

帯水層における非排水構造トンネルの施工について —非排水構造の施工中間報告—

旭川開発建設部 富良野道路事務所 工務課 ○小林 暁
柏谷 光晴
千葉 哲也

旭川十勝道路のうち「富良野道路」に計画されている北の峰トンネル（仮称）L=2,928mは、夕張山地山麓の扇状地を通過する。当該地は水資源が豊富であり、周辺水文環境への影響に配慮した施工が求められているとともに、既往調査により活断層や被圧耐水層も確認されたことから、地山安定性の確保や大変形の防止にも配慮が必要であり、止水注入工や非排水構造を採用した設計を行った。

本研究では、過年度完了した止水注入の施工効果検証と本年度より掘削を開始した止水注入区間の非排水構造支保設計や施工状況等について報告を行うものである。

キーワード：トンネル、地下水解析、自然環境

1. はじめに

(1) 北の峰トンネルの計画

旭川十勝道路は、旭川市から占冠村を結ぶ延長約120kmの地域高規格道路として計画されており、北海道縦貫自動車道および北海道横断自動車道と接続することにより、北海道における広域交流ネットワークを形成し、当該地域の交通円滑化、地域間連携や広域的な人流・物流の活性化に寄与する路線である。（図-1,2参照）

富良野市内では、主要産業である農作物輸送の物流交通や観光交通、沿道市街地から発生する域内交通が輻輳し、慢性的な交通混雑が発生していることから、「富良野道路」（富良野市字学田～富良野市字上五区間・8.3km）の整備を平成14年度に事業着手している。

「北の峰トンネル」（仮称、以下省略）は、「富良野道路」において計画されている延長約3kmのトンネル（図-3参照）であり、平成21年度から工事に着手している。



図-2 旭川十勝道路位置図



図-1 高規格道路・地域高規格道路網図



図-3 事業位置図

本トンネルの建設地周辺は、芦別岳に代表される夕張山地山麓の丘陵地であり、広大な森林や豊富な地下水など豊かな自然環境が保たれており、当地域においては、自然環境が生み出す美しい景観や清らかな水の活用により、リゾート運営や営農活動の展開とともに、市民の飲料水確保など豊かな自然の恩恵を受けている。

(2) 工法選定

前述のとおり、本トンネルの建設地周辺は豊富な水資源を有し、特に既往調査により御料断層付近には被圧水の存在が確認されている。(図-4参照) 本トンネルは、被圧帯水層の下を低土かぶりで通過することから、トンネル施工による地下水への影響を評価し、影響を極力抑える対策工法を検討した。

三次元浸透流 定常解析 (工事による最終的な地下水影響を評価) により非排水区間を計画した。更には被圧水および扇状地堆積物 (以下BT層) の分布が確認されている御料断層付近には、非常常解析 (工事段階の時系列毎の地下水影響を評価) も行い、止水注入区間を計画した。¹⁾ (図-5, 6参照)

