

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

江島 武¹・細野 賢一²・里 優³・福田 毅⁴・藤野 晃⁵

¹正会員 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)
E-mail:ejima.tak-3t4n@jr-tt.go.jp

²正会員 (株) 地層科学研究所 地下環境事業グループ (〒242-0017 神奈川県大和市大和東三丁目1-6)
E-mail:hosono@geolab.jp

³正会員 (株) 地層科学研究所 (〒242-0017 神奈川県大和市大和東三丁目1-6)
E-mail:sato@geolab.jp

⁴正会員 清水・岩田地崎 特定建設工事共同企業体 (〒258-0112 神奈川県足柄上郡山北町岸3709-8)
E-mail:tys.fukuda@shimz.co.jp

⁵正会員 清水・青木あすなろ・菱興 特定建設工事共同企業体 (〒856-0044 長崎県大村市岩松町150-1)
E-mail:fujino@shimz.co.jp

施工中のトンネル現場における坑内湧水の発生は、施工の安全性や対策工の実施など工期延長に影響を与える。一般に坑内湧水量の予測には3次元浸透流解析などの数値解析技術が用いられる。精度の良い予測値を得るには3次元的な地質構造の把握は不可欠であるが、解析モデル作成の労力や計算時間の増大が課題となる。結果として、現場の意思決定のタイミングで予測値を提示することが難しくなる。そこで、本稿では「トンネル構造物のモデル化（要素分割）を行わずとも排水効果が得られる3次元浸透流解析手法（これを“仮想ドレーンモデル”と称す）」を適用し、同手法による解析結果とトンネル周辺の地下水位や施工中の坑内湧水量の実測データとの精度および計算時間の確認を行い、地下水情報化施工の支援ツールとしての有効性を示した。

Key Words : tunnel, groundwater analysis, computerized construction, hydrogeological structure

1. はじめに

従来よりトンネル施工では、現場計測を行うことにより、設計時の予測と異なる種々の地盤、構造物の情報を得て、次工程の施工に役立てることにより、経済的で安全な施工を行う建設手法（情報化施工）が適用される。一般に現場計測とは、トンネル坑内、およびその周辺の変位挙動を計測することを意味するが、本論文ではトンネル周辺の地下水位、坑内湧水量を計測することによる地下水情報化施工を考える。

トンネル掘削時の坑内湧水は施工の安全性や作業性の妨げとなる。また、湧水量の大きさによっては対策変更を含め、施工計画の再検討を余儀なくされる場合もある。

トンネル計画段階においては、地質構造、地下水賦存状態（地下水分布）、各地質の透水係数などが調査ボーリング等によって把握され、主にトンネル縦断図として

整理される。しかし、施工段階においては想定よりも早期に坑内湧水量の増加が認められたり、想定以上の量が発生する場合がある。これらは事前に把握できなかった地層構造の不規則性や高透水帯の存在といった水理地質構造としての不確実性が要因と考えられる。

地下水情報化施工を考える上では、これらの不確実性を迅速に把握し、次施工へフィードバックする定量評価を迅速に提供できるかが課題となる。すなわち、切羽観察や湧水傾向に変化が認められた段階で、速やかに湧水予測を更新できる手法が求められる。

本論文では「トンネル構造物のモデル化を行わずとも排水効果が得られる3次元浸透流解析手法（これを“仮想ドレーンモデル”と称す）」を適用して、トンネル周辺の地下水位や施工中の坑内湧水量の実測データとの精度比較・計算時間を確認するとともに、同手法の地下水情報化施工の支援ツールとしての有効性を確認する。

2. 九州新幹線木場トンネルの概要と地質分布

木場トンネルは、九州新幹線（西九州ルート）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る。

解析対象領域は、図-1に示す地形データ²⁾を利用して、海岸線や河川および尾根といった水理境界を判読し、木場トンネルの掘削影響が境界条件に用いられる水位固定条件に影響しない範囲を念頭に、十分に包含する範囲を選定した。解析範囲はおよそ10km×10kmである。

