

地下水環境に着目した地山予報システムの開発

福田 毅¹・吉河 秀郎²・細野 賢一³・岩永 昇二⁴

¹ 正会員 清水建設株式会社 地下空間統括部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1)
E-mail: tys.fukuda@shimz.co.jp

² 正会員 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: s-yoshikawa@shimz.co.jp

³ 正会員 株式会社地層科学研究所 解析チーム (〒242-0017 神奈川県大和市大和東 3-1-6)
E-mail: hosono@geolab.jp

⁴ 正会員 株式会社地層科学研究所 開発チーム (〒242-0017 神奈川県大和市大和東 3-1-6)
E-mail: iwanaga@geolab.jp

近年, IoT, ICT 技術の発展にともない, 施工に関わるデジタルデータが容易に取得できる環境が整備されてきている. 本稿では, このようなデジタルデータと数値シミュレーション技術を融合させ, デジタルツインの概念を基本とし, 山岳トンネル掘削時に取得される「切羽湧水量」および「施工時地山調査結果」を仮想空間に再現し, これらの情報を更新し, 近い未来に生じる湧水量を数値シミュレーションする基本システムを構築した. 本システムで予測した情報は, オンタイムに誰もが理解しやすい形で情報発信できるため, リスク回避しながら安全安心の施工に寄与できる技術である.

Key Words: mountain tunnel forecasting system, digital twin, numerical simulation, water inflow

1. はじめに

山岳トンネルの技術は, 矢板工法から NATM に変わり約半世紀になる. その間, 掘削方法の工夫, 補助工法の開発, 施工機械の大型化など多様な進歩にともない, 山岳トンネルの施工性, 生産性, 効率性は, 飛躍的に向上してきた. これに加え, 近年では ICT 技術の目覚ましい発展もあり, 様々なデータを収集, 可視化, 分析することで, 調査設計段階では施工計画の検討, 施工段階ではデジタルデータを活用した施工管理, ロボット化・自動化, 維持管理段階では最終成果物であるトンネルの機能・性能情報のデジタルデータ化, 等が加速度的に発展し標準化されようとしている. これにより現場職員や作業員にとって新たな付加価値である生産性や安心安全のサービスが提供されるようになってきている.

このような背景の中, 近年ではデジタルツインが注目されている. デジタルツインとは, IoT により取得したデータを活用し, 現実 (フィジカル) 空間のモノ・コトを仮想 (サイバー) 空間に再現し, リアルタイムに現実と仮想を連携するシステムを意味するものである. 仮想空間に集約された情報をもとにシミュレーションを行うことで現実空間でのトラブルや変化などが予測可能とな

るため, 幅広い分野で適用されている概念である.

本稿では, デジタルツインの概念を基本¹⁾とし, 山岳トンネル掘削時に取得される様々な情報のうち「切羽湧水量」および「施工時地山調査結果」を仮想空間に再現し, リアルタイムにこれらの情報を更新し, 近い未来に生じる予兆をシミュレーションにより精度よく予測する基本システムを構築した. また, このシステムにより予測された情報は, 専門技術者だけが理解できる情報とするのではなく, 現場職員やトンネル掘削の最前線で作業している坑夫などにもわかりやすい形で日々ガイダンスを提供することを基本思想としてシステム構築した.

このような仕組みは, 気象予報で行われる“数値予報”に着想を得ている. 数値予報とは, 気象に関する観測, 予報の実行, 気象予報の作成・発表の処理から構成されている. このような仕組みになぞらえて本システムは“地山予報”と称している.

本報告では, 山岳トンネルにおける地山予報システムの概要を述べるとともに, 本システムのコア技術である 3 次元地質構造の逐次更新, 迅速な浸透流解析を実現する仮想ドレーンモデル, および A I による浸透特性 (透水係数) の同定手法について述べる. 最後に本システムの実証結果について報告する.