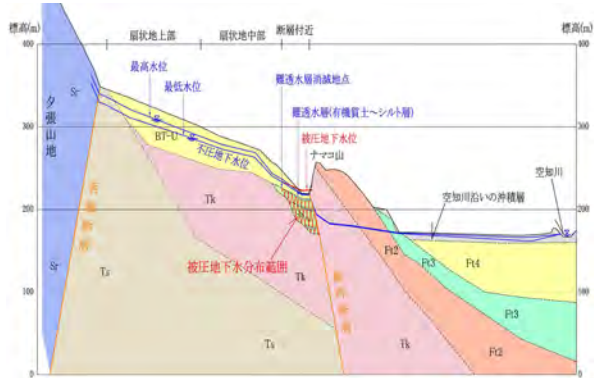


図-4 二線川付近の水文地質模式断面図

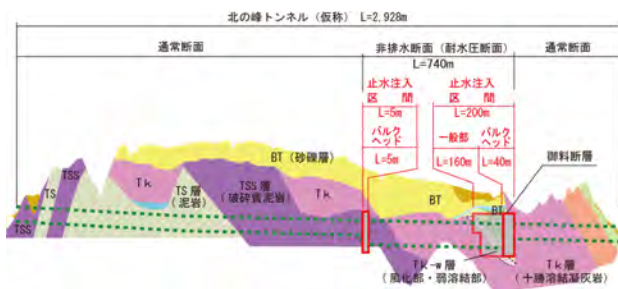


図-5 各断面区間とトンネル地質縦断面図

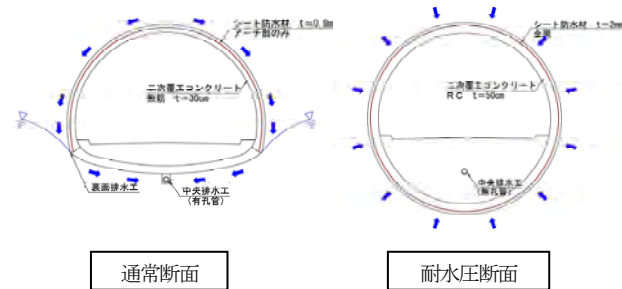


図-6 トンネル断面図

2. 止水注入工 施工効果検証

前述の対策工法のうち止水注入工は既に室内試験や試験施工により仕様を決定し、施工完了している。²⁾ 止水注入工の品質は非排水構造区間の掘削に密接に関係しているため施工効果を検証した。

(1) 効果確認工 (三次元比抵抗トモグラフィー)

バルクヘッド部については透水係数で評価すべきであるが、それ以外の一般部では、まず注入材料の逸走や、想定外の注入範囲となっていないかの把握が重要である。そこで、注入前後で三次元の比抵抗トモグラフィー (電気探査) を実施し、その差分から注入範囲を評価した。³⁾ 注入箇所地層構成に合わせ、A~E区間は円形断面、F区間は上半断面への注入を行った。(図-7参照) 全断面の例としてB区間と、上半断面を対象としたF区間の比抵抗トモグラフィー結果を図-8に示す。いずれにおいても比抵抗値の差分が大きくなっており、手法の妥当性と同時に逸走や大きなズレのない注入効果を証明できた。

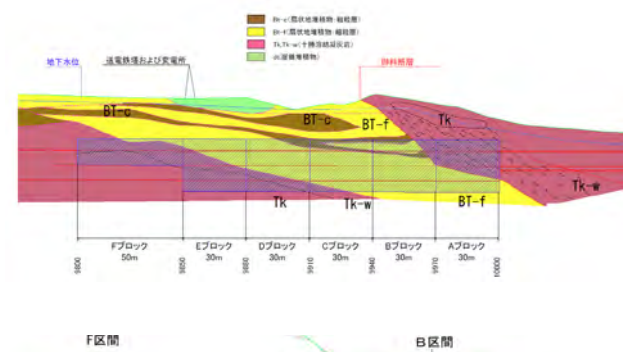


図-7 注入区間断面図

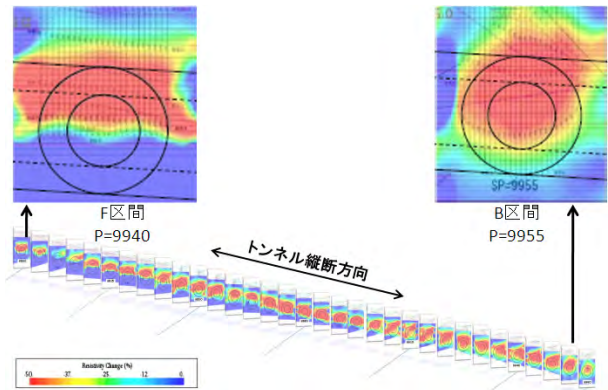


図-8 比抵抗トモグラフィーによる注入範囲確認

(2) 効果確認工（コア観察と透水試験）

バルクヘッド部では重要性を考慮し、トンネル縦断方向に約5mピッチで透水試験を実施した。一方バルクヘッド部以外では、前述した三次元比抵抗トモグラフィーによる間接的な手法と併用し、縦断方向約15mピッチで透水試験を実施することで合理的な品質確認工を実施した。試験方法としては、透水係数が最も精度良く測定可能な「孔内水位回復法による岩盤の透水試験」(JFT)を採用した。また透水試験実施時に削孔する際、同時にコアを採取し、フェノールフタレイン溶液を噴霧することで注入材の充填状況を確認した。

