = \left[ \left\{ 1 - e^{-\frac{6\epsilon t}{\lambda_e(H_0 - h_0)}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

また、奥行方向の流れを考慮するため、Fig. 6, Fig. 7に示すように切羽前方の水位低下範囲を切羽平面方向と同等と仮定する。時刻 $t$ ,

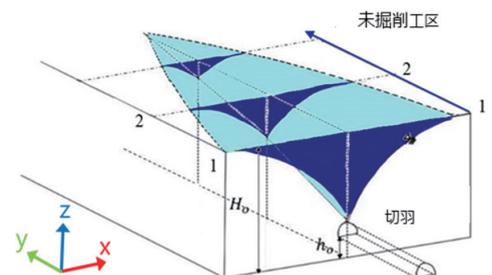


Fig. 6 トンネル切羽全面における地下水位低下  
Water level drops in front of tunnel face

掘削中の単位スライスボリュームからトンネル縦断方向の距離 $y$  (m) における地下水位低下範囲内の未掘削工区の地下水位は、Bearの式より式 (11) で表される。

$$h_{0y} = \sqrt{\frac{y}{R(t)} (H_0^2 - h_0^2) + h_0^2} \quad (11)$$

そして、式 (11) より、切羽前方の単位スライスボリュームにおける単位時間・長さあたりの湧水量である式 (12) が得られる。

$$q(t) = \frac{0.72H_0^{-1}k(H_0^2 - h_{0y}^2)\left(\frac{k}{\varepsilon}\right)^{-0.35}}{\left[1 - e^{-\frac{6\varepsilon}{\lambda e(H_0 - h_{0y})}}\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

$q(t)$  はトンネル切羽からの距離 $y$ によって変化する。よって、Fig. 6に示すように $q(t)$ を切羽前方の水位低下区間のスライスを対象として計算し、それを足し合わせることで合計湧水量 $Q$ を求める。このため、従来のSDA-SWING法とは異なり、掘削進捗に伴い新たに解析対象となる単位スライスボリュームの地下水位は、事前の掘削により既に低下していることになる。具体的にはFig. 8に示すように、事前の湧水量と等価となる経過時間 $\Delta t$ を算出し、切羽が到達した際には $q(t + \Delta t)$ を開始時刻として湧水量を求める。これにより、模擬的に三次元流れを考慮した湧水量の計算が可能になる。

### 3.2 改善点②：深層学習の導入

既施工区間の実績データを基に未施工区間の透水係数を予測する手法として、深層学習を導入した。全体の計算フローをFig. 9に示す。DeepSWING法では、データ同化の処理の中に深層学習による処理を挟み込むような形で実装している。

Fig. 10に示す通り、通常の深層学習においては予め与えられた観測ベクトルとそれに関連付けられた状態ベクトルとの関連性を学習データとし、任意の状態ベクトルに対して観測ベクトルをニューラルネットワークという内部処理によって算出し、予測を行うものである。従って、データ同化における観測方程式および状態方程式が深層学習におけるニューラルネットワークの役割を果たすので、十分なパラメータ量およびサンプル量の学習データさえ存在すれば、データ同化を実施する必要はなく、深層学習により直接解を求めることができる。

また、データ同化においては観測方程式を構成するパラメータ以外の説明変数 (= 地山特性) については全てノイズとして処理を行ったが、深層学習においては全ての説明変数に対する観測ベクトルとの相関を考慮することができる。

一方、データ同化においては観測方程式を構成するパラメータ以外の説明変数 (= 地山特性) については全てノイズとして処理を行ったが、深層学習においては全ての説明変数に対する観測ベクトルとの相関を考慮することができる。

