

3次元解析モデルを用いた浸透流解析による地下水低下予測手法

旭川開発建設部 富良野道路事務所 筒井 幸司
湯浅 浩喜
道路第1課 柏谷 光晴

1. まえがき

地域高規格道路旭川十勝道路は、旭川市から占冠村を結ぶ延長約120.0 kmの自動車専用道路として計画されており、北の峰トンネル(仮称)は、「富良野道路」(富良野市字学田三区～富良野市字上五区間)の区間に計画されている延長約2.9 kmのトンネル(図-1に示す)である。

本トンネルが通過する地域は、自然環境や景観に優れた地域であり、地下水や河川水等を飲用水や農業用水として利用している。また、富良野市の上水道の水源井戸も本トンネルの近傍にある。



図-1 北の峰トンネル位置図

本トンネルが通過する地質の特徴としては、一部で、有機質土等を挟在し、被圧地下水を形成する砂礫層(以下:被圧帯水層)を低土被りで通過

することである。以上より、本トンネルの計画にあたり、一般的な地質調査や各種試験に加えて、3次元の解析モデルを用いた浸透流解析(以下:3次元浸透流解析)による検討も実施し、本トンネルの掘削による地下水や河川水量等への影響予測を行いながら、工法の検討を進めているところである。

本稿では、本トンネル計画の立案において実施している3次元浸透流解析を用いた地下水低下の予測手法について報告するものである。

2. 地形・地質の概要

2.1 概要

北の峰トンネル(仮称)計画箇所は、富良野盆地内に位置しており、西側には、南北方向に標高1,500 m程度の夕張-芦別山地が広がり、盆地中央には空知川が流れ、東側には、標高2,000 m前後の火山からなる北東-南西方向に広がる大雪山-十勝岳火山列が分布し、富良野盆地には、数多くの活断層が分布(図-2に示す)する。本トンネルは、ナマコ山付近で御料断層と交差する。御料断層は、「日本の活断層」¹⁾によれば、確実度、活動度B(第四紀の平均変位速度Sが、 $1 > S \geq 0.1 \text{ m} / 1,000 \text{ 年}$)とされる東側上がりの逆断層である。



図-2 活断層分布図

Kouji Tsutsui, Hiroki Yuasa, Mitsuharu Kashiwaya

2.2 北の峰トンネルの地質

本トンネル計画箇所周辺の地層区分を行うため、地質調査を実施した。調査結果を基に地層区分を行い、各地層の透水係数を把握するため、現場透水試験や土質試験を実施し、各地層の平均値を算出した。地層区分及び透水係数を表 - 1 示す。