木場トンネルは、多良岳（山頂標高966m）の南西方向の裾野に位置しており、多良岳の噴火に影響された火山岩主体の地質構成となっている。多良岳の詳細な地質構造³⁾は、図-2(a)に示すように多良岳山頂付近に古期安山岩類が分布し、木場トンネル周辺は火山麓扇状地堆積物が広く分布している。また、海岸線に近い低地部は沖積層が堆積しており、部分的に多良岳古期玄武岩類が露頭している。平面図中央付近にあるA-A'位置において地質断面がまとめられており、図-2(b)に示すように多良岳古期玄武岩類が基盤岩であることがわかる。また、火山麓扇状地堆積物の岩種は、図-3に示す木場トンネル地質縦断面図から凝灰角礫岩と解釈される。

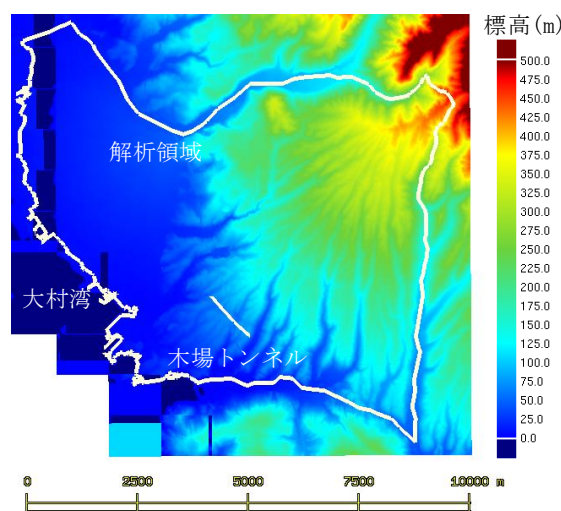


図-1 木場トンネル周辺の地形等高線図

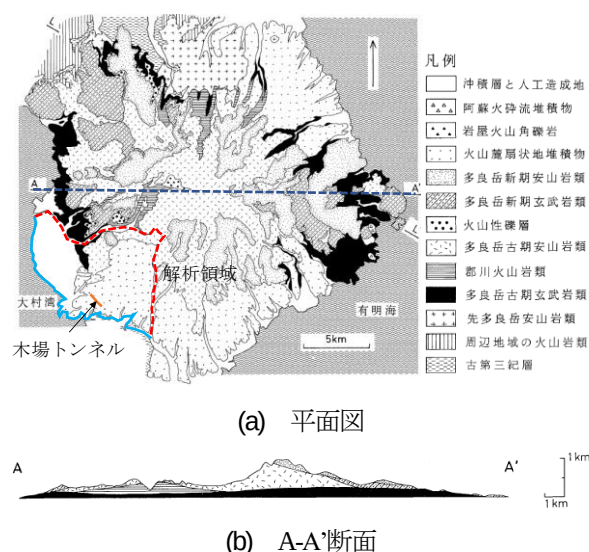


図-2 多良岳周辺の広域地質図

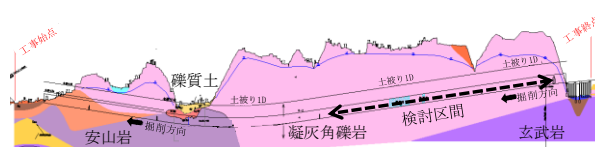


図-3 木場トンネル地質縦断面図

3. 仮想ドレーンモデル

(1) 基礎方程式

仮想ドレーンモデルでは、坑内湧水量に関して図-4(a)に示すように、トンネル断面を円形に置き換え、トンネル断面積に等価となる削孔径 r_0 が図-4(b)に示すように、距離 L だけ掘進した場合の単位時間あたりの湧水量 Q について、式(1)に示す定常軸対象浸透流の理論解³⁾を用いて求める。

$$Q = -2\pi Lk \frac{h_1 - h_0}{\ln(r_1/r_0)} \quad (1)$$

ここに、 Q : 坑内湧水量、 L : 掘進距離、 k : 地盤の透水係数、 r_0 : 削孔径、 h_1 : 距離 r_1 における全水頭値（トンネル内包要素の平均水頭値）、 h_0 : r_0 位置における全水頭