バルクヘッド部のコア観察結果について写真-1に示す。BT層と十勝溶結凝灰岩（以下Tk層）の両方に対して、極超微粒子セメントが、浸透注入から割裂注入まで地山に応じて注入形態を変えながら隙間に注入されている様子がわかり、同材料・注入方法が適切な選択であったとわかる。

透水試験については、改良前は - 4 乗オーダー (cm/s) の測定結果が多く、広範囲にばらつきのある分布であったのが、改良後は - 5 乗オーダー (cm/s) に集中した分布になった。(図-9参照) 改良後の平均透水係数は 2.9×10^{-5} cm/s であり、目標値に近い数字を確保できている。これは一部に高透水性のレキ層が卓越したBT層

(以下BT-c層) の改良後の透水係数 (平均値 8.3×10^{-5} cm/s) に大きく影響を受けている。しかし、BT-c層については、注入前に比べて大幅に透水係数が低下できており(図-11参照)、追加注入の実施については注入効率の低下が懸念された。そこで、注入実績を地層毎に反映した三次元浸透流解析を実施し、目標値に改良した場合との比較を行った。施工20年後の地下水コンターを図-11に示す。また地下水が最も低下する井戸の水位予測を図-12に示す。これらの結果から、トンネル掘削による周辺地下水の影響については目標値に改良した場合と概ね同等の効果を得ることが出来たといえる。

様々な地質が挟在し、難しい現場条件であったにもかかわらず、高品質な注入工が実施できたと考えている。

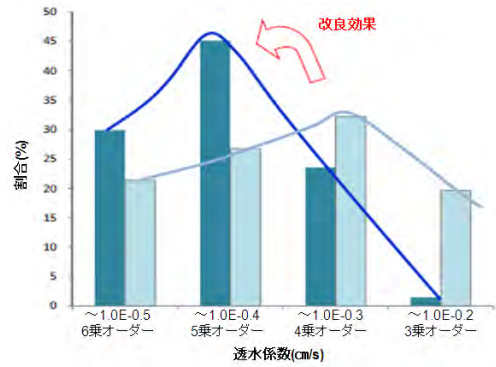


図-9 透水試験結果 (分布割合)

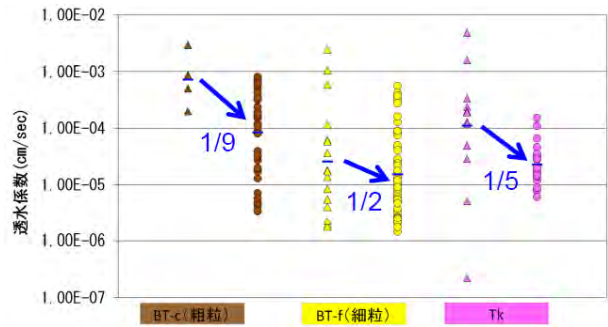


図-10 透水試験結果 (土質毎)

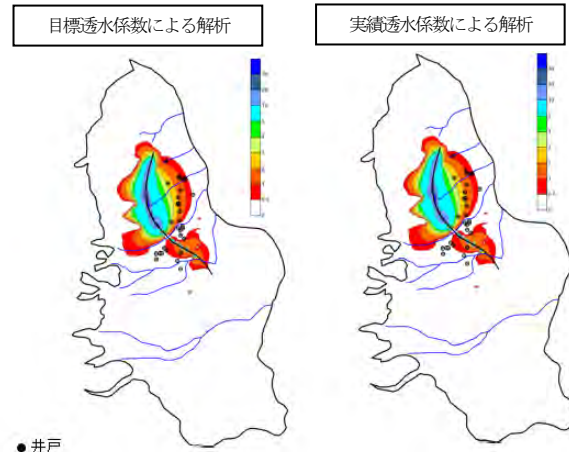


図-11 三次元浸透流解析による水位低下比較(施工20年経過)