ただし、観測方程式とは、これまでに様々な研究者が試行錯誤を繰り返して明らかにした自然界における物理法則のシ

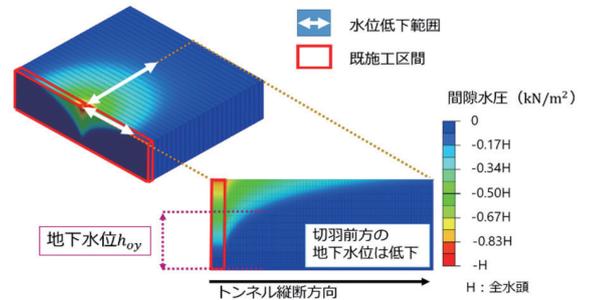


Fig. 7 DeepSWING法における地下水位分布  
 Range of groundwater level in DeepSWING method

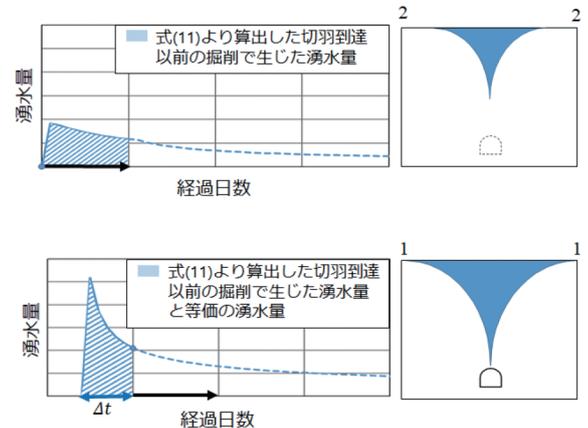


Fig. 8 トンネル掘削に伴う湧水量と地下水位の変化  
 Changes in water inflow and groundwater levels caused by tunnel excavation

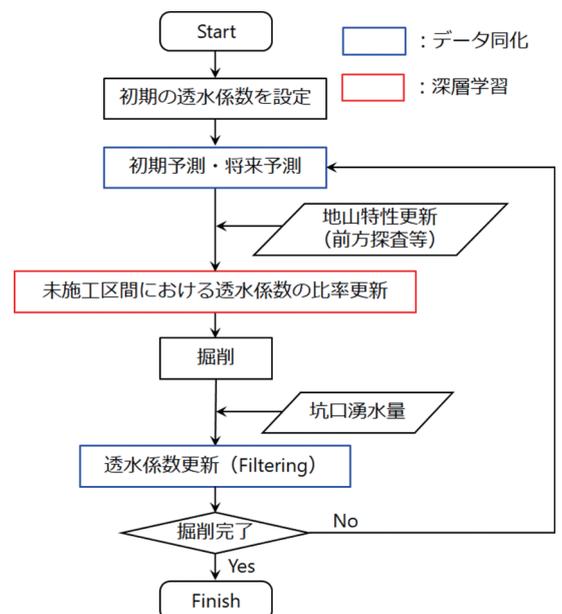


Fig. 9 DeepSWING法実施フロー  
 Processing flow of DeepSWING method

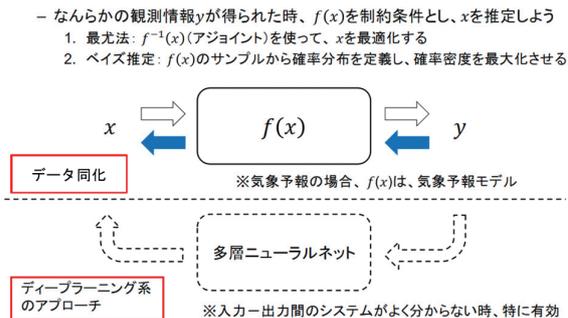


Fig. 10 データ同化と深層学習の違い  
Difference between data assimilation and deep learning<sup>10)</sup>

ミュレーションモデルであり、一定の正確性を有するものである。これらを全て破棄したうえで学習データのみを用いて深層学習を行う場合、正確な予測を行うには膨大な数の学習データが必要になると予想される。

従って、以下に示す同定手順で両手法の両立を図った。

- ・地山を掘削方向にスライス分割し、トンネル位置を考慮した二次元井戸モデルを作成する。観測ベクトルを坑口湧水量 $Q$ と、状態ベクトルを透水係数 $k$ と設定する。
- ・スライス毎に、説明変数（地山特性等）を設定する。目的変数を各スライスの透水係数 $k$ と設定する。
- ・データ同化の処理手順に従い、順解析および逆解析を用い、観測値より掘削対象スライスにおける状態ベクトルを更新する。また、後述する深層学習により求めた各岩種における透水係数の比率 $\alpha$ を用い、掘削対象スライス以外の全ての岩種における状態ベクトルを更新する。
- ・目的変数と説明変数との相関を深層学習より求め、説明変数・目的変数が更新されるたびに未施工区間における岩種毎の目的変数の比率 $\alpha$ を更新する。