表 - 1 北の峰トンネルの地層区分と透水係数

北の峰トンネル付近の地質層序表

地質年代	御料断層東側	御料断層西側	備考	透水係数 (cm/sec)		深透流解析モデル				
				測定値	平均値					
新第三紀	沖積層	a	沖積層	a	砂・砂・粘土	5.1×10 ⁻⁷ ~3.0×10 ⁻⁴	1.2×10 ⁻⁷	沖積層	a	
	崖線堆積物	dL	崖線堆積物	dL	砂・砂・粘土	2.1×10 ⁻⁷ ~2.4×10 ⁻⁴	2.7×10 ⁻⁴	崖線堆積物	dL	
	FT5面堆積物	FT5	FT5面堆積物	BT-U	主として礫・砂よりなる。基質はシルトを多く含む部分あり。一部に有機質土、シルトを挟む。	BT-U	1.2×10 ⁻⁷ ~6.8×10 ⁻⁴	5.3×10 ⁻⁴	断層西側 FT面堆積物	BT-U
	FT4面堆積物	FT4	FT4面堆積物	BT-L	主として礫・砂よりなる。基質はシルトを多く含む部分あり。一部に有機質土、シルトを挟む。	BT-L有機質土部*	1.0×10 ⁻⁴ ~7.5×10 ⁻⁴	5.0×10 ⁻⁴	断層西側 FT面堆積物	BT-L
	FT3面堆積物	FT3	FT3面堆積物	BT-L	砂礫層の砂礫と粘土・シルト・有機質土等の混在層よりなる。上部部との境界は、最上部に分布する有機質土・シルト層である。	BT-L砂礫部	5.3×10 ⁻⁷ ~1.2×10 ⁻⁴	5.5×10 ⁻⁴	断層東側 FT2~FT4面堆積物	BT-L
	FT2面堆積物	FT2	FT2面堆積物	BT-L	中細砂・細砂層のFT2面堆積物	BT-L	5.7×10 ⁻⁴ ~3.2×10 ⁻⁴	6.6×10 ⁻⁵	断層東側 FT2面堆積物	BT-L
	十勝火砕流堆積物	Tk	十勝火砕流堆積物	BT-T	BT-LとBT-Tは隣接関係	BT-T	4.1×10 ⁻⁷ ~8.3×10 ⁻⁶	3.1×10 ⁻⁴	断層東側 FT2面堆積物	BT-T
	十勝火砕流堆積物	Tk	十勝火砕流堆積物	Tk	石英質酸性岩質流紋岩質堆積物。風化部(Tk-w)は砂礫を呈する。	風化部	1.7×10 ⁻⁴ ~7.6×10 ⁻⁵	2.6×10 ⁻⁴	十勝火砕流堆積物	Tk-w
新第三紀	未分層新第三系泥岩	Ts	未分層新第三系泥岩	Ts	塊状で均質な泥岩と、境界を定かたりに観察した縁部帯泥岩に区分	新第三紀	5.0×10 ⁻⁴ ~3.9×10 ⁻⁴	1.6×10 ⁻⁴	基盤岩類	Ts
	未分層新第三系砂質泥岩	Tas	未分層新第三系砂質泥岩	Tas	風化部(Ts-w)は土砂状を呈する。	新第三紀	3.0×10 ⁻⁷ ~9.1×10 ⁻⁷	6.0×10 ⁻⁷	基盤岩類	Ts-w
	未分層新第三系砂質泥岩	Tas	未分層新第三系砂質泥岩	Tas	風化部(Ts-w)は土砂状を呈する。	新第三紀	3.0×10 ⁻⁷ ~9.1×10 ⁻⁷	6.0×10 ⁻⁷	基盤岩類	Ts-w
中生代	駒奥層群(泥岩主体)	Yn	駒奥層群(泥岩主体)	Yn	泥岩・泥岩砂岩互層・礫性泥岩・火山性サセート	—	—	—	—	
	駒奥層群(砂岩主体)	Ys	駒奥層群(砂岩主体)	Ys	砂岩・砂岩泥岩互層・礫岩	—	—	—	—	
	雲知層群	Sr	雲知層群	Sr	緑色泥岩・十勝層・塊状砂岩・緑色砂岩・砂岩・泥岩砂岩互層(SrP)	—	—	—	—	

*1:土質試験結果による透水係数

地質調査の結果、本トンネルが通過する地質は、富良野北 IC (仮称) 側から、新第三系の泥岩 (塊状部、破碎部)、第四紀初頭の十勝火砕流堆積物 (未風化部・風化部)、扇状地堆積物 (砂礫層、一部に有機質土等を狭在) である。