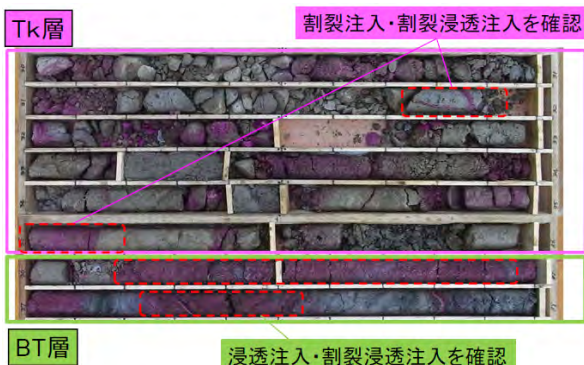


写真-1 バルクヘッド部ボーリングコア写真

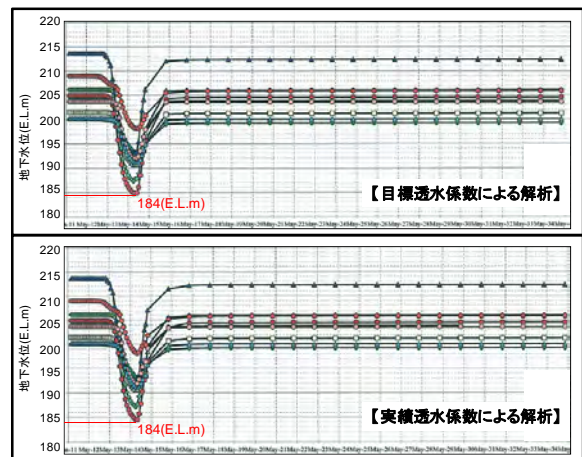


図-12 三次元浸透流解析による井戸水位比較

3. 止水注入区間の非排水構造支保設計

(1) 目的

止水注入区間は土砂状の BT 層が主体となっており、トンネル掘削時の変位増大やそれに伴う出水（止水ゾーン損傷）が懸念される。また、写真-2 に示すように P=9,856 付近には高压電力線鉄塔が存在し、この区間では鉄塔への影響が懸念される。さらに、当該区間は止水注入により地下水低下を抑制する施工法を採用している事から、地下水挙動がトンネル安定性の力学挙動に影響する事が考えられる。そこで、土水連成弾塑性 FEM 解析を用いて、地下水挙動・力学挙動を考慮した支保検討を行った。

(2) 解析条件

解析断面を図-13 に示す。解析断面①はトンネル全断面が BT 層となる箇所とした。解析断面②は上半が BT 層、下半が Tk 層となる箇所とした。解析断面③は高压電力線鉄塔直下とした。

加背割については、原設計では4段階掘削としていたが、掘削時の地山安定性向上のため、断面全体を早期に閉合させることを目的に、3段階掘削の変更案を検討した。さらに変更案は原設計案と比較して工期の短縮が図れると想定される。なお、地上注入工による事前の切羽改良により、切羽安定性は向上しており、変更案も検討対象になりうるものとする。原設計加背割と変更加背割を図-14 に示す。

地盤物性値は、既往設計で用いた値を基本とし、BT 層の改良体の物性値は室内試験結果を反映した。Tk 層に関しては、注入は主に止水性の向上に寄与すると考え、透水係数以外については、原地盤と同条件とした。（表-1 参照）