Fig. 11に上記同定手順のイメージを示す。SDA-SWING法が既施工区間における同定済の透水係数を平均値化して未施工区間にフィードバックしているのに対し、DeepSWING法においては同定済の透水係数と各種地山特性との相関を学習データとした深層学習とデータ同化とを併用して未施工区間へのフィードバックを実装しており、より詳細な透水係数の分布予測が可能である。

深層学習部分の実装についてはSONYのNeural Network Consoleを用い、Fig. 12に示す通り各Node数100×7、活性化関数がReLU型の多層パーセプトロンモデルを採用した。

## 4 DeepSWING法の実トンネルへの適用

### 4.1 トンネル工事概要

Table 1にトンネル工事の概要を、Fig. 13に地質断面図を示す。本トンネル計画地域の基盤岩の大部分は新第三紀糸魚類層甲楽城火山岩類から構成され、変朽安山岩質溶岩を主体として掘削が進むにつれて凝灰角礫岩に変化する。

両岩種の境界部は沢状地形になっており、基底流量50～

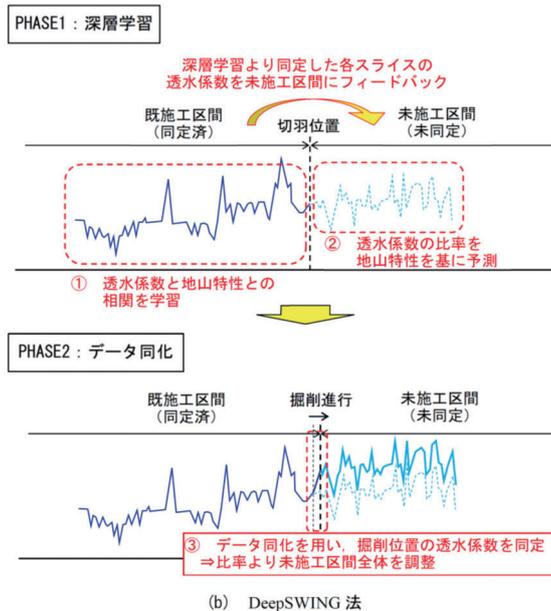
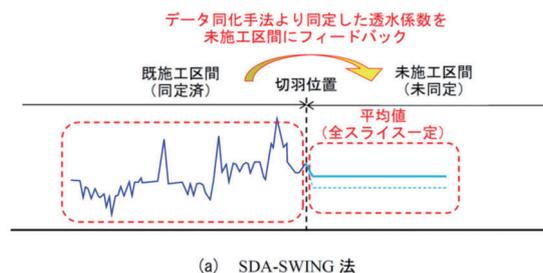