また、御料断層との交差部付近は、複雑な地質状況であることが明らかとなり、被圧帯水層が分布していることが判明した。



図 - 3 北の峰トンネル周辺の地質平面図

本トンネルの地質平面図を図 - 3 に、地質縦断図を図 - 4 に示す。

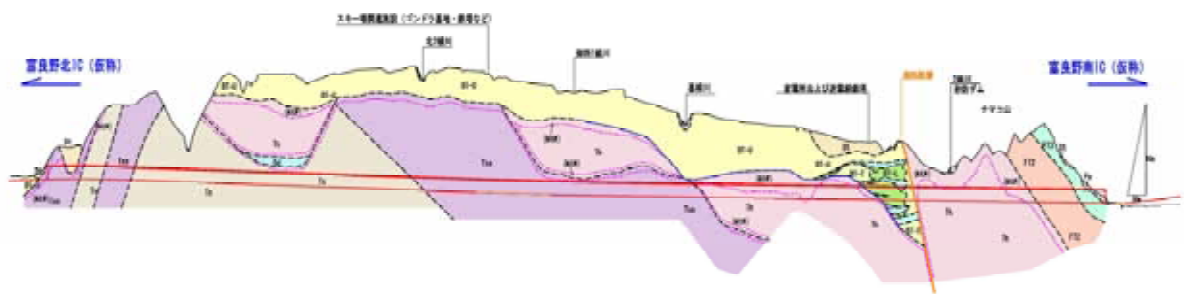


図 - 4 北の峰トンネルの地質縦断図

3 . 北の峰トンネル計画箇所周辺の水文環境

3 . 1 水利用実態

本トンネル計画箇所周辺における水利用実態を把握するため、現地踏査及び聞き取り調査を実施した。現地踏査結果を図 - 5 に、結果の概要を以下に示す。

- ・ 飲用や農業用として井戸水や河川水等を利用している箇所が多い。
- ・ 御料断層西側では、深度 20 m 前後の井戸が多く、扇状地堆積物の砂礫層を取水層としている場合が多い。
- ・ 御料断層東側では、深度 10 ~ 15 m 前後の井戸が多く空知川の沖積層の砂礫層を取水層としている場合が多い。

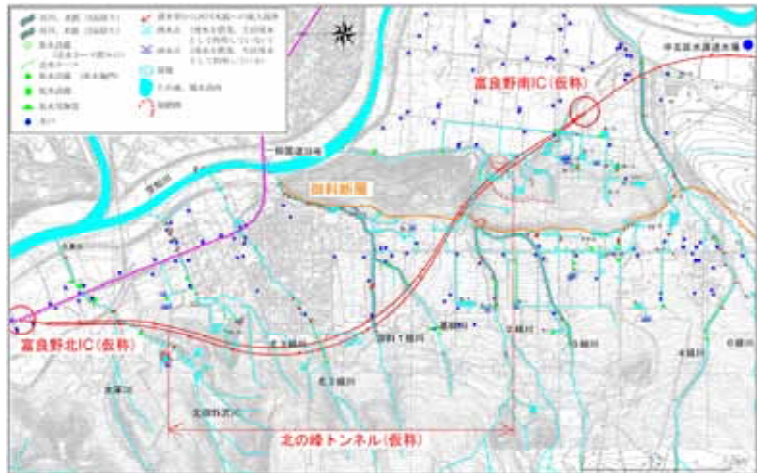


図 - 5 現地踏査結果

- ・ 御料断層沿いやナマコ山周辺等において数多くの湧水箇所が存在する。
- ・ 本トンネルの終点側近傍には、富良野市の上水道水源施設（井戸）が存在する。

3 . 2 地下水位・河川の状況

本トンネル計画箇所周辺において、多数の井戸が確認されたことから、地下水位や河川流量の状況について、本トンネル施工前の水理条件の把握と、3次元浸透流解析の入力値を得ることを目的として、地下水位観測 51 箇所と河川流量観測 16 箇所において連続観測（図 - 6 に示す）を実施している。以下に、各観測結果について示す。

- ・ 地下水位観測の結果、御料断層西側の地下水位は、年間の変動幅が 1 m 以内である箇所が多く、地下水位も高く推移していることが判明した。御料断層東側のナマコ山については、地下水位が西側に比べてかなり低いことも判明し、ナマコ山は地下水の 2 重構造を持つことも判明した。また、空知川沿いの沖積面の地下水位は、空知川の水位と連動していることも判明した。