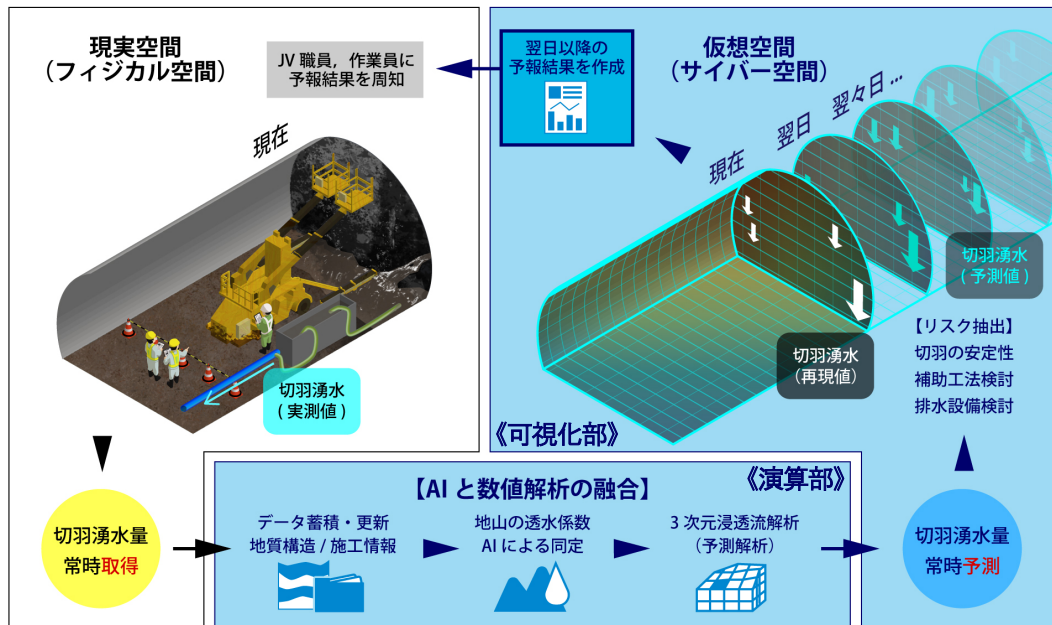


図-1 地下水環境に着目した地山予報システムの概念

2. 地山予報システムの概要説明

地下水環境に着目した地山予報システムの概念図を図-1に示す。本システムは、デジタルツインを基本概念とする「現実空間（フィジカル空間）」および「仮想空間（サイバー空間）」から構成されている。現実空間では、地下水環境の予測にとって基本情報となる切羽湧水量を常時測定し、日々の総湧水量を監視する。一方、仮想空間では、演算部と可視化部に大別できる。演算部は、各種データの蓄積、地質情報の更新、AI 技術を使った地山の浸透特性（透水係数）の同定、地下水環境を再現する数値解析を融合させて、将来起こる事象を予測する。可視化部は、数値解析で得られた予測値を3次元地質モデルに描画し、計測結果等とあわせて確認することができる。仮想空間上の情報は誰にでもわかる帳票等として出力し、現実空間へ返す「予報」を行う。このサイクルは、1日に1サイクルを基本として自動的に実行され、日々の朝礼等で継続的に活用することでリスクや安全管理の持続に貢献するとともに、現場支援を目的とした専門技術者の負担軽減としても期待している。

このシステムを運用する中で最も重要な情報は、トンネル周辺の地質情報である。予測解析に最も影響を与える地質情報は、通常、前方探査（先進ボーリング、反射法弾性波探査、削孔検層など）を行い、切羽前方の地質分布を想定しながら掘削が進められる。しかし、複数の結果を総合的に判断して3次元地質モデルを作成するには専門的な知識や経験のみならず、モデルを作成するための多大な作業時間が必要となる。