Fig. 11 透水係数の同定手順  
Procedure for identification of hydraulic conductivity

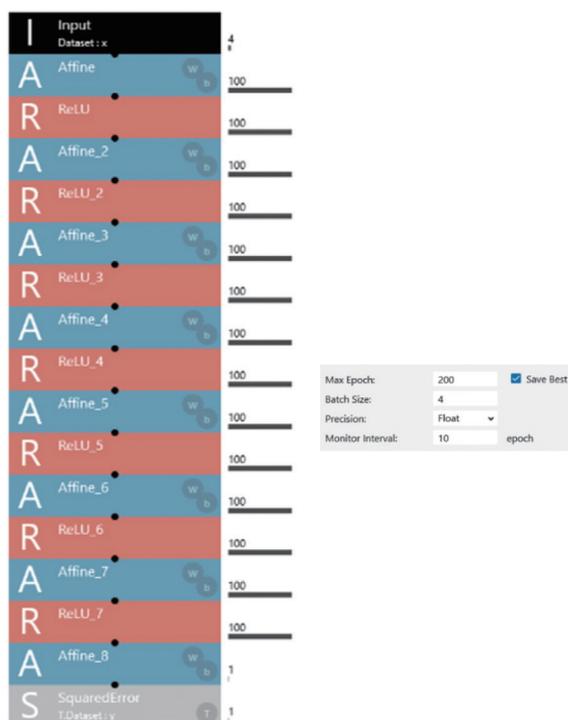


Fig. 12 深層学習構成  
Deep learning configuration

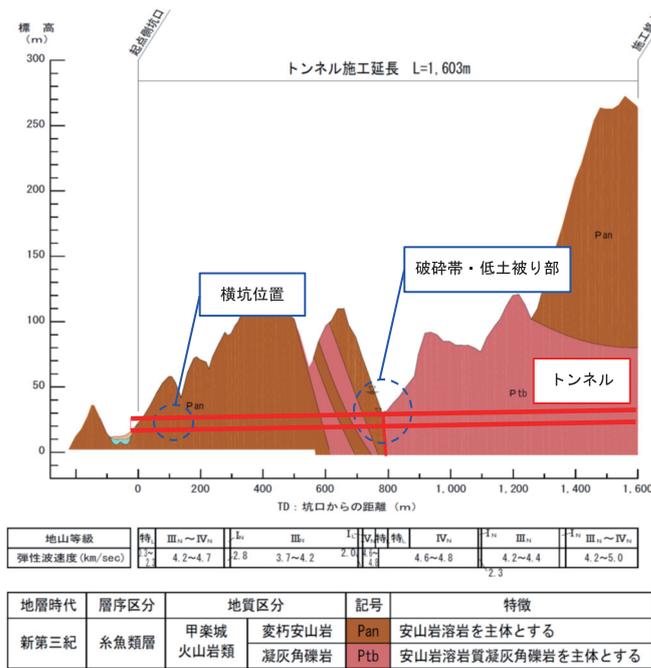


Fig. 13 地質縦断面図  
Vertical section map for geology

300 l/min程度の河川が流れているが、この部分は土被り50cmの低土被り部となっている。従って、Photo 1に示すように施工にあたり高密度ポリエチレン管φ1,000による河川の切り回しおよびセメント系地盤改良土を用いた土被りH=2.0mの保護盛土の設置を行った。また、用地買収の都合により坑口からの工事着手ができず、別途横坑を設置してTD=110mの位置から掘削を開始した。更に、想定外の破碎帯を事前に把握するため、全線にわたりDRISS<sup>11)</sup>による切羽前方を対象とした穿孔エネルギー探査を30mおきに実施している。実際の施工においては、上記対策の効果が発揮され、また想定以上に地山が均質であったため、突発湧水が確認されることなく無事に竣工を迎えることができた。

#### 4.2 予測精度の検証

DeepSWING法において使用した説明変数をFig. 15に示す。透水係数と関連付けるための説明変数は土被り、間隙率、弾性波速度、穿孔エネルギーの4項目とした。このうち、土被りおよび弾性波速度は設計時の調査結果（地形測量・弾性波探査）より設定し、穿孔エネルギーは施工時に実施したDRISSにて得られた値を用いた。地山の間隙率については、地質縦断面図と文献<sup>12)</sup>を参考にTable 2のように定めた。

SDA-SWING法およびDeepSWING法を用いて、TD=700m地点までの同定実績を基にそれ以降の坑口湧水量を予測した結果をFig. 16に示す。SDA-SWING法においては予測区間の透水係数を既施工区間の平均値として一定値で設定しているのに対し、DeepSWING法においては特に穿孔エネルギーの値を参考に地山条件に応じた細かな透水係数の変化を設定しているのが分かる。また、SDA-SWING法においては、特にTD=1,200m以降において、急激に土被りが増加するのに従って坑口湧水量を過大に予測している。これは、観測方程式においては、土被りが増加するに従い湧水量も増

Table 1 トンネル工事概要  
Tunnel construction overview

|       |                  |
|-------|------------------|
| 工事名   | 北陸新幹線第2福井トンネル工事  |
| 延長    | 1.6km            |
| 内空断面積 | 75m <sup>2</sup> |
| 最大土被り | 約240m            |
| 支保形式  | NATM             |
| 掘削工法  | 上半先進ベンチカット工法     |
| 岩種    | 凝灰角礫岩、変朽安山岩質溶岩   |