つまり、仮想ドレーンモデルは式(1)より求まる湧水量 Q をトンネル線形が存在する要素内で生じた吸込み量（損失量）と考え、トンネルを内包した要素の構成節

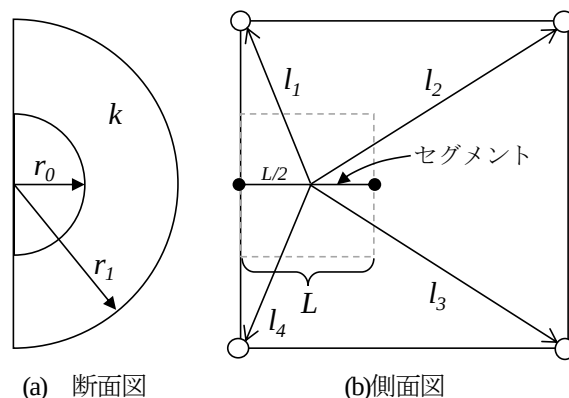


図-4 仮想ドレーンモデルの概念図

にそれぞれ割振り，有限要素解析における損失項として考慮することで浸透流解析を進めるように構成している．このような方法を採用することで，トンネルなどの排水構造物のモデル化が不要となる．

なお，式(1)の r_1 については，トンネルを内包した要素の体積を用いて，式(2)のように定義した．

$$r_1 = V_e^{1/3} / 2 \quad (2)$$

ここに， r_1 ：トンネル内包要素の半径相当距離， V_e ：トンネル内包要素の体積

トンネル内包要素の各節点への流量配分については，図-4(b)で示したトンネルセグメント距離 L の中心から各節点までの距離を l_i として，式(3)のように重み係数を定義した．この重みを考慮することで，トンネル切羽（または坑壁）に近い節点ほど損失量としての配分が多くなり，等配分を仮定した場合と比較して，掘削影響を適切に反映した数値モデルとなる．

$$w_i = \frac{1/l_i}{\sum_{j=1}^m (1/l_j)} \quad (3)$$

ここに， w_i ：トンネル内包要素の構成節点の重み係数， m ：トンネル内包要素の構成節点数， l_i ：セグメント中心から各節点までの距離

式(3)より求めた各節点に対する重み係数を用いて，式(4)に示すとおりに坑内湧水量 Q （式(1)）の節点配分を行う．

$$Q_i = w_i Q \quad (4)$$

ここに， Q_i ：トンネル内包要素の構成節点に配分された坑内湧水量（=節点損失量）

Q が設定されたことにより，浸透流解析の実行が可能となり，その結果，初期状態から節点損失量に対応した各節点の水頭値が新たに求められる．この更新された各節点の水頭値について，流量配分と同様の重み係数が全水頭にも適用できると仮定し，式(3)の重み係数 w_i を利用して式(5)に示すとおりに平均水頭値 h_1 の更新を行う．

$$h_1 = \sum_{i=1}^m w_i h_i \quad (5)$$

式(5)で更新された要素平均水頭 h_1 を用いて，式(1)より新たな坑内湧水量を求め，解析を進めていく．

仮想ドレーンモデルを適用した際のトンネル掘削に関する解析設定作業は，排水構造物の3次元空間上の座標（切羽位置），排水が開始される時間（掘削工程），削孔径（トンネル半径）を入力するのみである．したがっ

表-1 仮想ドレーンモデル適用時の計算所要時間の一例

モデル	節点数	計算時間 (min.)
従来モデル	126,724	160
20m×20m	116,688	90
50m×50m	9,240	7
100m×100m	1,584	1
領域規模：2km×1km×400m（均質地盤） 掘削総距離510m，解析終了時間約50日 使用PC：メモリ32GB，Intel® Core™ i7-6700K		

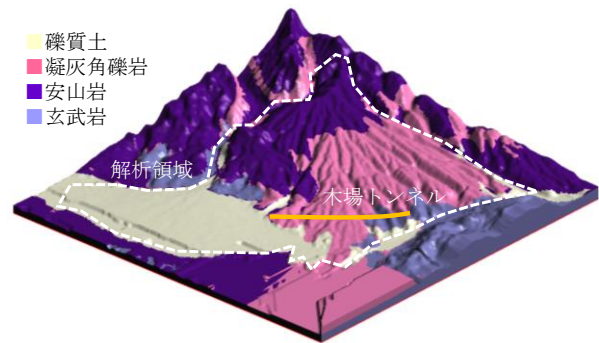


図-5 3次元地質構造モデル

て，一般的に浸透流解析において必要となる境界条件の設定に関する作業の内，掘削によって大気開放されるトンネル壁面を構成する節点の抽出や，それをトンネル掘進に対応させて開放節点として境界条件に加えていくといった準備作業も不要である．ここで，仮想ドレーンモデルを用いた場合の計算時間の短縮効果は，対象地盤を均質とした場合での検証ではあるが，同等程度の節点数の場合，表-1⁹⁾に示すように，およそ 50%となったことが報告されている．このことから，仮想ドレーンモデルの利用メリットは，計算速度および，解析準備にかかる時間の両方に対して持っていると言える．