そこで、本システムでは吉河²⁾の提案する3次元地質モデル逐次更新手法を本システムに導入し、地下水環

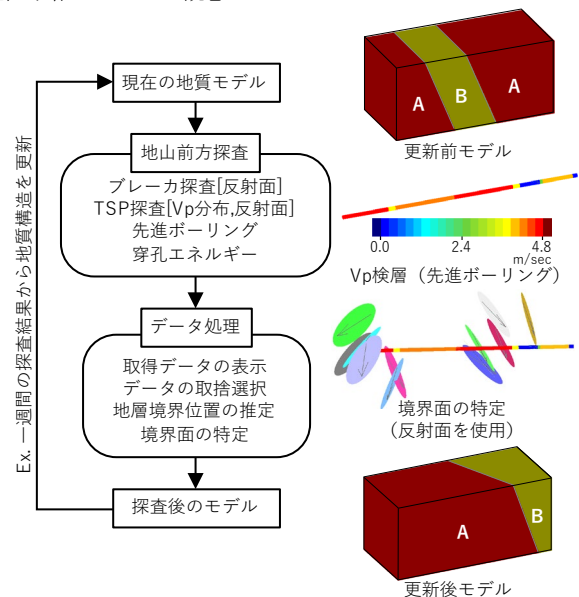


図-2 3次元地質モデル逐次更新手法²⁾

境の自動予報の精度向上を図っている。図-2に3次元地質モデル逐次更新手法の手順を例示する。この手順は、先進ボーリングによる V_p 検層を実施し、かつ弾性波探査による反射波データを使用した場合の例である。取得した V_p から地質もしくは硬軟の境界位置の特定を自動演算で行う。反射面は岩盤密度の境界位置と想定できるため、上述の V_p による境界位置近傍の反射面を岩盤密度の境界面として選択する。それらの結果を更新前モデルに直ちに反映させ、モデルの更新を行う。地質モデルの更新頻度は、一週間程度を想定している。

以下、予測解析に関わる演算部の AI 技術を使った地山の浸透特性（透水係数）の同定、および細野ら^{3,4)}の提案する迅速な浸透流解析を実現する仮想ドレーンモデルについて、概要を説明する。

3. 3 次元浸透流解析

図-1 に示した演算部の AI 技術を使った地山の浸透特性（透水係数）の同定と迅速な浸透流解析を実現する仮想ドレーンモデルは、トンネル切羽で測定した切羽湧水量を取得すると、自動的に演算が開始され、予測解析結果まで出力される仕組みである。それぞれの技術の概要について説明する。

(1) AIによる透水係数の同定

機械学習を行うにあたって、Kaggle などのデータ分析コンペティションにおいてよく利用されている機械学習技術の 1 種である勾配ブースティング決定木 (Gradient Boosting Decision Tree, 以下 GBDT) ⁹⁾を採用した。この手法は、その他の機械学習のアルゴリズムに比べて、精度・計算速度ともに優れていた手法として知られている。

GBDT とは、基本的に決定木を用いて回帰あるいは分類問題を解き、誤差の大きい決定木の損失関数の値が小さくなるように新たな決定木を構築し、モデルを改善していく手法であり、アンサンブル学習の一つである（図-3）。この GBDT に学習させる説明変数として「掘進距離」，「トンネル径」，「降雨量」，「土被り（初期地下水位）」，「湧水量」を用い、目的変数として「透水係数」とした。これにより「湧水量」から「透水係数」を推定することが可能となる。