解析モデルは3次元浸透流解析で得られた水位を模擬し、トンネル掘削は、解放応力（応力解放率 40-60%）を作用させるとともに、トンネル壁面の圧力水頭をゼロとすることで模擬した。支保部材は鋼製支保工、吹付けコンクリート、仮閉合吹付けコンクリートの3種類をモデル化した。（表-2 参照）

(3) 解析指標

各解析断面において、支保部材応力と坑内変位について評価を行った。支保部材応力については短期許容応力度を用い、坑内変位については表-1 に基づいて算出した限界ひずみから得られる天端沈下と内空変位量の管理基準値を用いた。また解析断面③では、鉄塔の評価基準として、関係機関との協議により定めた、垂直変位と水平変位に関する相対変位量の管理基準値を用いた。（表-3 参照）

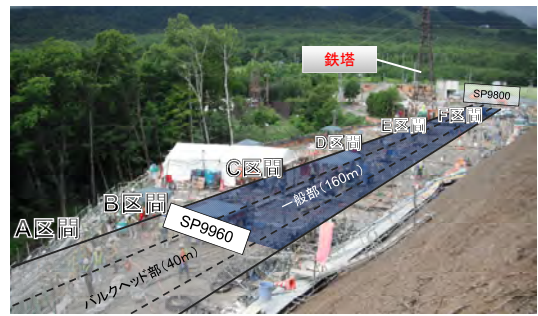


写真-2 止水注入工区間の全景写真

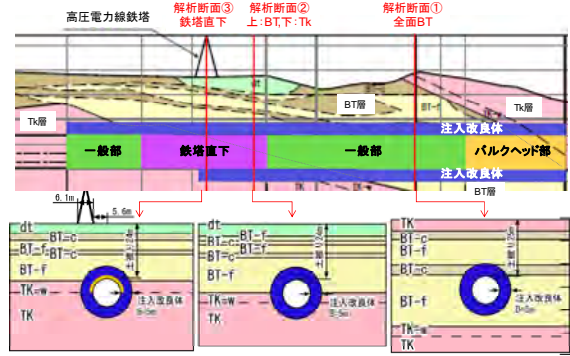


図-13 地質縦断及び解析断面

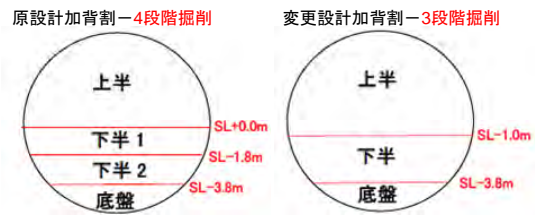


図-14 加背割（原設計、変更設計）

表-1 地盤物性値

地層	産種	層名	単位体積重量 (kN/m ³)	変形係数 (kN/m ²)	ポアソン比	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)	透水係数 (cm/s)
自然地盤	段丘堆積物	機主体	16.0	14,000	0.35	15	30	1.0 × 10 ⁻³
		シルト主体	18.0	30,000	0.35	15	30	2.0 × 10 ⁻⁴
	十勝溶結凝灰岩	新鮮部	22.0	150,000	0.35	500	30	2.0 × 10 ⁻⁵
		風化部	22.0	100,000	0.35	150	30	2.0 × 10 ⁻⁵
改良地盤	グラウト改良体(BT)	機主体	18.0	50,000	0.35	70	30	1.0 × 10 ⁻⁵
		シルト主体	22.0	150,000	0.35	500	30	1.0 × 10 ⁻⁵
	グラウト改良体(Tk)	新鮮部	22.0	150,000	0.35	500	30	1.0 × 10 ⁻⁵
		風化部	22.0	100,000	0.35	150	30	1.0 × 10 ⁻⁵