4. 実測値との比較および透水係数の最適化

(1) 解析モデルの構築

a) 3次元地質構造モデル

図-2(a)(b)に示した広域地質平面および地質縦断（A-A'断面），また，図-3に示したトンネル縦断の地質分布を用いて，各地層の境界面を作成し，解析対象領域を包含する3次元地質構造モデルを図-5のように推定した．これらの推定はクリギング法を適用した．

b) 浸透流解析メッシュ

構築した3次元地質構造モデルを用いて，平面メッシュ1格子あたり100m×100m，鉛直方向は，地表面～モデル底面（E.L.-100m）を11分割とした直方体状のメッシュ

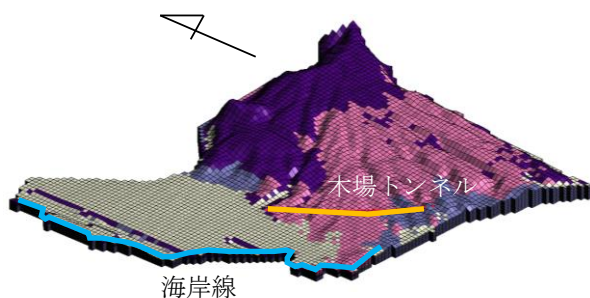


図-6 3次元有限要素メッシュ

表-2 原位置で得られた透水係数

岩種	透水係数(cm/s)
礫質土	7.24×10^{-4}
凝灰角礫岩	$2.53 \times 10^{-4} \sim 1.22 \times 10^{-5}$
安山岩	5.11×10^{-4}
玄武岩*	5.11×10^{-5}

を発生させ、3次元有限要素メッシュを図-6のように構築した。総節点数は59,388、総要素数は52,151である。

なお、仮想ドレーンモデルを適用することで、トンネル形状のモデル化は不要である。

c) 解析条件

原位置透水試験によって得られた各地盤の透水係数を表-2に示す。基盤を構成する玄武岩に関しては、トンネル計画線内には発現しないこともあり、透水試験データは得られていないため、ここでは地質年代が古いことをふまえて、安山岩の1/10を入力することとした。また、複数の透水試験が実施された凝灰角礫岩については、坑内湧水量に影響しやすい最大値の $2.53 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ を用いた。

解析手順は、掘削前の初期水位分布状態を定常解析で求め（初期定常解析）、続いて坑内湧水量が記録されている掘削開始（2015/7/6）から500日間について非定常解析を実施する。掘進総距離は1,320mである。

境界条件は海岸線に圧力水頭=0mを設定し（図-6 青線）、地表面は気象庁が公開している大村雨量観測所のアメダス統計データ⁵⁾に基づいて降雨設定を行う。まず、初期定常解析時については、大村雨量観測所の1999年～2015年の年間総雨量から平均日雨量を算定して適用し、非定常解析時は2015年7月6日からの実雨量を入力する。なお、入力降雨量は蒸発散や地表水として涵養に関係しない量を考慮し、降雨浸透率30%を実雨量に乗じて設定する。