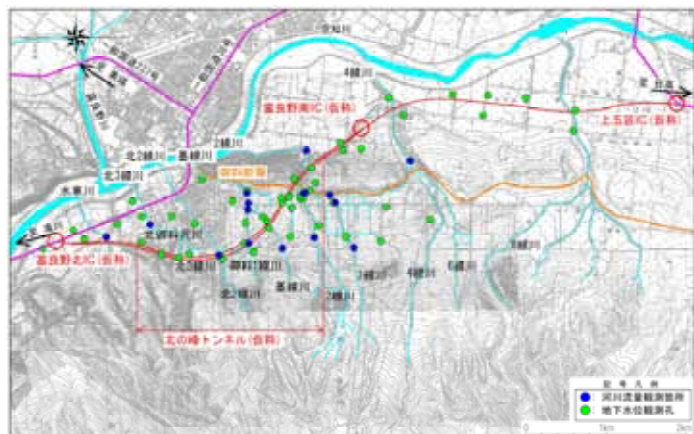


図 - 6 地下水位・河川流量調査位置図

- ・ 河川流量観測の結果、本トンネル近傍の河川は、比較的小規模で基底流出量も少ない場合が多く、降雨に対して敏感に反応する特徴を持つことが判明した。

3.3 被圧帯水層の概要

本トンネルの地質調査において、御料断層と2線川及び3線川の交差点付近の地質調査を実施した際に、地下水の自噴現象が確認されたため、詳細な地質調査を実施した。調査結果を以下に示す。

- ・被圧現象（自噴及びボーリング掘削時の急激な水位上昇）が観測されたボーリング孔は、御料断層と2線川の交差点付近であり、標高200m付近に有機質土層が分布すること。
- ・被圧現象は、ボーリング孔底が標高200m付近に分布する有機質土層を抜けてから観測されたこと。
- ・被圧現象をもたらしている有機質土層の分布範囲は、御料断層西側の2線川から3線川と4線川の間付近まで存在すること。
- ・有機質土層分布域の下部には、御料断層に沿って基盤岩の深い谷が分布すること。
- ・被圧地下水の規模は、0.03～0.05MPa程度であること。

以上の調査結果より、被圧現象が起きている原因は、以下のように推定される。

夕張山地側から流下する地下水は、御料断層により堰き止められ、さらにキャップ層として有機質土層（難透水層）が存在するため、被圧現象が生じていると考えられる（図-7に示す）。

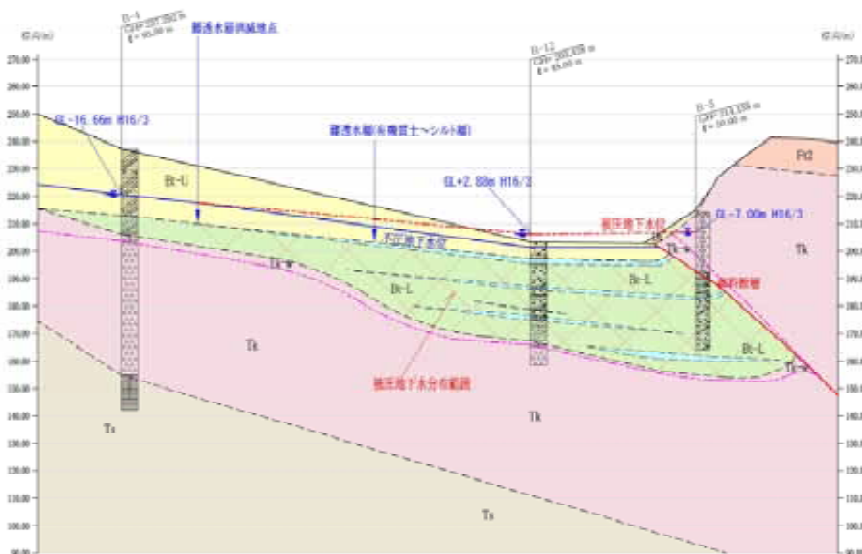


図 - 7 2線川付近の地質断面図

3.4 地下水・河川水の水質概要

本トンネル計画箇所周辺の地下水や河川水の特徴を把握するため、水質分析調査を実施した。分析項目は、主要8成分とし、結果を基にヘキサダイアグラムを作成した。

調査の結果、御料断層西側は、多様な結果となったことから地下水の流出経路が複雑であることが判明した。また、御料断層東側は、空知川沿いの沖積面の地下水と同じくマグネシウムを多く含有していることから、主に、空知川から涵養されていることが判明した。水質分析結果を図-8に示す。