表-2 支保部材物性値

名称	仕様	単位体積重量 (kN/m ³)	弾性係数 (kN/m ²)	断面積 (m ²)	断面二次モーメント (m ⁴)	モデル化	
							弾性係数 (kN/m ²)
当初支保	鋼製支保工	H-150@1.0m	77.0	210,000,000	0.003965	0.0000162	Beam
	吹付けコンクリート	t=200mm, f _c =18N/mm ²	23.0	4,000,000	0.200000	-	Truss
	仮閉合吹付けコンクリート	t=150mm, f _c =18N/mm ²	23.0	4,000,000	0.150000	-	Truss
後継支保	鋼製支保工	H-200@1.0m	77.0	210,000,000	0.006353	0.0000472	Beam
	吹付けコンクリート	t=250mm, f _c =18N/mm ²	23.0	4,000,000	0.250000	-	Truss
	仮閉合吹付けコンクリート	t=200mm, f _c =18N/mm ²	23.0	4,000,000	0.200000	-	Truss

表-3 非排水構造区間 解析評価指標一覧

支保部材	支保部材短期許容応力度			坑内変位管理基準値		鉄塔 管理基準値	
	短期許容応力度 (N/mm ²)	管理レベル	天端沈下 (mm)	内空変位 (mm)	制限項目	相対変位量 (mm)	
鋼製支保工	210	I	32	64	垂直変位	4.5	
吹付けコンクリート	6.75	II	47	94	水平変位	6.8	
閉合吹付けコンクリート	6.75	III	63	126			

(4) 解析手法

解析ステップを図-15に示す。加背割や支保構成を変化させた200ケース以上のパラメトリックスタディを実施し、許容応力、管理基準値、塑性化軽減の全条件を満足する最適な施工手順を求めた。

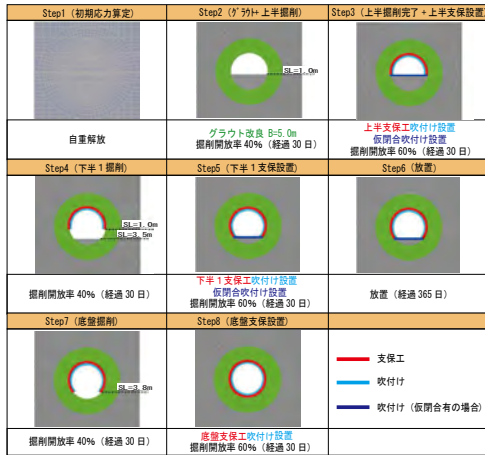


図-15 解析ステップ (変更加背)

(5) 解析結果

解析結果等より決定した止水注入区間の支保設計結果を図-16に示す。加背割は解析断面①～③ いずれにおいても3段階掘削が有利となったため、全解析断面とも3段階掘削に変更した。支保工については、解析断面①は鋼製支保工 H-200、吹付けコンクリート t=250mmにそれぞれ規格アップ+仮閉合が必要となる結果を得た。またバルクヘッド部の天端に位置する破碎帯はこれまでの掘削実績と調査ボーリングからも土砂状を呈している事が確認されている。バルクヘッド部の注入改良体は恒久的に止水性能を確保する必要がある。トンネル施工時の緩みを極力小さく抑える必要がある。そのため、バルクヘッド部については天端安定性と緩み抑制を目的としてAGF工も追加する事とした。

解析断面②、③については当初設計通りの支保構成で施工可能な結果となり加背割以外の変更は行わない。しかしながら、鉄塔の相対沈下の管理基準値 (4.5mm) を確保できないため、AGF工有りの仕様とした。その結果、基準値以内 (1.7mm) に抑えられる結果となった。そこで、鉄塔直下から45° 下向きの範囲はAGF工有りの仕様とした。