(2) 原位置試験の透水係数による解析結果

a) 実測水位との比較

木場トンネルでは、図-7に示す位置にある既存井戸や調査ボーリングを利用して掘削前の実測水位が整理され

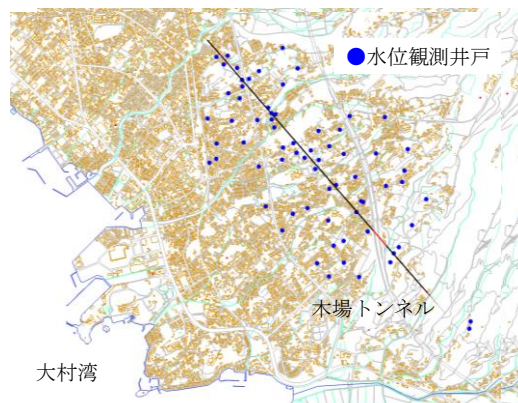


図-7 木場トンネル周辺の水位観測井戸位置

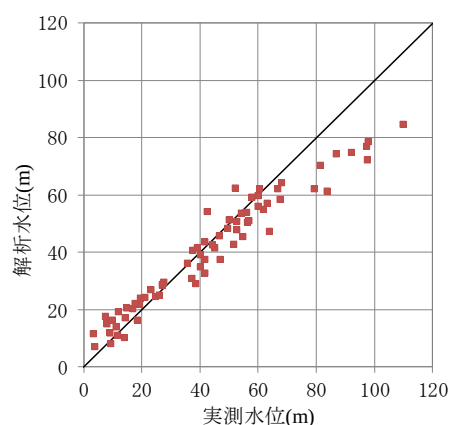


図-8 実測水位と解析結果の比較（試験値ケース）

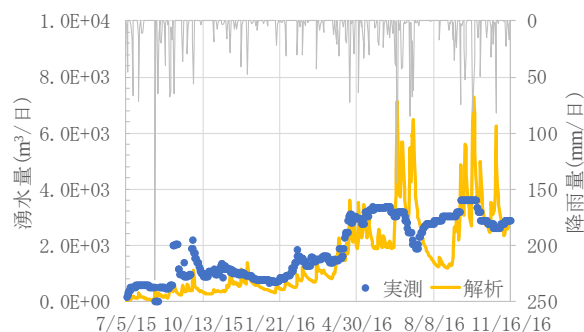


図-9 実測湧水量と解析結果の比較（試験値ケース）

ている。解析における水位標高は、各節点に求めた圧力水頭値を用いて、各観測井の平面座標における圧力水頭=0mとなる高さを補間計算によって求め、実測水位と対比する。ここで、本ケースを試験値ケースと称し、図-8に実測水位と解析結果の比較を示す。実測水位が80m以上の高い領域において、解析水位が低い結果を示した。これは解析結果は実態に対して山岳部の水位が低い状態になっていることを表している。

b) 実測流量との比較

図-9に実測坑内湧水量と解析結果の比較を示す。掘進距離が増すにしたがって、開放面積が増大することから

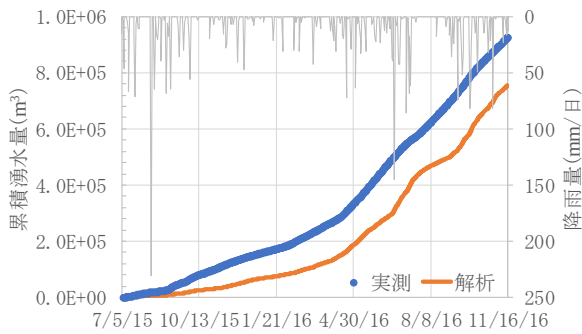


図-10 実測累積湧水量と解析結果の比較（試験値ケース）

表-3 透水係数の感度解析による最適化

岩種	透水係数(cm/s)	
	試験値ケース	最適化ケース
礫質土	7.24×10^{-4}	5.0×10^{-4}
凝灰角礫岩	2.53×10^{-4}	5.0×10^{-5}
安山岩	5.11×10^{-4}	1.0×10^{-4}
玄武岩	5.11×10^{-5}	1.0×10^{-5}

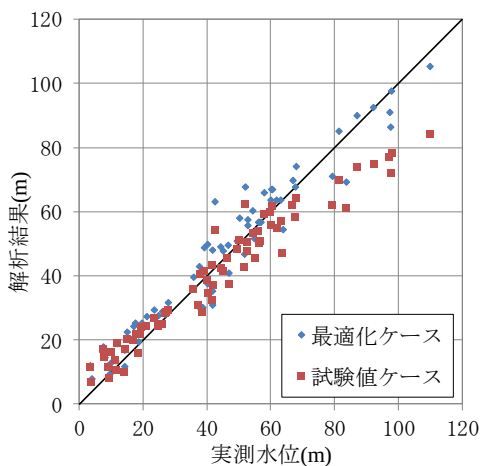


図-11 実測水位と解析結果の比較（最適化ケース）

湧水量が増加する。この傾向は解析結果でも表現されているが、全体的に実測湧水量の変化に対しては低い値で推移している。図-10に示す累積湧水量の経時変化を見ると、この傾向が明確であり、試験値ケースの500日後の最終累積湧水量は実測に対して約80%であった。