学習に用いる教師データの構築においては、図4に示すような単純モデルを用いて解析を実施した。

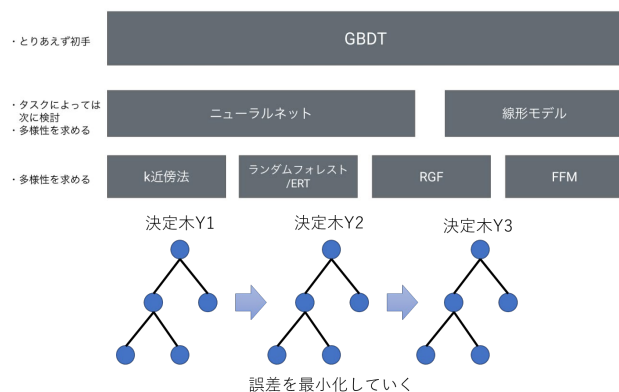


图-3 GBDT

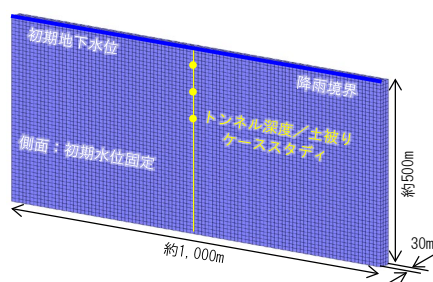


図4 教師データ作成用モデルの一例

(2) 仮想ドレーンの基礎方程式

仮想ドレーンモデルは、3次元FEM解析のような厳密解を解くのではなく、単純に定式化された井戸公式を使いトンネル軸線からの距離に応じた流量配分を近隣節点にあてて排水効果を迅速に求めている。そのためFEM解析のようにトンネル形状を要素分割で表現せずともトンネル掘削による排水効果を三次元的に表現できる。また、演算速度も格段に速くすることが可能となる。解析の精度、計算時間の向上に関する分析結果については、別途著者がまとめているので参照されたい^{3,4)}。以下、仮想ドレーンの基礎方程式を示す。

トンネル近傍ではトンネル壁面の法線方向（円筒形の径方向）にダルシー則にしたがって様に地下水流れが生じているものとする．地山の透水係数を k ，径方向の座標を r ，全水頭を h として，地下水の流速 u は式(1)のように表される．

$$u = -k \frac{dh}{dr} \quad (1)$$

要素を横断するトンネル（円筒形）のうち、要素内部に存在する長さを L とし、この区間では長さ方向に均一に動水勾配（ dh/dr ）が生じているものとすれば、この区間のトンネル壁面からの単位時間あたりの湧水量 Q_e は、式(2)で与えられる。

$$Q_e = -2\pi Lu = 2\pi Lk \frac{dh}{dr} \quad (2)$$

トンネルの壁面 ($r = r_0$) と壁面から離れた場所 ($r = r_1$) において, 全水頭がそれぞれ h_0 と h_e に保たれた場合には, Q_o は次のように求められる.

$$\int_{h_0}^{h_e} dh = -\frac{Q_e}{2\pi Lk} \int_{r_0}^{r_1} \frac{dr}{r} \quad (3)$$

$$h_e - h_0 = -\frac{Q_e}{2\pi Lk}(\ln r_1 - \ln r_0) \quad (4)$$

$$Q_e = -2\pi Lk \frac{h_e - h_0}{\ln(r_1/r_0)} \quad (5)$$

上式で表される要素内に存在するトンネル区間における単位時間あたりの湧水量 Q_e を求めるためには、 h_0 、 h_e 、 r_0 、 r_1 を適切に定める必要があるが、ここでは次のように考えることとした。

トンネルが存在する要素では、各要素構成節点で全水頭が求められるが、この節点値の平均的な値を h_e とする。具体的には、各節点の全水頭 h_i に重み係数 w_i を乗じたうえで加算し、これを h_e とした(式(6))。

$$h_e = \sum_{i=1}^{N_e} w_i h_i \quad (6)$$

ここに、 N_e は要素構成節点数である．なお、本手法では4節点四面体、6節点五面体、8節点六面体の一次要素を想定している．

重み係数 w_i は、式(7)に示すとおりトンネル軸と各節点との距離 l_i に反比例する重みとなっており、 h_e はトンネル軸に近い節点の全水頭値 h_i に対して、より大きな重みを付けて平均化し求めている． l_i には要素内に存在するトンネル軸の midpoint と各節点の距離を用いた（図-5）．重み係数の合計はとして式(8)に示すとおり 1 となる．

$$w_i = \frac{1/l_i}{\sum_{j=1}^{N_e} (1/l_j)} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{N_e} w_i = 1 \quad (8)$$

r_1 には、トンネルを内包する要素の体積 V_e に等しい体積を持つ球の半径を用いた（式(9)）．

$$r_1 = 0.5V_e^{1/3} \quad (9)$$

また、トンネル壁面の全水頭 h_0 には、ここでの圧力水頭を 0m とするため、要素内に存在するトンネル軸の midpoint の、基準面からの高さを用いた． r_0 はトンネルの半径であるが、トンネル断面と等しい断面積の円の半径とした．仮想ドレーンモデルでは、式(5)より求まる単位時間あたりの湧水量 Q_e を掘削該当要素内で生じた吸込み量とし、これを 3 次元非定常有限要素解析に組み入れ、一定時間後の要素構成節点における新しい水頭値 h_i を求める．この値とトンネルの長さの変化をもとに湧水量 Q_e の値を更新し、以下この作業を繰り返して水頭分布の変化を求めた．