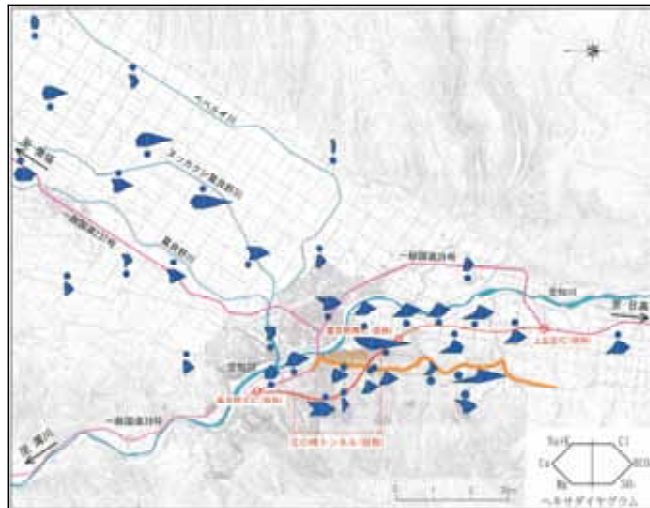


図 - 8 水質分析結果

4.3 次元浸透流解析

4.1 解析手法

浸透流解析を実施するにあたり、解析手法としては、2次元解析や準3次元解析の手法もあるが、本トンネルにおいては、各種現地調査結果から御料断層や被圧帯水層を含む複雑な地質や地下水を通過することが想定されたため、3次元的な地下水流動や複雑な水理構造を考慮する必要があると判断し、3次元解析モデルによる浸透流解析で実施した。

今回の解析においては、降雨による涵養や地下水水位の変動等を評価するため、飽和と不飽和領域を考慮できる解析コードを用いた。3次元浸透流解析の手順を図-9に示す。

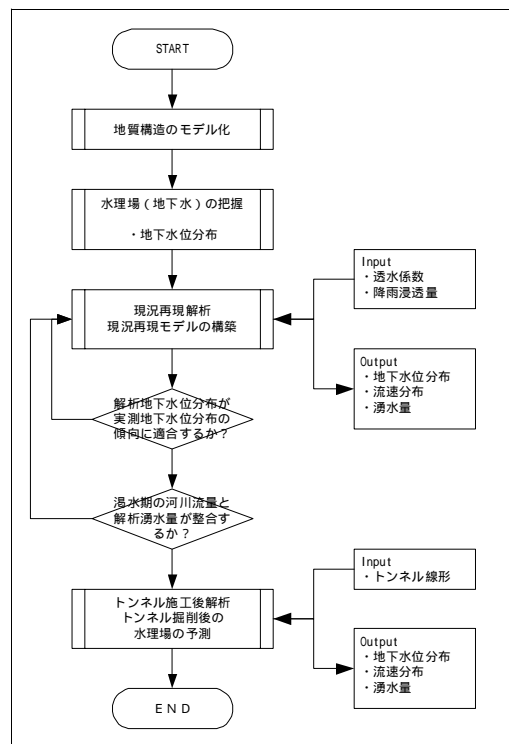


図 - 9 解析手順

4.2 3次元解析モデルの概要

3次元浸透流解析の解析領域を図-10に示す。解析領域の設定にあたっては、周辺の地形状況や揚水試験結果等を考慮し設定した。解析領域は、南北方向に約7km、東西方向に約3kmで、解析領域面積は17.7km²程度である。

また、作成した解析メッシュの規模は、節点数約44万(平面約11万×深度方向約40層)、要素数約88万(平面約21万×深度方向約41層)である。解析メッシュ鳥瞰図を図-11に示す。解析メッシュの作成にあたっては、難透水性と考えられる御料断層や地下水の被圧現象の原因となる水理構造について配慮し作成した。