なお、解析に要した計算時間は、初期定常解析はおよそ1分、500日間の非定常解析はおよそ90分であった。

（使用PC：メモリ32GB、Intel® Core™ i7-6700K）

(3) 感度解析による水位再現精度の向上

a) 実測水位との比較

試験値ケースで課題となっていた水位標高が高い領域の再現性を向上させるため、各地盤の透水係数に対して繰り返し試行による感度解析を実施し、透水係数を最適化を行った（以降、最適化ケース）。

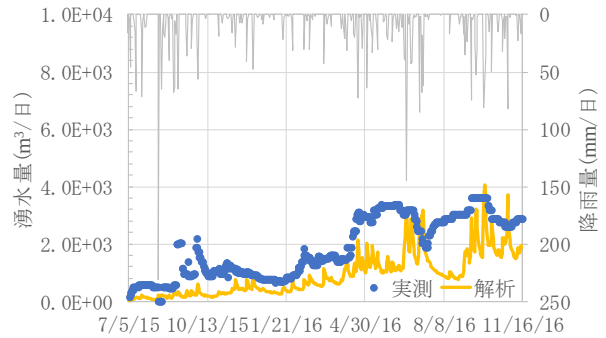


図-12 実測湧水量と解析結果の比較（最適化ケース）

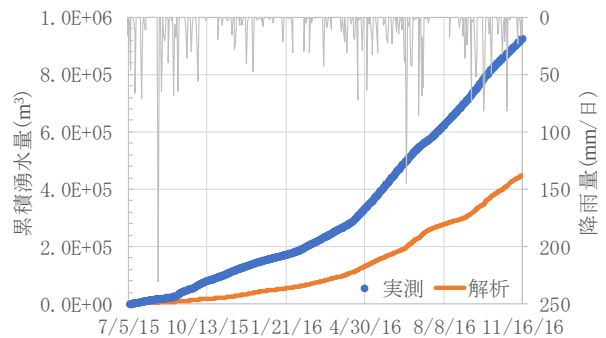


図-13 実測累積湧水量と解析結果の比較（最適化ケース）

表-3に最適ケースの透水係数を示し、図-11に実測水位との比較を示す。解析の結果、試験値ケースの課題が改善された。実測水位の観測井は図-7に示したようにトンネルを中心に広範囲に分布していることから、少なくとも木場トンネル周辺の掘削開始前の地下水分布に関しては高低傾向をとらえた結果が得られたと判断できる。

b) 実測流量との比較

図-12に実測湧水量と解析結果の比較を示す。初期水位分布の再現性を上げるために最適化ケースの透水係数は、試験値ケースよりも小さい値を設定する必要があったことから、坑内湧水量の算定結果は、試験値ケースよりもさらに低い値となった。図-13に示す累積湧水量から解析結果の最終累積湧水量は実測に対して約50%となり、湧水量については精度向上とはならなかった。

5. 水理地質構造の変更

最適化ケースは、坑内湧水量の再現精度に課題が残る結果となった。実測の湧水量変化を確認すると、掘削開始から間もなく坑内湧水量が約2,000m³/日まで上昇する期間があり、この挙動に着目して解析結果を見ると、試験値ケース（図-9）および、最適化ケース（図-12）ともに再現していない。また、同様の湧水量の上昇挙動は、2016年4月30日付近でも発生している（約3,000m³/日まで

表-4 水理地質構造変更後の透水係数

岩種	透水係数(cm/s)
礫質土	5.0×10^{-4}
凝灰角礫岩	5.0×10^{-5}
安山岩	1.0×10^{-4}
玄武岩	1.0×10^{-5}
凝灰角礫岩_変更箇所①	5.0×10^{-3}
凝灰角礫岩_変更箇所②	5.0×10^{-4}