計算には Q_e の節点値 q_i が必要であるが、 h_e を定めた場合と同様の関数を用い、要素内のトンネル軸の midpoint からの距離で重みを付けて各節点に吸込み量を配分した．

$$q_i = w_i Q_e \quad (10)$$

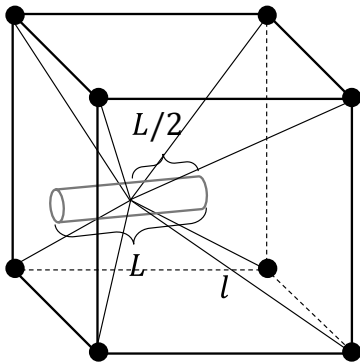


図-5 要素内の仮想的なトンネルと節点との距離

4. 実湧水量データによるシステム検証

(1) 木場トンネル湧水量データと検証区間の施工概要

木場トンネルは、九州新幹線（西九州ルート）は武雄温泉・長崎間の工事延長約 67km の整備新幹線のうち、長崎県大村市内に位置する延長 2,885m の山岳トンネルである．本トンネルは青函トンネル以来となる海拔ゼロメートル以下を通過するため、トンネル掘削にともなう坑内湧水量とトンネル周辺の水環境に与える影響が懸念されていた．なお、掘削は既に完了している．

図-6に木場トンネルの地質縦断面図を示す．本システムの検証として、坑口より約 230m の主に角礫凝灰岩が分布する区間を設定した．本報告ではシステム検証を目的とするため、現場閉所日や掘削実績のない日等は考慮せず 45 日間のトンネル掘削の実績を模擬した．実施工で取得された日湧水量（図-7）をもとに AI が同定する透水係数、これを入力値とした仮想ドレーンモデルによる浸透流解析結果（翌日以降の予測値）を確認し、本システムの適用性について検証を行った．

(2) 解析条件

図-7 に九州新幹線(西九州ルート)木場トンネルの解析モデルを示す．解析対象領域において、河川および海岸線には圧力水頭 0m の水位固定境界を設定した．また、地表面には実測の降雨条件を与えた．

表-1に現場の試料を使った透水試験を実施して得られた各岩盤の透水係数を示す．この透水試験結果を解析に用いる透水係数として設定し、検証区間が角礫凝灰岩が広く分布していることから、角礫凝灰岩の透水係数のみ AI で同定した透水係数を採用することとした．したがって、解析に用いる透水係数は、表-2のとおりである．