(a) 河川切り回し・保護盛土掘削完了



(b) 保護盛土設置完了

Photo 1 低土被り部におけるトンネル保護工  
Tunnel protection for low ground cover area

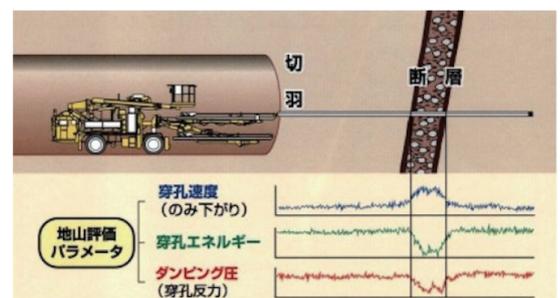


Fig. 14 DRISS概要<sup>11)</sup>  
DRISS overview

Table 2 岩盤種別と間隙率との関係  
Relationship between rock types and porosity

| 岩質    | 風化程度         | 間隙率  |
|-------|--------------|------|
| 変朽安山岩 | ある程度風化の進んだもの | 0.1  |
| 凝灰角礫岩 | 新鮮           | 0.05 |
| 破碎帯   | 固結土の低いもの     | 0.6  |

加することに起因している。それに対し、DeepSWING法においては既施工区間の傾向を深層学習による処理を行うことにより、土被りが増えても湧水量は一定であることを学習し、その分土被りに反比例して透水係数を小さく自動設定した結果、土被りとは無関係に湧水が発生しないという実際の坑口湧水量の特徴を捉えた精度の高い予測となっている。このように、SDA-SWING法やDeepSWING法によって同定された透水係数は原位置透水試験等で求められる観測値と違い、データ同化において観測方程式や深層学習に伴うモデル化誤差を内在するものであることに注意が必要である。

## 5 結論

山岳トンネル工事における地下水影響評価手法の一つであるSDA-SWING法について、将来予測精度向上のために2種類の改善を行ったDeepSWING法を開発した。また、本手法を実際のトンネル工事において取得された施工データに適用し、坑口湧水量の将来予測精度が向上することを確認した。本手法が山岳トンネル工事における地下水情報化施工法の確立の一助になれば幸いである。

## 謝辞

本論文を執筆するにあたり、大阪大学大学院工学研究科の久保田恭行氏（現所属：熊谷組）に多大なるご協力をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 樋口知之, 上野玄太, 中野慎也, 中村和幸, 吉田亮: データ同化入門—次世代のシミュレーション技術, pp.78-100, 朝倉書店, 2011
- 淡路敏之, 蒲池政文, 池田元美, 石川洋一: データ同化—観測・実験とモデル融合するイノベーション, 京都大学学術出版会, pp.63-92, 朝倉書店, 2011
- 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
- Koyama, T., Kogiso, J., Takahashi, K., Yasuda, T., and Ohnishi, Y.: Development of SWING method with sequential data assimilation (SDA-SWING) and its application to road tunnel construction, Tunneling and Under-ground Space Technology, Vol.28, pp.229-237, 2012
- Bear, J.: Dynamics of Fluids in Porous Media, Dover Publications Inc, pp.403-423, 1972
- Mitchell, J.: Machine Learning, McGraw Hill, New York, Vol.2, 1997
- Bishop, C.: Neural Network, pp.225-287, 2007
- 菅原正巳: 水文学講座7 流出解析法, 共立出版, 1972