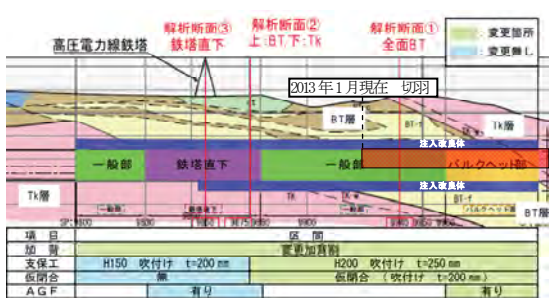


図-16 地質縦断及び掘削仕様割付図

4. 非排水構造区間の施工

(1) 坑内湧水管理

非排水構造区間を掘削する際は、坑内変位だけでなく、坑内湧水量についても計測を行い、掘進管理を実施することが求められる。図-17に坑内湧水の管理フロー図を示す。掘削時の湧水管理は、切羽距離による日々の坑内湧水量が予測値 (三次元浸透流解析による短期予測) 以下であることを確認する。大量湧水発生時や予測値を超えた場合には、作業を中止し三者協議 (発注者・施工者・解析コンサルタント) にて掘削を継続するか判断する事とした。また、掘進後は、掘削に伴う応力解放・更には湧水量が予測値を超えた場合や、突発的な大量湧水等により、周辺の地山がゆるむ可能性があり、品質確認としてチェック孔を設置し透水試験の実施、必要に応じて対策工 (ポストグラウト等) を検討する。

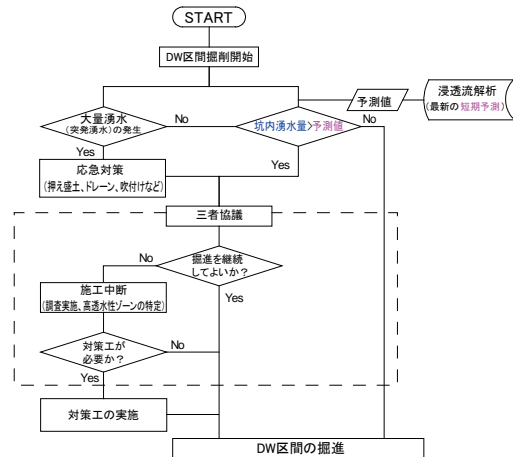


図-17 非排水構造区間の湧水管理フロー図

(2) 探り削孔による湧水対策

トンネル掘進時に予測値以上の湧水が発生した場合を想定し、被害を最小限に止め、早急に復旧する準備をしておく必要がある。本工事では、AGF施工時に、固定管を利用した探り削孔を実施し、掘削前に予測値以上の湧水が発生しないかどうか確認するとともに、大量湧水時には口元で直ちに止水ができるような工夫を行った。探り削孔の位置と手順を図-18に示す。

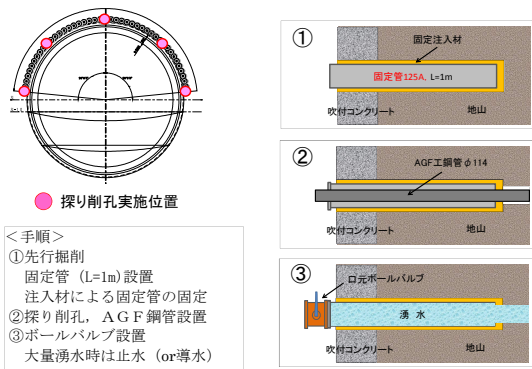


図-18 固定管・探り削孔の設置位置と手順

同図に示すように、探り削孔は、断面あたりほぼ均等に5本程度を基本とする。手順としては、まず1mの先行掘削を行い、固定管を挿入する。次に、その周囲を注入材によって充填することで、固定管を地山と一体化させる。固定する目的は、管と地山間および管周囲の地山からの地山流失防止である。なお、湧水発生後は、必要に応じて止水あるいは導水することが可能なように、口元にバルブを設置する。

(3) 掘削状況

様々な検討を重ね、非排水構造区間の掘削を開始した。非排水構造区間の掘削起点には北の峰トンネル最重要箇所の一つである、御料断層が存在している。写真-3はTD535地点の切羽写真である。同図に示すとおり、切羽には御料断層が明瞭に現れており、その下位にはBT層が分布している。