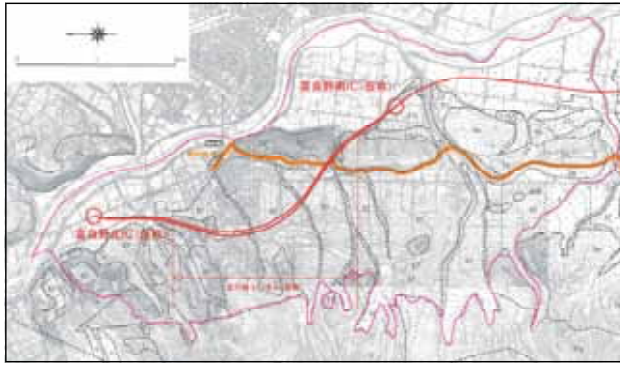


図 - 10 解析領域平面図

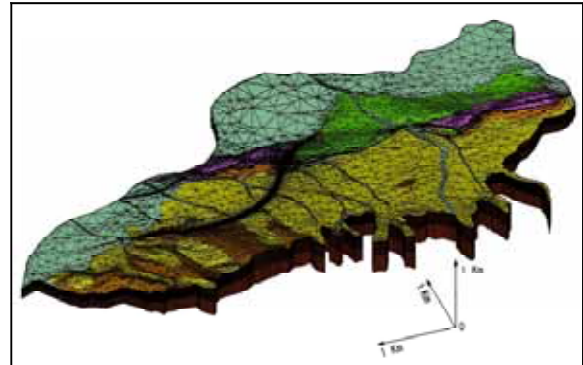


図 - 11 解析メッシュ鳥瞰図

4.3 境界条件

解析モデル作成において設定した境界条件を図 - 12、表 - 2 に示す。

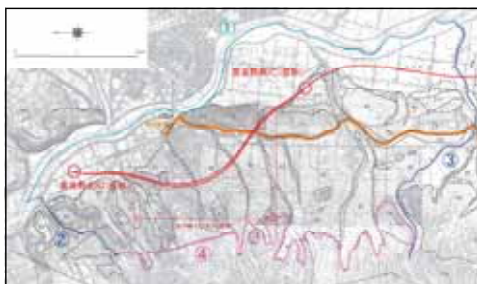


図 - 12 境界条件

表 - 2 境界条件設定表

境界	境界位置	設定境界条件	備考
東限	空知川(左岸)	水位固定境界	設定水位は河川水位(一定)とした。
北限	沢筋	不透水境界	分水界
南限	八線川	不透水境界	分水界
西限	地質境界	水位固定境界	境界位置は段丘堆積物(DT)・未分離新第三系(Ts)分布範囲西限とした。上流側からの涵養を考慮し、現況再現解析では水位固定境界とした。
上限	地表面	降雨浸透境界	降水量は富良野測候所の平均値980(mm/年)とした。降雨浸透率は40%(390mm/年)を中心にパラメータスタディを実施した。
下限	E.L. 0m	不透水境界	トンネル底盤から水位変動量の5倍程度下とした。

4.4 現況再現解析

現況再現解析は、本トンネル建設に伴う地下水位や河川流量の変化の予測、評価を行うために必要な現地の地下水位分布及びその挙動、河川流量を適切に表現できる解析モデルを作成するために実施した。現況再現解析では、現地調査結果を基にした各地層の透水係数の平均値を基本としているが、御料断層東側のナマコ山の地下水位の再現性を考慮し、一部、透水係数や降雨浸透率の設定条件を変えて解析を実施した。解析ケースについて表 - 3 に示す。

表 - 3 現況再現解析実施ケース一覧表

解析ケース名	パラメータスタディ項目	透水係数の設定(単位: m/s)			降雨浸透率の設定				
		御料断層	BT-U	Tk(東側)	扇状地北部	扇状地南部	ナマコ山	沖積低地	山地北部
case01	全体の降雨浸透率	当初設定 (1×10^{-3})	全平均値 (5×10^{-6})	全平均値 (2×10^{-7})	40%				
case02		当初設定	全平均値	全平均値	30%				
case03	領域毎の降雨浸透率	当初設定	全平均値	全平均値	20%	60%	1%	20%	20%
case04		当初設定	全平均値	全平均値	20%	60%	1%	20%	60%
case05	BT-Uの透水係数	当初設定	一部除外 [*] (3×10^{-6})	全平均値	20%	60%	1%	20%	60%
case06	御料断層及び御料断層東側の十勝火砕流堆積物(Tk)の透水係数	当初設定	一部除外	10倍 (2×10^{-5})	20%	60%	1%	20%	60%
case07		0.1倍 (1×10^{-5})	一部除外	10倍	20%	60%	1%	20%	60%
case08		0.2倍 (2×10^{-5})	一部除外	10倍	20%	60%	1%	20%	60%