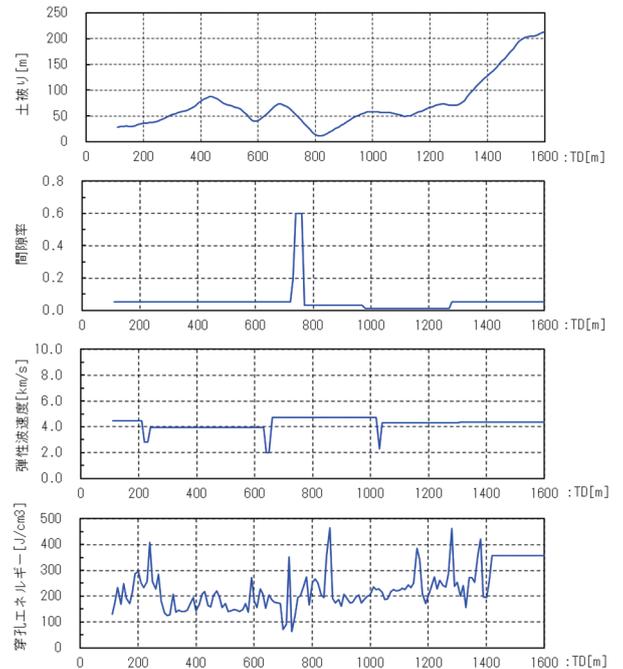


Fig. 15 深層学習における説明変数  
Explanatory variables in deep learning

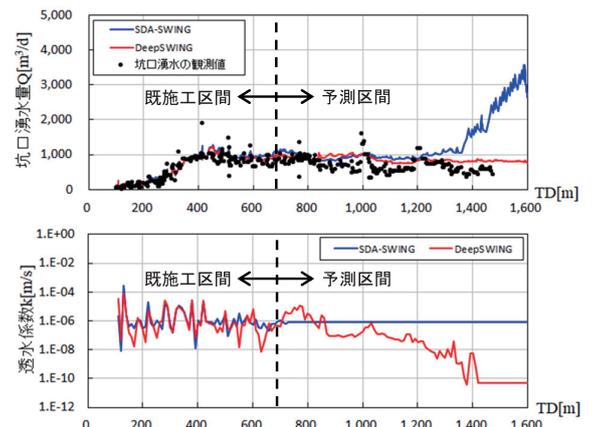


Fig. 16 SDA-SWING法とDeepSWING法による解析結果  
Analysis result for SDA-SWING/DeepSWING method

- 9) 西垣誠, 小松満, 入江彰, 矢野耕一郎, 太田拓郎: 山岳トンネル掘削時の地下水変動の簡易的予測と適用性, 土木学会論文集, No.778/Ⅲ-69, pp.125-137, 2004
- 10) 加藤博司: CAE, CPSとデータ同化のつながり, 第2回理研データ同化ワークショップ, 2017
- 11) 西松建設: NISHIMATSU TECHNICAL REPORT-DRISS, 2011
- 12) 土木学会: 水理公式集 (2018年版), 2019
- 13) Mori, M., Kubota, Y., Yasuda, T., and Nishiyama, S.: Influence of flow dimension on prediction of spring water for mountain tunnel excavation, International Journal of GEOMATE, Vol.18, No.66, pp.92-101, 2020
- 14) 久保田恭行, 森守正, 安田亨, 小山倫史, 西山哲: トンネル施工時の湧水量の予測手法の拡張と実トンネルへの適用, 地盤工学ジャーナル, Vol.17, No.2, pp.135-145, 2022
- 15) 鈴木誠, 百田博宜, 神野健二, 長谷川誠: 準三次元浸透流解析による地表流出量と空洞湧水量の評価法, 土木学会論文集, No.677/Ⅲ-55, pp.21-31, 2001
- 16) 河野伊一郎, 西垣誠: 有限要素法による広域地下水の準三次元解析, 岡山大学工学部土木教室, Report, No. 82-1, 1982
- 17) Fujinawa, K.: Finite-element analysis of groundwater flow in multiaquifer system, I. The behavior of hydrological properties in an aquitard while being pumped, Journal of Hydrology, Vol.33, pp.59-72, 1977
- 18) Fujinawa, K.: Finite-element analysis of groundwater flow in multiaquifer system, II. A quasi three-dimensional flow model, Journal of Hydrology, Vol.33, pp.349-362, 1977
- 19) 大島洋志, 西森紳一: トンネル工事を対象とした水文調査の研究, 鉄道技術研究報告書, No.1108, 1979
- 20) 大島洋志: トンネル掘削に伴う湧水とそれに伴う水収支変化に関する水文地質学的研究, 鉄道技術研究報告書, No.1228, 1983
- 21) 須藤賢, 杉江茂彦, 鈴木健一郎, 鳥井原誠: 山岳トンネル掘削における地下水環境影響評価システムの研究, 大林組技術研究所報, No.68, pp.1-6, 2004