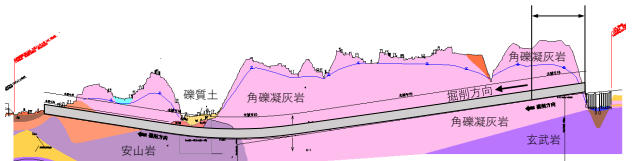


図-6 木場トンネル地質縦断面図

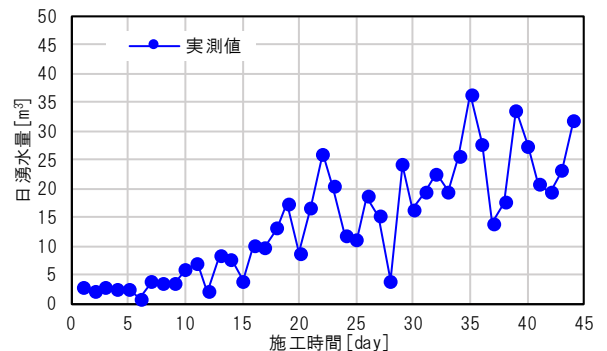


図-7 日湧水量の実測データ

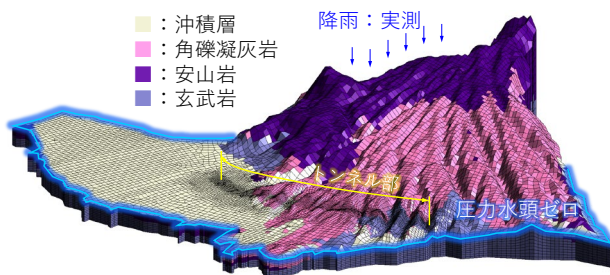


図-8 木場トンネル解析モデル

表-1 透水試験で得られた透水係数

岩 種	透水係数[cm/sec]
礫質土 Ag	7.24×10^{-4}
角礫凝灰岩 Kcg	$2.53 \times 10^{-4} \sim 1.22 \times 10^{-5}$
安山岩 Kan	5.11×10^{-4}
玄武岩 Mba	実測なし

表-2 解析に入力した透水係数

岩 種	透水係数[cm/sec]
礫質土 Ag	7.24×10^{-4}
角礫凝灰岩 Kcg	AI による同定結果
安山岩 Kan	5.11×10^{-4}
玄武岩 Mba	5.00×10^{-5}

(3) 検証結果

図-7に示した日湧水量の実績値に対して、AIがそれぞれの日に同定した透水係数を経時的に整理したものが図-9となる。角礫凝灰岩の透水係数は、表-1に示すように現場試料を使った透水試験では、 $k=2.53 \times 10^{-4} \sim 1.22 \times 10^{-5}$ [cm/sec]であった。一方、AIが同定した透水係数は、施工開始1週間程度は1オーダー程度透水性が小さい同定結果を出力した。しかし、施工開始後、20日程度経過後では、透水試験結果と同程度のオーダーとなった。本来、施工当初から主に角礫凝灰岩が分布していたことを鑑みると、試験値程度の透水係数が同定されるべきである。このような結果に至った要因としては、教師データの質が問題であると考えている。

次に、10日後と30日後の切羽位置に着目して、AIの同定した透水係数、およびこの値を解析入力値として予測解析を実施した結果について考察する。表-3は、10日後、および30日後にAIが透水係数を同定した結果である。ここに、10日後の透水係数とは、10日後までの掘削は完了しており、10日後までの湧水量の実測値をもとに透水係数を同定、11日以降の湧水量は解析で得られた予測値を意味している。30日後も同様である。

図-10に10日後のAIが同定した透水係数、および予測解析結果を示す。10日後にAIが同定した透水係数は、上述したように1オーダー程度試験値より低かったため、11日以降の湧水量予測値は実測値に対して少ない湧水

量予測となった。

同様に、図-11に30日後のAIが同定した透水係数、および予測解析結果を示す。30日後にAIが同定した透水係数は、概ね試験値と同程度であったことから、31日以降の湧水量予測値は実測値と概ね同程度となった。

以上のことから、施工開始1週間程度は、予測精度は高くないものの、施工開始30日程度であれば、予測精度は段階的に向上していくことがわかった。また、本システムの課題として、教師データの質がAIの同定結果に影響を与える可能性があることも明らかとなった。