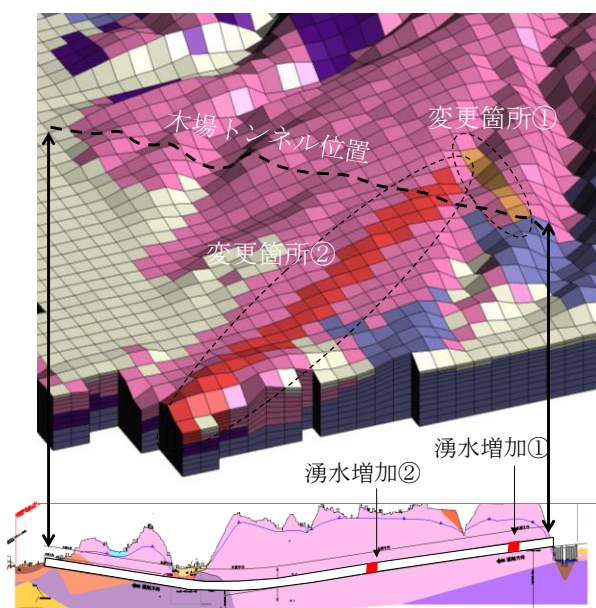


図-14 水理地質構造の追加

上昇)。そこで、この上昇を示した凝灰角礫岩について、局所的な水理地質構造の更新を試みた。

(1) 水理地質構造の更新による再現精度の確認

a) 水理地質構造の更新

地質構造の更新は湧水量が増加した個所に対して行うが、この際、原位置の地形・地質の背景も考慮し、多良岳から扇状構造となる拡がり意識して、図-14に示すように、凝灰角礫岩の一部について変更箇所①②のように水理地質構造区分を追加した（以降、更新後ケース）。変更箇所を含む透水係数は、表-4に示すように設定した。

b) 実測水位との比較

更新後ケースの初期定常解析結果による実測水位との比較を図-15に示す。最適化ケースとの差は小さく、水理地質構造の追加した状態でも実測に対する精度は大きく損なわないと判断できる。

c) 実測流量との比較

図-16に更新後ケースの坑内湧水量と実測との比較を示す。掘削直後の約2,000m³/日まで上昇する挙動を解析結果が的確にとらえることができた。また、2016年4月30日付近の約3,000m³/日へ向かって増加していく傾向も

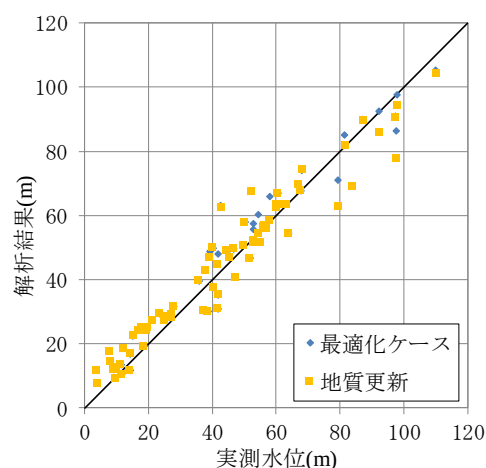


図-15 実測水位と解析結果の比較（地質更新）

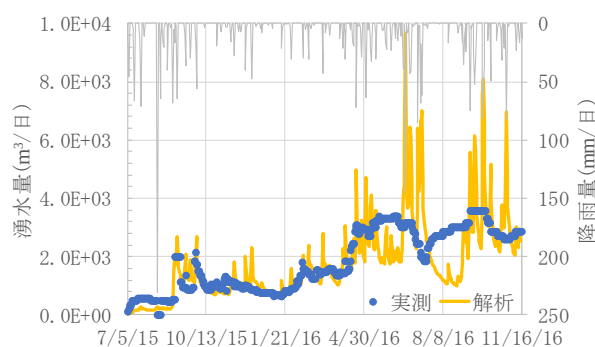


図-16 実測湧水量と解析結果の比較（地質更新）

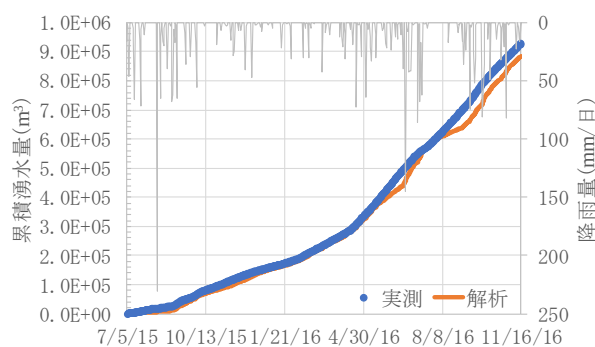


図-17 実測累積湧水量と解析結果の比較（地質更新）

再現できた。ただし、上昇後も実測は約3,000m³/日を維持しているのに対し、解析結果は約2,000m³/日まで低下している点、2016年8月8日前後は無降雨期間となっているが、坑内湧水量は上昇している点について課題の残る結果となった。しかし、図-17に示す累積湧水量に関しては実測に整合する結果が得られている。したがって、いくつかの課題は残るが、湧水量のトレンドの変化を察知し、水理地質構造に変更を加えることで予測モデルとしての精度が向上することがわかり、このような変更に対して迅速な対応が取れる本手法の有効性が示された。