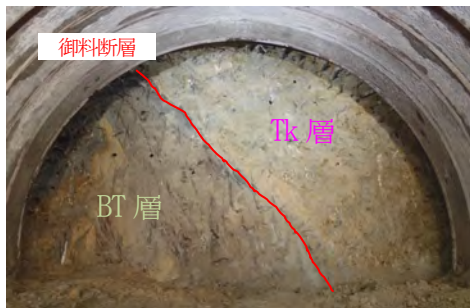


写真-3 バルクヘッド部の切羽状況 (御料断層)

当該箇所は恒久的な止水性が求められるバルクヘッド部であるため、緩みを極力抑制した掘削が要求されるが、過年度に止水注入と同時に行った切羽改良²⁾や、天端安定性と緩み抑制を目的として行ったAGF工、更には支保工の規格アップを行った事で、非常に脆弱な地層であるにもかかわらず、大きな変位を発生させる事無く、安全に施工する事ができた。

一方、坑内湧水量についても図-19に示すように、三次元浸透流解析から設定した予測値以内で掘削することができている。これは施工済みの止水注入工が高品質であり、バルクヘッドとして十分な機能を有していると言える。また、トンネル坑外に多数設置済みの地下水観測孔での観測や、周辺の井戸・河川等においても、トンネル掘削の影響は見られない。

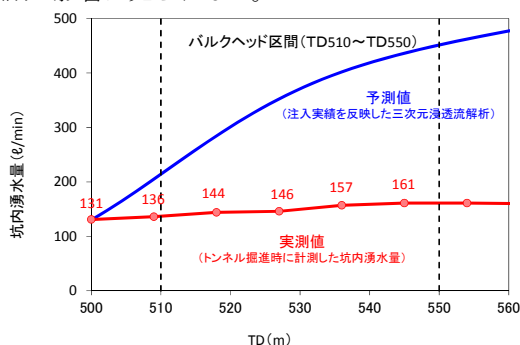


図-19 予測値と実測値の比較 (坑内湧水量)

現在の進捗状況 (2013.1現在) は、図-16に示すとおり、御料断層を通過し、切羽全面がBT層となる解析断面①付近の掘削を行っている。これまでのところは、御料断層を含むバルクヘッド区間と同様、大きな変位等も無く、周辺の水文環境への影響も見られない。

5. まとめと今後の課題

(1) 止水注入工効果検証

過年度に完了した止水注入工の効果検証を行った。各種効果確認工や、改良後の透水係数を反映して実施した三次元浸透流解析からは、周辺の地下水に大きな影響を与える可能性が低い事が想定される。また、これまでの非排水構造区間の掘削による坑内湧水量や、地下水観測孔の観測結果からも当初目標としていた止水効果は十分に得られていると考えられる。

(2) 止水注入区間の非排水構造 支保設計・掘削

地下水挙動や力学挙動を考慮した検討を行った。これまでの掘削状況から、設計は適切であり、安全に掘削出来ていると言える。ただし非排水構造区間の掘削は始まったばかりであり、引き続き十分な注意が必要である。また、高圧電力線鉄塔についても、協議により決まった管理基準値 (相対沈下量) 未満となる解析結果を得たが、観測結果を見ながら慎重な施工が必要である。更には、今後掘削が進めば止水注入工を行っていない箇所での施工となり、想定外の事象が発生する可能性もあることから、今後も坑内湧水量や周辺の地下水観測結果及び、浸透流解析結果等を総合的に判断しながら、周辺の水環境に極力影響を与えないような、安全・確実な施工に努めたい。

6. あとがき

最後になりましたが、検討及び論文作成に際してご協力を頂いた関係者の方々に感謝の意を表します。

(参考文献)

- 1) 山中昌也：三次元浸透流解析に基づくトンネル工法検討：第50回北海道開発局技術研究発表会
- 2) 千葉哲也：耐水層におけるトンネル施工のための止水注入とその管理について：第55回北海道開発局技術研究発表会
- 3) 社団法人地盤工学会：地盤工学への物理探査技術の適用と事例. p203, 2003. 9.