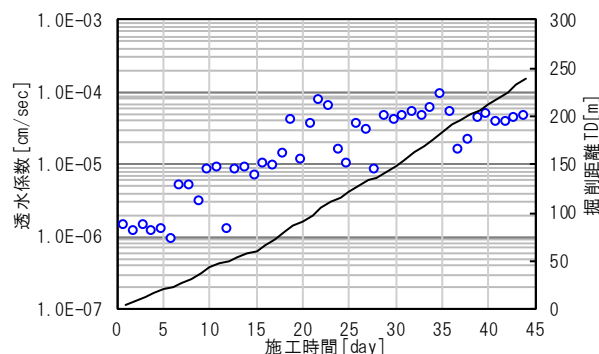


図-9 日湧水量を利用したAIによる透水係数の同定

表-3 AIが算出した凝灰角礫岩の透水係数

経過日数	透水係数[cm/sec]
10日後	8.59×10^{-6}
30日後	4.16×10^{-5}

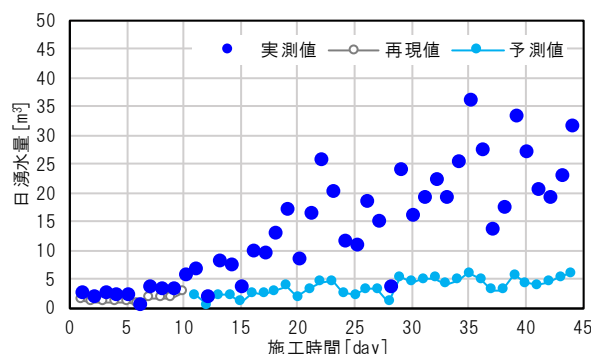


図-10 10日後のAI導出値を用いた再現および予測解析結果

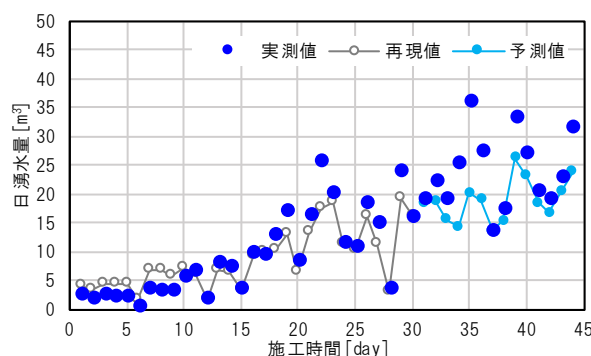


図-11 30日後のAI導出値を用いた再現および予測解析結果

5. まとめ

本システムのコア技術である3次元地質構造の逐次更新、迅速な浸透流解析を実現する仮想ドレーンモデル、およびAIによる浸透特性（透水係数）の同定手法について、それらの概要を説明するとともに、本システムの実証結果について報告した。

結果として、課題はまだあるものの、日々の切羽湧水量に応じてAIが透水係数を同定し、近い未来に生じる湧水量をある程度精度よく予測することができた。また、均質な地山でも日々変化する切羽湧水量を精度よく捉え予測することができた。

以上より、課題解決に向けて教師データの見直しを行うとともに、今後施工中のトンネル現場において、オンタイムな現況再現と湧水量予測を行い、リスクを日々報知する「地山予報」システムを改良、展開していく予定である。このシステムの概念は、水収支解析のみならず、力学解析にも応用できるシステムであり、並行して開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 清水建設株式会社：中期デジタル戦略にもとづきデジタル化コンセプトを策定～デジタルゼネコンを目指して～，<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2021/2021023.html>
- 2) 吉河秀郎，福田毅，松尾勝司：三次元地質モデルの逐次更新方法の提案，土木学会第76回年次学術講演会，VI-199，2021.9.
- 3) 江島武，藤野晃，福田毅，細野賢一：仮想ドレーンモデルの実用化を目指した現場実証解析，土木学会第73回年次学術講演会，VI-024，2018.09.
- 4) 細野賢一，福田毅，藤野晃：仮想ドレーンモデルを適用した地下水情報化施工の試み，トンネル工学報告集，第28巻，I-35，2018.11.
- 5) 門脇大輔，阪田隆司，保坂佳祐，平松雄司：Kaggleで勝つデータ分析の技術，技術評論社，2019.9.

(2021. 8. 6 受付)

DEVELOPMENT OF A FORECASTING SYSTEM OF MOUNTAIN TUNNEL BASED ON THE GEOLOGIC AND GROUNDWATER CONDITIONS

Tsuyoshi FUKUDA, Shuro YOSHIKAWA, Kenichi HOSONO and Shoji IWANAGA

In recent years, with the development of IoT and ICT technologies, an environment has been created in which digital data related to construction can be easily obtained. In this paper, we have developed a system based on the concept of digital twin, which integrates digital data and numerical simulation technology. First, the system reproduces in a virtual space the "water inflow rate at the face" and "results of the geological survey at the time of construction," which are acquired during tunnel excavation. Next, the system updates these information on time. Finally, the system uses numerical simulations to constantly predict signs (water inflow and geological changes) that will occur in the near future. The information predicted by this system can be disseminated on time in a form that can be easily understood by anyone. Therefore, this system is a technology that can contribute to safe and secure construction.