なお、解析時間は試験値ケースと同じ90分であった。

6. まとめ

本論文では、坑内湧水の増加によって懸念されるトンネル施工時の安全性や作業の効率性の悪化に対して、早期に湧水予測を更新できる仮想ドレーンモデルを用いることで、地下水情報化施工としての実用性を検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 掘削前の観測井戸データを利用して水位再現を行い、必要に応じて原位置で得られている透水係数の最適化を実施しておくことで、掘進後の坑内湧水量の予測モデルとして有効活用ができるものと思われる。想定地質通りに地層が分布すれば、湧水量も概ね解析結果の予測値から大きく逸脱せずに発生すると考えられるため、湧水量のデータを蓄積されていく過程で、予測モデルとの差の有無を監視することで、地質環境の変化を察知する一つの手がかりとなる。本論文では、湧水量の変化点は同一地層と解釈された範囲で起きており、湧水量の増加は局所的な脆弱部による可能性が示唆される。
- 2) 本論文では、水理地質構造分布という考え方をを用いて、湧水量のトレンドが変化した点において部分的に同一地層内に異なる透水性を持つ領域を設定することで、それ以降の挙動をとらえることができた。このような変更が、稼働中の現場でも事前予測結果として提示できれば、工事の安全性や作業効率に対して非常に有利な情報を支援することとなる。
- 3) 仮想ドレーンモデルは、従来の方法と異なり、トンネルなどの排水構造物をモデル化しないことで、モデル化や計算時間の大幅短縮が期待できる方法である。排水構造物と地層構造が入り混じった解析メッシュを構築することは、労力

となるため、地層構造のモデル化のみに注力できる同手法は、現場の日常観察や穿孔探査等の地質的知見を速やかにモデルへ反映させることができる手法と言える。

- 4) 精度面に関しても、仮想ドレーンモデルによる湧水予測は、水理地質構造の更新対応によって実測に対して十分な精度を示したと考えられる。これは、同手法を用いることで、その定量評価を現場施工へフィードバックする地下水情報化施工の支援ツールとしての有効性を示すものである。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、（独）鉄道・運輸機構九州新幹線建設局より貴重なデータを提供していただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 細野賢一，河原裕徳，里優：仮想ドレーンモデルによる 3 次元浸透流解析，日本地下水学会，秋季講演会，pp174-179，2016。
- 2) 小形昌徳：九州北西部，多良岳地域の火山地質，pp.755-768，地質学雑誌，第 95 巻，第 10 号，1989。
- 3) 社団法人地盤工学会：値切り工事と地下水，pp83-84，1991。
- 4) 細野賢一，河原裕徳，里優：仮想トンネルモデルによる 3 次元浸透流解析手法，第 14 回岩の力学国内シンポジウム，講演番号 120，2017。
- 5) 気象庁：過去の気象データ検索，<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>，（最終閲覧日 2018.2.20）。

(2018. 8. 10 受付)

ATTEMPT OF GROUNDWATER INFORMATION CONSTRUCTION APPLYING VIRTUAL DRAIN MODEL

Takeshi EJIMA, Kenichi HOSONO, Masaru SATO,
Tsuyoshi FUKUDA and Akira FUJINO

In tunneling project, groundwater inflow into tunnels affects progress of construction and extent of countermeasures to be implemented. Numerical analysis techniques such as three-dimensional seepage flow analysis are generally used to predict the amount of groundwater flowing into the tunnels. Understanding of the three-dimensional geological structure is necessary to obtain accurate prediction results. However, this involves an increase in manpower for creating an analytical model and calculation time, making it difficult to promptly provide the analysis results at the decision making process at the construction site. This paper proposes a three-dimensional seepage flow analysis method, called "virtual drain model", which can simulate the drainage effect of the excavated zones without modeling tunnel structure (i.e. element division). Using this method, groundwater level around the tunnel and the amount of groundwater inflow during construction were simulated in order to evaluate the analysis time and the accuracy of the analysis results. The result demonstrated the usefulness of the proposed method to assist in observational construction considering groundwater flow.