^{*})試験区間が他の層との境界をまたいでいるデータを除外

4.5 現況再現解析結果

解析ケースから最適ケースの選定を行うため、現地での地下水位観測や河川流量観測から得られたデータを使用し比較した。この内、河川流量の評価については、今回使用した解析コードは、河川への湧水量しか解析ができないことから、各河川の基底流量を算出して使用した。比較にあたり、実測値として使用した地下水位は、長期観測箇所の1年間の全観測水位の平均値であり、河川流量は、各河川の最も下流に位置する観測箇所の全観測流量の少ない方から3%目に位置する値を基底流量として使用した。特に、今回の解析では、地下水位の再現性を重視し、全体的な地下水位の分布傾向と実測水位と解析水位の差が小さくなる条件及び河川への湧水量の傾向について総合的に評価し最適ケースを選定した。各解析ケースの評価結果を表-4に示す。また、最適ケースにおける地下水位の解析結果と実測値を図-13に、最適ケースにおける各河川への湧水量の比較結果を図-14に示す。

現況再現解析の結果、図-13に示すように、全体的に地下水位を再現することができたが、河川への湧水量については、全体的に解析値が実測値よりも低い傾向を示した。特に、本トンネル計画箇所の特徴である被圧地下水の状況については、図-15に示すようにBT-mの上下で約5mの水頭差(水圧差約0.05MPa)がある解析結果となり、実測値とも整合が取れていることや、御料断層の遮水性によるナマコ山の地下水位についても実測値と比較的整合が取れていることから、最適ケースのモデルは、十分に現況の地下水位分布を再現できていると考えている。

表-4 現況再現解析結果の総合評価

解析ケース名	地下水位分布傾向	地下水位誤差の2乗和(m ²)	河川への湧水量の傾向	総合評価
case01	全体に高い	753.98	バランスが悪い	
case02	御料断層の西側が高い	784.60	バランスが悪い	
case03	バランスが悪い	637.07	比較的良い	
case04	御料断層の西側が高い	686.49	比較的良い	
case05	比較的良いがナマコ山が高い	515.83	比較的良い	
case06	全体に低い	322.09	全体的に少ない	
case07	御料断層の西側が高い	390.76	比較的良い	
case08	比較的良い	359.52	比較的良い	最適ケース

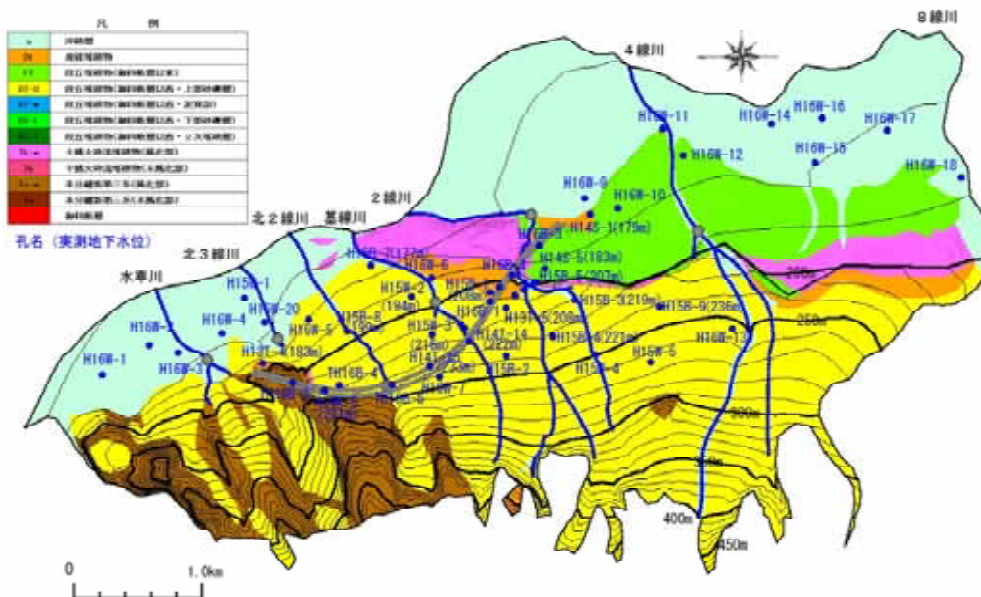


図-13 解析地下水位コンタ - 図 (最適ケース・case08)

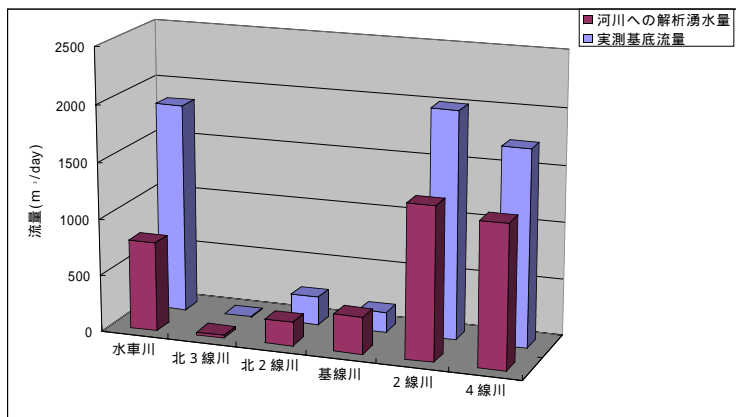


図 - 1 4 河川への湧水量比較表

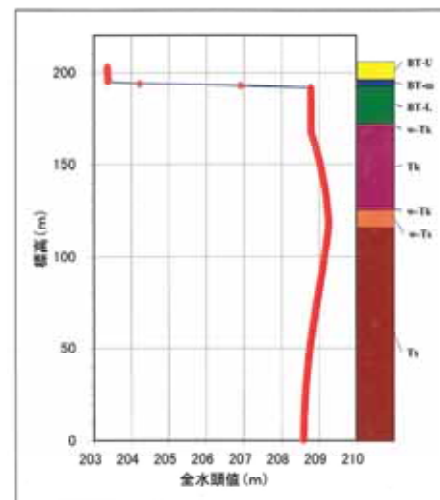


図 - 1 5 被圧現象解析図

5 . あとがき

本トンネル計画に伴い各種現地調査を実施してきたが、本トンネル計画箇所は、地質、地下水、水質等の調査結果から、地下水流動や地質構造が複雑な箇所であることが判明した。

今回は、現地調査結果や現地の地形状況も踏まえ3次元浸透流解析を実施した。

現況再現解析については、地質構造や地下水分布構造が複雑であるにも関わらず、地下水の分布傾向や河川への湧水量の傾向、被圧地下水の状況及び御料断層の遮水性によるナマコ山の地下水位について比較的良く再現ができた。これらから、十分信頼性が高い解析モデルを作成できたと言える。ただし、河川への湧水量については、解析範囲と実際の涵養範囲との相違により湧水量が全体的に少ない傾向になったと思われる。

現在は、作成した解析モデルを用いて定常解析や非定常解析を実施し、本トンネルの工法を検討している段階であるが、工法の検討においては、事業の実施により想定される地下水や河川水量、自然環境等への影響についても総合的に検討を行い、本トンネルの計画を立案していきたいと考えている。

また、今後も継続して、地下水位観測や河川流量観測及び水質調査等も実施していきたい、本トンネル施工前のデータを集積し、現地状況の詳細な把握を行っていききたいと考えている。

最後に、本稿作成にあたりご協力頂いた関係者各位の皆様には深く感謝の意を表します。

(参考文献)

- 1) 活断層研究会編：新編日本の活断層 東京大学出版会 pp.13-14,1991
- 2) 北海道道立地質資源調査編：水理地質図幅「旭川」1967
- 3) 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,土木学会報告集, 第 264 号,pp.87-96,1997.
- 4) 菱谷智幸,西垣誠,橋本学：物質移動を伴う密度依存地下水流の3次元数値解析手法に関する研究,土木学会論文集, No.638/ -49,pp.59-69,1999.